

В. Н. ВИНОСЛАВСКИЙ
Г. Г. ПИВНЯК
Л. И. НЕСЕН
А. Я. РЫБАЛКО
В. В. ПРОКОПЕНКО

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРО- СНАБЖЕНИЯ

Под редакцией
заслуженного работника
высшей школы УССР,
профессора
В. Н. ВИНОСЛАВСКОГО

*Допущено Министерством высшего
и среднего специального
образования УССР в качестве
учебника для студентов вузов,
обучающихся по специальности
«Электроснабжение» (по отраслям)*

КИЕВ
ГОЛОВНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ИЗДАТЕЛЬСКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ
«ВЫЩА ШКОЛА»
1989

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. *И. В. Жежеленко* (Мариупольский металлургический институт); д-р техн. наук, проф. *Г. Я. Вагин* (Горьковский политехнический институт)

Редакция литературы по информатике и автоматике
Редактор *В. Ф. Хмель*

П27 **Переходные процессы в системах электроснабжения: Учебник** / В. Н. Винославский, Г. Г. Пивняк, Л. И. Несен и др.; Под ред. В. Н. Винославского. — К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989. — 422 с.: ил.
ISBN 5-11-001185-0.

В учебнике рассматриваются электромагнитные и электромеханические переходные процессы в системах электроснабжения. Излагаются физические явления, обусловленные переходными процессами, методы их анализа и расчета. Материал иллюстрируется числовыми практическими примерами.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Электроснабжение» (по отраслям). Может быть использован также студентами других электроэнергетических специальностей и инженерно-техническими работниками, занятыми проектированием и эксплуатацией систем электроснабжения.

П 2202000000—081 177—89
М 211(04)—89

ББК 31.27я73

ISBN 5-11-001185-0

© Издательское объединение,
«Выща школа», 1989

	Список сокращений	8
	Предисловие	9
Часть 1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ		
Глава 1	Общие сведения о переходных процессах	
	1.1. Краткая историческая справка	11
	1.2. Режимы систем электроснабжения	14
	1.3. Причины возникновения переходных процессов	16
	1.4. Значимость исследований и расчетов переходных процессов	17
	Контрольные вопросы	18
	Темы рефератов	19
Глава 2	Короткие замыкания в системах электроснабжения	
	2.1. Виды, причины и последствия коротких замыканий	19
	2.2. Назначение расчетов коротких замыканий	22
	2.3. Допущения при расчетах токов короткого замыкания	23
	2.4. Расчетные схемы и параметры их элементов	24
	2.5. Схемы замещения и их преобразования	27
	2.6. Приведение параметров элементов короткозамкнутой цепи к базисным условиям	30
	Контрольные вопросы	41
	Темы рефератов	41
Глава 3	Переходные процессы в электрических машинах при трехфазных коротких замыканиях	
	3.1. Переходный процесс в синхронной машине без демпферных обмоток	42
	3.2. Переходный процесс в синхронной машине с демпферными обмотками	45
	3.3. Уравнения переходного процесса	48
	3.4. Особенности расчетов переходных процессов в электродвигателях	54
	Контрольные вопросы	56
	Темы рефератов	57
Глава 4	Токи трехфазного короткого замыкания	
	4.1. Короткое замыкание на зажимах генератора без автоматического регулирования возбуждения	57
	4.2. Короткое замыкание на зажимах генератора с автоматическим регулированием возбуждения	62

	4.3. Короткие замыкания в удаленных точках системы электроснабжения	63		7.12. Примеры расчетов	168
	4.4. Начальный ток короткого замыкания	66		Контрольные вопросы	182
	4.5. Ток короткого замыкания в произвольный момент времени	68		Темы рефератов	182
	4.6. Установившийся режим короткого замыкания	69			
	Контрольные вопросы	71			
	Темы рефератов	71			
Глава 5				Глава 8	
Практические методы расчета токов симметричного короткого замыкания	5.1. Расчет начального значения тока короткого замыкания	71	Продольная несимметрия и сложные виды повреждений	8.1. Общие сведения	182
	5.2. Определение тока короткого замыкания в произвольный момент времени по расчетным и типовым кривым	79		8.2. Разрыв одной фазы трехфазной цепи	185
	5.3. Расчет тока короткого замыкания по его общему и индивидуальному изменениям	84		8.3. Разрыв двух фаз трехфазной цепи	186
	5.4. Учет электродвигателей при расчете токов короткого замыкания	98		8.4. Включение в фазы неодинаковых сопротивлений	188
	5.5. Учет токов короткого замыкания, создаваемых электродвигателями в установках собственных нужд тепловых электростанций	98		8.5. Двойное замыкание на землю	191
	5.6. Расчеты токов короткого замыкания в электроустановках напряжением до 1 кВ	105		8.6. Однофазное короткое замыкание с разрывом фазы	199
	5.7. Расчеты токов короткого замыкания с использованием вычислительных машин	114		8.7. Примеры расчетов	202
	Контрольные вопросы	123		Контрольные вопросы	212
	Темы рефератов	123		Темы рефератов	212
Глава 6				Глава 9	
Основные положения расчета несимметричных режимов	6.1. Метод симметричных составляющих	124	Переходные процессы в особых условиях	9.1. Короткие замыкания в питающих сетях	212
	6.2. Основные соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений	127		9.2. Короткие замыкания в сетях постоянного тока	215
	6.3. Сопротивления элементов токам отдельных последовательностей	129		9.3. Короткие замыкания в сетях повышенной частоты	220
	6.4. Схемы замещения отдельных последовательностей	137		9.4. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью	221
	6.5. Результирующие э. д. с. и сопротивления	140		9.5. Переходные процессы, обусловленные особенностями технологии производства	226
	Контрольные вопросы	141		9.6. Процессы, происходящие при коммутациях конденсаторных батарей	229
	Темы рефератов	142		9.7. Примеры расчетов	232
				Контрольные вопросы	233
				Темы рефератов	234
Глава 7				Глава 10	
Поперечная несимметрия	7.1. Общие сведения	142	Уровни токов короткого замыкания	10.1. Качество электромагнитных переходных процессов	234
	7.2. Однофазное короткое замыкание	144		10.2. Способы ограничения токов короткого замыкания	236
	7.3. Двухфазное короткое замыкание	145		10.3. Применение технических средств ограничения токов короткого замыкания	243
	7.4. Двухфазное короткое замыкание на землю	146		10.4. Оптимизация уровней токов короткого замыкания	256
	7.5. Учет переходного сопротивления в месте короткого замыкания	148		10.5. Координация уровней токов короткого замыкания	259
	7.6. Правило эквивалентности прямой последовательности	150		10.6. Примеры расчетов	260
	7.7. Комплексные схемы замещения	153		Контрольные вопросы	265
	7.8. Сравнение токов при различных видах несимметричного короткого замыкания	155		Темы рефератов	265
	7.9. Векторные диаграммы токов и напряжений	158			
	7.10. Применение метода расчетных кривых для расчета несимметричных коротких замыканий	164			
	7.11. Замыкание на землю в сетях с изолированной нейтралью	166			
			Часть 2. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ		
			Глава 11		
			Устойчивость режима системы электроснабжения	11.1. Исходные условия исследования электро-механических переходных процессов	266
				11.2. Статическая устойчивость	271
				11.3. Динамическая устойчивость	275
				11.4. Результирующая устойчивость	279
				Контрольные вопросы	283
				Темы рефератов	284

	<i>Глава 12</i>	12.1. Модели элементов при анализе устойчивости	284		<i>Глава 16</i>	16.1. Классификация мероприятий по повышению устойчивости систем электроснабжения	406
Практические критерии и методы расчета устойчивости систем электроснабжения		12.2. Практические критерии оценки статической устойчивости	290	Повышение устойчивости систем электроснабжения		16.2. Использование регуляторов электростанций	407
		12.3. Исследование статической устойчивости методом малых колебаний	299			16.3. Использование устройств релейной защиты и автоматики	409
		12.4. Упрощенные методы определения динамической устойчивости	308			16.4. Мероприятия по повышению устойчивости на стадии проектирования систем электроснабжения	413
		12.5. Оценка динамической устойчивости сложной системы	312			Контрольные вопросы	416
		12.6. Учет автоматического регулирования возбуждения при расчете устойчивости по внутреннему пределу мощности	316			Темы рефератов	417
		12.7. Оценка результирующей устойчивости	328			Список использованной литературы	418
		12.8. Применение средств вычислительной техники	332			Предметный указатель	420
		12.9. Примеры расчетов	334				
		Контрольные вопросы	343				
		Темы рефератов	344				
Общая характеристика узлов нагрузки систем электроснабжения	<i>Глава 13</i>	13.1. Представление нагрузки при расчетах устойчивости систем электроснабжения	344				
		13.2. Статические и динамические характеристики нагрузки	347				
		13.3. Влияние нагрузки на статическую устойчивость системы электроснабжения	351				
		13.4. Расчет статической устойчивости по действительному пределу мощности	353				
		Контрольные вопросы	356				
	Темы рефератов	357					
Устойчивость узлов нагрузки при слабых возмущениях	<i>Глава 14</i>	14.1. Исходные положения	357				
		14.2. Расчет устойчивости асинхронных и синхронных двигателей	360				
		14.3. Учет влияния электрической сети на устойчивость узла нагрузки	363				
		14.4. Влияние компенсации реактивной мощности на устойчивость узла нагрузки	367				
		14.5. Использование статических характеристик при расчете устойчивости узла комплексной нагрузки	371				
		14.6. Примеры расчетов	374				
		Контрольные вопросы	381				
	Темы рефератов	381					
Устойчивость узлов нагрузки при сильных возмущениях	<i>Глава 15</i>	15.1. Резкие изменения параметров режима в узлах системы электроснабжения	382				
		15.2. Наброс нагрузки на электродвигатели	384				
		15.3. Переходный процесс в узле нагрузки при пуске асинхронного двигателя	389				
		15.4. Переходный процесс в узле нагрузки при пуске синхронного двигателя	390				
		15.5. Самозапуск асинхронных двигателей	391				
		15.6. Самозапуск синхронных двигателей	394				
		15.7. Самовозбуждение асинхронных двигателей во время пуска при последовательной емкостной компенсации в сети	396				
		15.8. Примеры расчетов	399				
		Контрольные вопросы	406				
	Темы рефератов	406					

АВР	— автоматическое включение резерва
АПВ	— автоматическое повторное включение
АРВ	— автоматическое регулирование возбуждения
ВЛ	— воздушная линия
ВН	— высшее напряжение
ГПП	— главная понижающая подстанция
ГЭС	— гидравлическая электростанция
ИРМ	— источник реактивной мощности
КЗ	— короткое замыкание
КЛ	— кабельная линия
к. п. д.	— коэффициент полезного действия
КТП	— комплектная трансформаторная подстанция
ЛЭП	— линия электропередачи
НН	— низшее напряжение
ОВВ	— обмотка возбуждения возбудителя
ОВГ	— обмотка возбуждения генератора
ПГВ	— подстанция глубокого ввода
РПН	— регулирование напряжения под нагрузкой
РУ	— распределительное устройство
СН	— среднее напряжение
СЭС	— система электроснабжения
ТП	— трансформаторный пункт
ТЭС	— тепловая электростанция
ТЭЦ	— теплоэлектроцентраль
ЭВМ	— электронная вычислительная машина
э. д. с.	— электродвижущая сила
ЭЭС	— электроэнергетическая система

С увеличением выработки электрической энергии дальнейшее быстрое развитие получат системы электроснабжения (СЭС) промышленных предприятий, транспорта, городов, сельского хозяйства и других отраслей народного хозяйства, которые являются основными потребителями вырабатываемой электрической энергии.

Сооружение и эксплуатация СЭС связаны со значительным расходом материальных ресурсов. Поэтому большое значение имеет повышение надежности и экономичности СЭС в различных режимах и условиях их эксплуатации, к которым относятся прежде всего аварийные и послеаварийные режимы, связанные с переходными процессами и существенными изменениями показателей качества электрической энергии у потребителей.

Применение вычислительной техники при исследованиях и расчетах переходных процессов позволило повысить точность схемных решений и электрических характеристик СЭС, благодаря чему могут достигаться более высокие надежность и экономичность. В связи с увеличением мощностей отдельных нагрузок, узловых пунктов нагрузок и СЭС в целом в последние годы в СССР и за рубежом много внимания уделяется анализу и разработке методов исследования переходных процессов в СЭС, направленных на повышение их устойчивости.

В научных и производственно-технических журналах по этим вопросам появился ряд работ, а в 1981 г. опубликована монография Ю. Е. Гуревича, Л. Е. Либовой и Э. А. Хачатряна по устойчивости нагрузки электрических систем. Однако обобщающих книг, изданных для студентов в качестве учебников или учебных пособий по переходным процессам в СЭС, до сих пор нет.

Основными направлениями перестройки высшего образования в стране предусматривается целевое, индивидуализированное, творческое обучение студентов. При этом существенно возрастает роль самостоятельной работы студентов, повышается их ответственность за качественное овладение знаниями.

Исходя из назревшей потребности, авторы поставили перед собой цель—создать учебник, который удовлетворял бы учебной программе дисциплины «Переходные процессы в СЭС», читаемой в вузах для специальности «Электроснабжение» (по отраслям).

При его написании авторы стремились ориентировать студентов на учет специфики переходных процессов в СЭС по сравнению с электроэнергетическими системами (ЭЭС), отдав предпочтение расчетам устойчивости нагрузки в разных режимах работы СЭС и при различных возмущениях. Одновременно они старались более четко выразить общность электромагнитных и электромеханических переходных процессов при анализах и расчетах устойчивости СЭС. Преследовались и такие цели, как иллюстрация рассматриваемых тем примерами практических расчетов, способствующими самостоятельному изучению излагаемого материала, а также привитие студентам навыков моделирования и использования вычислительной техники при исследованиях и расчетах переходных процессов в СЭС.

В основу учебника положены многочисленные труды ученых Московского энергетического института П. С. Жданова, С. А. Лебедева, С. А. Ульянова, В. А. Веникова, И. А. Сыромятникова по переходным процессам, а также последние работы других советских и зарубежных авторов.

Структурно книга состоит из двух частей. В первой части рассматриваются электромагнитные переходные процессы, обусловленные возникновением поперечной и продольной несимметрии в СЭС; во второй части — электромеханические переходные процессы, характеризующие устойчивость СЭС, в особенности их нагрузок.

Для закрепления теоретического материала, кроме примеров практических расчетов, в конце каждой главы книги помещены контрольные вопросы и темы рефератов, которые способствуют самостоятельному усвоению изучаемого материала и обязательны для выполнения.

Часть 1

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Глава 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ

1.1. Краткая историческая справка

В начале практического применения электрической энергии генераторы, двигатели и другие элементы электроустановок выполнялись с учетом лишь требований нормальных условий их работы. Будучи маломощными, первые электроустановки обладали достаточным запасом стойкости против механических, тепловых и других воздействий как в рабочих режимах, так и в аварийных ситуациях.

С увеличением мощности электроустановок их повреждения и значительные отклонения от нормальных условий работы сопряжались серьезными последствиями. Потребовалась разработка специальных мероприятий и средств для обеспечения работы электроустановок в аварийных ситуациях. Поскольку успех намечаемых мероприятий зависел от глубины знания явлений, происходящих в аварийных ситуациях, необходимо было разработать приемлемые методы расчета переходных процессов и увязать способы защиты электроустановок от повреждений с учетом переходных процессов, а также решить проблему устойчивости и другие задачи.

До Великой Октябрьской социалистической революции исследования переходных процессов в электроустановках находились в начальной стадии. Применявшиеся методы расчета переходных процессов не имели должного теоретического обоснования и были весьма приближенными. Особенно ощутимо это проявилось в период осуществления ленинского плана ГОЭЛРО, когда возникла необходимость создания электрических систем и обеспечения их устойчивой работы, уточнения методов расчета переходных процессов в сложно разветвленных электрических сетях, разработки методов ограничения токов короткого замыкания (КЗ), средств защиты электроустановок от воздействия КЗ и решения других задач.

Советские ученые за короткое время провели ряд важных исследований в области переходных процессов. В течение 1926—1930 гг. Л. И. Сиротинским, В. П. Хащинским, Н. Н. Шедриным и А. А. Смуриным были исследованы переходные процессы в синхронных электрических машинах. В 1933—1934 гг. были изданы первые в мировой литературе книги по вопросам устойчивости электрических систем, в которых нашли отражение результаты отечественных исследований и обобщения разработок зарубежных ученых. В 1930—

1935 гг. А. А. Горев и американский ученый Р. Парк независимо друг от друга составили дифференциальные уравнения электромагнитного переходного процесса синхронной электрической машины.

Предвоенные годы были периодом интенсивного развития научных основ, практических методов исследования переходных процессов и управления режимами электрических систем. На основании исследований Н. Н. Щедрина, С. А. Ульянова, А. Б. Чернина, Б. И. Розенберга и других ученых были уточнены и разработаны новые, более совершенные, методы расчета токов КЗ в электрических системах. В 1937—1938 гг. И. М. Маркович и С. А. Совалов обосновали предложенные ранее и ввели новые практические критерии оценки статической устойчивости систем. В это же время П. С. Жданов и К. А. Смирнов выявили природу лавины напряжения, предложили методы анализа устойчивости электрической нагрузки. В 1938—1940 гг. С. А. Лебедевым, И. А. Сыромятниковым и другими учеными были проведены теоретические и экспериментальные исследования применения автоматического регулирования возбуждения (АРВ), которое в дальнейшем было широко внедрено в электрические системы.

К исследованиям переходных процессов в электроустановках были привлечены научно-исследовательские и учебные институты (ВЭИ, МЭИ, ЛПИ и др.), крупные энергетические объединения (Мосэнерго, Ленэнерго) и проектные организации (институт «Теплоэлектропроект»).

В годы Великой Отечественной войны, когда энергетическое хозяйство западных районов страны было разрушено, большое развитие получила энергетика Урала и восточных районов, потребовавшая дальнейшего интенсивного продолжения исследований повышения надежности энергетических систем этих районов в связи с их большой нагрузкой и напряженной работой.

На основании проведенных исследований в 1944 г. были изданы Руководящие указания по расчету токов КЗ и выбору по режиму КЗ аппаратуры и проводников в установках высокого напряжения, которые с последующими дополнениями, изменениями и переработками действуют и в настоящее время. Были разработаны и начали широко внедряться средства линейной и противоаварийной автоматики — автоматические регуляторы возбуждения генераторов и частотной разгрузки систем.

В послевоенные годы (1950—1955 гг.) автоматические средства частотной разгрузки, регулирования напряжения, повторного включения и ввода резерва постоянно совершенствовались И. А. Сыромятниковым, Л. Г. Цукерником, С. С. Рокотяном, Д. И. Азарьевым, С. В. Усовым и другими учеными и стали обязательными для применения во всех ЭЭС страны.

Создание территориальных объединенных энергетических систем и формирование Единой энергетической системы СССР способствовали широкому проведению специальных теоретических и экспериментальных исследований вопросов дальнейшего внедрения противоаварийной автоматики, обеспечения устойчивости работы

создаваемых систем. Возникла необходимость в нормировании требований к устойчивости объединенных энергетических систем. В 1964 г. были изданы Основные положения и временные руководящие указания по определению устойчивости энергетических систем.

По мере развития энергетических систем и их объединений усложнились решаемые задачи применения различных средств анализа и их последующего совершенствования. В 60-е годы широкое применение получили расчетные модели постоянного тока и статические модели переменного тока. В дальнейшем развитию исследований переходных процессов в электроустановках способствовало использование аналоговых машин непрерывного действия и электродинамических (физических) моделей, созданных в МЭИ, ИЭМ, ВНИИЭ, СибНИИЭ и в других организациях. Аналоговые машины применялись для исследования самовозбуждения, АРВ, влияния параметров синхронных машин на протекание переходных процессов и др. На физических моделях исследовались переходные процессы в сложных энергетических системах, принципы действия и оптимизации настройки устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики, особенности режимов линий электропередач (ЛЭП) и др.

Моделирующие и расчетные устройства послужили основой для последующего создания и применения автоматизированных моделей переменного тока с динамическими элементами, моделирующими генераторами и нагрузками, а также гибридных устройств с комплексным использованием элементов аналоговой техники, статических моделей электрических сетей и элементов цифровой вычислительной техники. Гибридные устройства для исследований переходных процессов были созданы во ВНИИЭ, институте «Энергосетьпроект» и других организациях.

В последние годы в качестве основных средств для расчета и анализа переходных процессов в электроустановках используются цифровые вычислительные машины. Большое внимание уделяется также созданию и применению гибридных комплексов, содержащих физическую модель, аналоговые элементы для имитации действующих регулирующих устройств и управляющую электронную вычислительную машину (ЭВМ), которая позволяет автоматизировать управление и использовать современные методы обработки и контроля результатов исследования. Гибридные комплексы разрабатываются в Институте проблем моделирования в энергетике АН УССР, МЭИ, СибНИИЭ, НИИИТ и других организациях.

Для расчета токов КЗ с помощью ЭВМ широко применяются программы, разработанные в ИЭД АН УССР, институте «Энергосетьпроект», ЛПИ. Разработки алгоритмов и программ расчета электромеханических переходных процессов в энергетических системах нашли отражение в исследованиях ЛПИ, ЭНИН, ИЭД АН УССР, МЭИ, УПИ, СибНИИЭ, института «Энергосетьпроект» и других организаций.

В настоящее время при расчетах статической устойчивости, исследованиях электромеханических переходных процессов,

расчетах токов КЗ и решении ряда других задач большое внимание уделяется замене электрических систем эквивалентными, когда исходная математическая модель, описывающая поведение исследуемой системы, преобразуется в другую, более простую, но сохраняющую наиболее существенные свойства исследуемой системы.

Исследования, связанные с применением эквивалентных моделей для определения параметров и характеристик отдельных элементов системы, проводятся в АзНИИЭ, СибНИИЭ, МЭИ, ВНИИЭ, ИЭД АН УССР и в других организациях. Важное место при этом уделяется моделированию комплексной нагрузки, позволяющему учитывать поведение нагрузки при изменении режима, ее состава, параметров элементов схемы электроснабжения, степени загрузки асинхронных и синхронных двигателей и т. д.

Совершенствование расчетных моделей всех элементов энергетических систем, алгоритмов и программ для ЭВМ дает возможность анализировать переходные процессы как в энергетических системах в целом, СЭС предприятий, городов и сельского хозяйства, так и в нагрузке электрических систем.

1.2. Режимы систем электроснабжения

Изменения условий работы СЭС сопровождаются переходными процессами, которые приводят к изменению режимов СЭС и параметров ее элементов. Совокупность процессов, характеризующих условия работы СЭС и ее состояние в любой момент времени, называется *режимом системы*. Количественными показателями режима являются значения мощности, напряжения, тока и других величин, связанных между собой зависимостями через соответствующие параметры элементов системы.

К параметрам элементов системы относятся сопротивление и проводимости, коэффициенты трансформации, постоянные времени, коэффициенты усиления и другие параметры, определяемые физическими свойствами и схемой соединения элементов, а также расчетными данными.

В СЭС могут иметь место *установившиеся* или *переходные* (нестационарные) режимы. Первые характеризуются неизменными или медленными незначительными изменениями параметров элементов системы, вторые — быстрыми их изменениями во времени.

По изменению параметров элементов СЭС различают четыре вида режимов:

1) *нормальные установившиеся*, когда значения параметров изменяются в пределах, соответствующих нормальной работе потребителей, определяемой их основными технико-экономическими характеристиками;

2) *нормальные переходные*, соответствующие обычным эксплуатационным изменениям в СЭС (включение, отключение, переключение, изменение нагрузки и др.). Эти режимы характеризуются относительно быстрым и резким изменением параметров некоторых

элементов СЭС при незначительных изменениях параметров в ее узловых точках;

3) *аварийные установившиеся* и *переходные*, возникающие в СЭС под действием таких изменений в системах электрических соединений, при которых значения параметров всех элементов, включая узловые точки, резко отличаются от номинальных;

4) *послеаварийные установившиеся*, которые наступают после отключения поврежденных элементов СЭС, обусловленного необходимостью ликвидации аварии. В этих режимах параметры оставшихся в работе элементов СЭС могут быть близкими к параметрам нормального режима или значительно отличаться от них. Соответственно будет иметь место *благополучный* или *неблагополучный* исход аварии в СЭС.

Основной задачей сохранения требуемого режима СЭС является поддержание таких параметров элементов системы, при которых обеспечивается устойчивость данного режима.

Устойчивость режима — это способность СЭС при внезапных случайных возмущениях ее режима сохранять допустимые значения параметров в узловых точках. Различают статическую и динамическую устойчивость.

Статической устойчивостью СЭС называют ее способность возвращаться к исходному установившемуся режиму после малых отклонений параметров ее элементов от допустимых пределов.

Динамическая устойчивость — это способность СЭС возвращаться после временного приложения внезапного и резкого возмущения к такому установившемуся режиму, при котором значения параметров режима в ее узловых точках находятся в допустимых пределах. Разновидностью динамической устойчивости является *результатирующая устойчивость* — способность СЭС восстанавливать синхронную работу после кратковременного, допустимого по условиям эксплуатации, асинхронного режима с приемлемыми показателями качества электрической энергии.

К нарушениям динамической устойчивости СЭС может приводить такое внезапное возмущение, как отключение или включение одного из важных ее элементов (одной из двухцепных ЛЭП, мощных электродвигателей и др.), существенно изменяющее режим работы других элементов СЭС. Наиболее опасным возмущением являются КЗ, под действием которых система переходит в послеаварийный режим. Если параметры режима узловых точек СЭС в послеаварийном состоянии существенно не отличаются от параметров ее нормального режима, то считают, что динамическая устойчивость СЭС не нарушилась.

При нарушении статической или динамической устойчивости СЭС могут появляться различия в частотах ее элементов, снижения напряжения в системе до значений, неприемлемых для большинства потребителей, что приводит к экономическому ущербу для народного хозяйства.

1.3. Причины возникновения переходных процессов

Переходные процессы в электрических системах являются следствием изменения режимов, обусловленных эксплуатационными условиями, или результатами повреждений изоляции и токоведущих частей электроустановок.

Причинами возникновения переходных процессов могут быть многочисленные воздействия на элементы системы:

включения, отключения и переключения источников электрической энергии, трансформаторов, ЛЭП, электроприемников и других элементов;

появление несимметрии токов и напряжений в результате отключения отдельных фаз, несимметричных изменений нагрузки, обрывов фаз и пр.;

КЗ в элементах системы;

форсировка возбуждения синхронных машин и гашение их магнитного поля;

внезапные набросы и сбросы нагрузки;

синхронный пуск двигателей и синхронных компенсаторов;

реверсирование асинхронных двигателей;

асинхронный ход синхронных машин после выпадения их из синхронизма;

атмосферно-климатические воздействия на элементы электрической системы;

повторные включения и отключения короткозамкнутых цепей.

Переходные процессы, обусловленные коммутационными переключениями элементов системы, выполнением испытаний и регулированием режимов, относятся к *нормальной эксплуатации*, а КЗ, обрывы фаз, повторные включения и отключения короткозамкнутых цепей, выпадение машин из синхронизма и прочие нарушения нормальных режимов представляют собой *аварийные условия*.

Предельные значения параметров электроэнергетических установок при переходных процессах в нормальных режимах эксплуатации обычно учитываются в процессе изготовления электрического оборудования, проектирования и сооружения СЭС, а также при обосновании эксплуатационных режимов.

В данной книге рассматриваются только методы решения задач, относящихся к определению области допустимых режимов в аварийных условиях. К ним относятся: исследование электромагнитных переходных процессов (расчет токов КЗ, анализ неполнофазных режимов и др.); определение статической устойчивости и ее запасов; анализ динамической устойчивости; исследование длительных процессов, обусловленных аварийными нарушениями балансов мощности; расчеты асинхронных режимов и др.

В элементах электрических систем аварийные условия возникают как при устойчивых, так и при неустойчивых повреждениях изоляции и токоведущих частей.

Примерами неустойчивых повреждений изоляции являются: в воздушных линиях (ВЛ) — перекрытия гирлянд подвесных

изоляторов, сближения проводов при определенных климатических условиях, приближение к проводам ветвей деревьев, а также набросы на провода различных предметов;

в кабельных линиях (КЛ) — пробой изоляции, самоустраняемые благодаря специфическим свойствам бумажно-масляной изоляции (в разрядном промежутке создаются условия, способствующие гашению дуги);

в распределительных устройствах (РУ) — набросы или поверхностные перекрытия при повышенном увлажнении либо загрязнении.

По статистическим данным количество неустойчивых повреждений изоляции значительно превышает устойчивые. Так, в ВЛ напряжением 110—500 кВ только 16,2 % повреждений являются устойчивыми, а в КЛ напряжением 6—10 кВ число устойчивых повреждений в 4—8 раз меньше, чем неустойчивых.

В КЛ повреждения развиваются постепенно. При этом 82 % относятся к пробую изоляции КЛ, а 18 % — к пробую других элементов системы.

Для сохранения работы ЛЭП при неустойчивых повреждениях в большинстве ВЛ, а также в некоторых КЛ предусматриваются устройства автоматического повторного выключения (АПВ), успешное действие которых составляет 45—90 % всех отключений.

1.4. Значимость исследований и расчетов переходных процессов

Переходные процессы в СЭС изучаются после получения необходимых знаний из общеобразовательных и специальных дисциплин (электрические машины, аппараты и сети), в которых рассматриваются режимы отдельных элементов СЭС. Переходные процессы в элементах СЭС изучаются с учетом множества связей между элементами системы и происходящих изменений их параметров.

Задача исследований и расчетов переходных процессов заключается в том, чтобы, научившись выяснять особенности работы и качественно новые свойства при количественных изменениях в СЭС, предвидеть протекание переходных процессов и управлять ими. Для этого нужно уметь рассчитывать переходные процессы, прогнозировать по изменениям параметров системы количественные изменения ее режима и воздействовать через регулирующие устройства на желательное протекание переходного процесса.

Исследования и расчеты переходных процессов являются одним из необходимых условий решения многих задач, возникающих при проектировании и эксплуатации СЭС. Эти задачи связаны с исследованием электромагнитных переходных процессов, выбором принципов действия и настройки автоматических устройств противаварийного управления, анализом электромеханических переходных процессов с целью определения условий устойчивости электрической нагрузки систем и разработки мероприятий для обеспечения

непрерывности работы промышленных предприятий в различных режимах СЭС.

На основании исследований и расчетов переходных процессов практически решаются важнейшие вопросы проектирования, сооружения и эксплуатации СЭС:

обоснование экономически целесообразных систем передачи, распределения и потребления электрической энергии;

обеспечение осуществимости такого режима, который должен наступить после окончания переходных процессов в системе;

выполнение требований, предъявляемых к качественным показателям переходного процесса;

обеспечение устойчивости перехода от одного режима к другому; оценка устойчивости режима, наступившего после окончания переходных процессов;

определение продолжительности переходного процесса и его влияния на изменение параметров элементов системы;

испытание аппаратуры и СЭС в переходных режимах.

На основании исследований и расчетов переходных процессов следует проектировать такие СЭС, в которых переходные процессы заканчивались бы благополучным желательным установившимся режимом. При этом переходные процессы должны рассматриваться с двух позиций:

- 1) надежности всей СЭС;
- 2) поведения системы и ее отдельных элементов при изменениях условий их работы.

С учетом переходного процесса должны быть обеспечены такие изменения параметров режима СЭС, при которых не снижались бы существенно качественные показатели электроснабжения потребителей. С этой целью важное значение имеют уменьшение продолжительности переходного процесса, исключение возникновения новых переходных процессов, обеспечение окончания переходного процесса достаточно надежным режимом.

При аналитических исследованиях переходных процессов используются преобразование координат, комплексные величины для записи мгновенных значений переменных, метод симметричных составляющих, схемы замещения для различных режимов СЭС и др. Существуют графоаналитические способы представления переходных процессов. Для решения сложных задач и проведения традиционных расчетов переходных процессов в настоящее время широко применяются средства вычислительной техники.

Большие возможности при исследованиях и расчетах переходных процессов дают методы моделирования и экспериментального исследования реальных СЭС.

Контрольные вопросы

1. Каковы цели изучения дисциплины и ее значение в формировании теоретических и практических знаний в области переходных процессов?
2. Каковы основные этапы развития исследований и совершенствования расчетов переходных процессов?

3. Какие виды режимов и процессов имеют место в СЭС?
4. Что такое параметры режима и параметры СЭС?
5. Что понимается под статической, динамической и результирующей устойчивостью?
6. Какие причины возникновения переходных процессов в СЭС?
7. Для чего необходимо рассчитывать переходные процессы?

Темы рефератов

1. Аварийные режимы в СЭС, их последствия и пути предотвращения.
2. Виды переходных процессов в СЭС и их характерные особенности.

Глава 2

КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

2.1. Виды, причины и последствия коротких замыканий

В процессе эксплуатации СЭС одной из основных причин нарушения нормального режима работы отдельных электроустановок и системы в целом являются возникающие КЗ, которые представляют собой всякое случайное или преднамеренное, не предусмотренное нормальным режимом работы, электрическое соединение различных точек электроустановки между собой или с землей.

В месте КЗ может появляться электрическая дуга с переходным сопротивлением, которое при сравнительно больших токах КЗ является практически активным и неизменным.

Замыкания в глухо- или эффективно-заземленных сетях через дугу либо непосредственные соединения электроустановки называют *короткими замыканиями*. Замыкания в незаземленных или резонансно-заземленных сетях относят к простым замыканиям, которые обычно называют *замыканиями*.

В зависимости от режима нейтралей в электрических сетях могут быть различные виды коротких и простых замыканий (табл. 2.1).

Таблица 2.1. Виды коротких и простых замыканий в электрических сетях

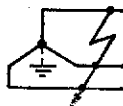
Схема замыкания	Режим нейтрали сети			
	глухо- или эффективно-заземленной		незаземленной или резонансно-заземленной	
	Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
	Трехфазное КЗ	$K^{(3)}$	Трехфазное КЗ	$K^{(3)}$


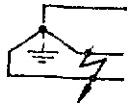
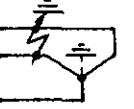

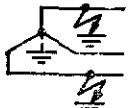
Схема замыкания	Режим нейтрали сети			
	глухо- или эффективно-заземленной		незаземленной или резонансно-заземленной	
	Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
	Трехфазное КЗ на землю	$K^{(1,1,1)}$	Трехфазное КЗ на землю (имеет контакт с землей)	$K^{(3,3)}$
	Двухфазное КЗ	$K^{(2)}$	Двухфазное КЗ	$K^{(2)}$
	Двухфазное КЗ на землю	$K^{(1,1)}$	Двухфазное КЗ на землю (имеет контакт с землей)	$K^{(2,2)}$
	Однофазное КЗ	$K^{(1)}$	Однофазное замыкание на землю	$3^{(1)}$
	Двойное КЗ на землю	$K^{(1+1)}$	Двойное замыкание на землю	$3^{(1+1)}$

Таблица 2.2. Относительная частота различных видов КЗ в зависимости от напряжения сети

Обозначение КЗ	Относительная частота КЗ (%) в сетях напряжением, кВ					
	6—20 (распределительная сеть)	6—20 (сеть блоков)	35	110	220	330
$K^{(1)}$	61	60	67	81	89	91
$K^{(2)}$	17	20	18	5	4	4
$K^{(1,1)}$	11	15	7	—	7	4
$K^{(3)}$	11	5	8	4	3	1

В количественном отношении КЗ в сетях, по усредненным данным согласно [22], распределяются по видам следующим образом: $K^{(3)} \approx 5\%$; $K^{(2)} \approx 10\%$; $K^{(1)} \approx 65\%$; $K^{(1,1)}$ и $K^{(1+1)} \approx 20\%$. Однако статистические исследования, проведенные в последние годы МЭИ, показали, что относительная частота различных видов КЗ существенно зависит и от напряжения сети (табл. 2.2).

Из статистических исследований мощной энергетической системы следует также, что относительная частота различных видов КЗ на ее элементах неодинакова. Наибольшая относительная частота КЗ приходится на ЛЭП и подстанции — 47%, на электрическую часть электростанций — 19,1%, на силовую часть электростанций — 26,2% и на другие элементы системы — 7,7%.

Короткие замыкания возникают в результате нарушений изоляции электроустановок, являющихся следствием разных причин: старения изоляции в процессе эксплуатации электрооборудования; перенапряжений; прямых ударов молнии; механических повреждений; набросов посторонних предметов на токоведущие части; неудовлетворительного ухода за электрооборудованием; ошибочного действия обслуживающего персонала.

Последствиями КЗ являются:

недопустимый нагрев электрооборудования и его термическое повреждение из-за значительного увеличения токов (в 10—15 раз и более);

появление больших усилий между токоведущими частями, которые могут привести к их механическому повреждению и разрушению;

снижение напряжения и искажение его симметрии, что отрицательно сказывается на работе потребителей. Так, при понижении напряжения на 30—40% в течение времени не менее 1 с останавливаются электродвигатели, в результате чего возможны нарушения технологического цикла на предприятиях, появление брака продукции и другие последствия, связанные с народнохозяйственным ущербом;

наведение при несимметричных КЗ э. д. с. в соседних линиях связи и сигнализации, опасных для обслуживающего персонала и используемой аппаратуры;

нарушение устойчивости отдельных элементов и режима СЭС в целом, приводящее к возникновению аварийных ситуаций с отключением большого количества потребителей электрической энергии; возгорание электроустановок.

Наиболее опасные последствия проявляются обычно в элементах системы, прилегающих к месту возникновения КЗ. Если КЗ появилось на большой электрической удаленности от источника питания, то увеличение тока воспринимается генераторами как некоторое повышение нагрузки, а сильное снижение напряжения происходит только вблизи места трехфазного КЗ.

Чтобы обеспечить безаварийное электроснабжение всех потребителей, необходимо проектировать и сооружать СЭС с учетом возможных КЗ, строго соблюдать правила технической эксплуатации

Электроустановок, непрерывно повышать технический уровень и качество изготовления применяемого электрооборудования. Для исключения опасных последствий от КЗ в СЭС и обеспечения устойчивости нагрузки вводят быстродействующие релейные защиты отдельных элементов, применяют специальные схемы автоматического включения резерва, предусматривают разделение во времени процессов самозапуска различных групп двигателей, устанавливают регулирующие устройства возбуждения синхронных машин и др.

2.2. Назначение расчетов коротких замыканий

Расчет электромагнитных переходных процессов в СЭС при КЗ предусматривает определение токов и напряжений в той или иной короткозамкнутой цепи при заданных (расчетных) условиях. Он имеет важное значение для проектирования и эксплуатации СЭС. В соответствии с целевым назначением расчета находят указанные параметры для интересующего момента времени или вычисляют их изменения в течение переходного процесса в зависимости от поставленной задачи. При этом рассчитывают токи КЗ в отдельных ветвях или точках цепи с целью определения наиболее характерного для того или иного электрооборудования расчетного аварийного режима.

Расчеты токов КЗ необходимы для следующих **ц е л е й**:

- выявления условий работы потребителей при возможных КЗ и определения допустимости того или иного режима;
- выбора электрических аппаратов электроустановок по условиям термической и электродинамической стойкости;
- проектирования и настройки средств релейной защиты и автоматики СЭС;
- сопоставления, оценки и выбора схем электрических соединений СЭС;
- координации и оптимизации значений токов КЗ;
- оценки устойчивости работы СЭС и ее узлов нагрузки;
- проектирования заземляющих устройств;
- определения влияния токов КЗ на линии связи;
- выбора разрядников;
- анализа аварий в электроустановках;
- проведения различных испытаний в СЭС.

Точность расчета КЗ зависит от его целевого назначения. Для выбора и проверки электрических аппаратов точность расчета может быть ниже, чем для решения других задач. Так, при выборе средств релейной защиты и автоматики точность расчета аварийных режимов должна быть значительно выше. В том случае, необходимо определить наибольшее и наименьшее значение токов и напряжений, возможный сдвиг между ними в отдельных фазах либо между их симметричными составляющими и т. п.

2.3. Допущения при расчетах токов короткого замыкания

Расчет токов КЗ в современных крупных СЭС представляет собой сложную и трудоемкую задачу даже с применением средств вычислительной техники. При решении большинства практических задач, связанных с расчетами токов КЗ, принимают ряд допущений, не вносящих существенных погрешностей в точность расчетов. Применительно к сетям напряжением выше 1 кВ основные допущения следующие:

пренебрегают насыщением магнитных систем всех элементов цепи КЗ (генераторов, трансформаторов и электродвигателей); все нагрузки представляют постоянными индуктивными сопротивлениями;

пренебрегают активными сопротивлениями элементов схемы, если отношение результирующих сопротивлений от источника до точки КЗ $r_{рез}/x_{рез} \leq 1/3$ (активные сопротивления учитывают только при определении степени затухания апериодических составляющих токов КЗ);

пренебрегают емкостными проводимостями на землю ВЛ напряжением до 220 кВ (для КЛ напряжением 110 кВ и выше емкостные проводимости необходимо учитывать);

не учитывают сдвиг по фазе э. д. с. источников энергии, входящих в расчетную схему;

считают, что все элементы СЭС симметричны, а нарушение симметрии происходит только в месте КЗ;

приближенно учитывают затухание апериодической составляющей тока КЗ в схемах с несколькими независимыми контурами;

учитывают в виде обобщенных нагрузок центров питания все электроприемники, за исключением мощных электродвигателей, подключенных непосредственно в месте КЗ или на небольшом электрическом удалении от него;

пренебрегают различием значений сверхпереходных индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям синхронных машин;

пренебрегают токами намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов.

Электрические сети напряжением до 1 кВ являются в основном распределительными, разветвленными, содержат значительное количество силовых элементов, устройств, аппаратов контроля и управления. Как правило, они питаются от одного мощного источника, для которого в аварийных режимах (КЗ) можно полагать $U_c = \text{const}$.

Расчеты токов КЗ в этих сетях выполняют с теми же допущениями, что и в сетях напряжением свыше 1 кВ, но с учетом активных сопротивлений силовых элементов сети. В расчетную схему короткозамкнутой цепи необходимо дополнительно включать и учитывать:

сопротивления элементов РУ (проводников, кабелей и шин длиной 10—15 м и более, токовых катушек расцепителей автоматических выключателей, первичных обмоток многовитковых трансформаторов тока, переходных сопротивлений контактов, коммутационных аппаратов);

переходные сопротивления в месте КЗ;
несимметрию сопротивлений фаз (например, при установке трансформаторов тока не во всех фазах).

Для этих сетей в полном сопротивлении короткозамкнутой цепи, как правило, преобладает активная составляющая и при $r_{рез} \geq \geq x_{рез}/3$ индуктивной составляющей можно пренебречь.

2.4. Расчетные схемы и параметры их элементов

На первом этапе расчета аварийных режимов с КЗ на основе принципиальной схемы СЭС составляют расчетную схему. Принципиальная схема СЭС должна соответствовать предшествующему нормальному режиму эксплуатации с наибольшим числом включенных источников питания и подпиткой точек КЗ в последующих аварийных режимах.

Расчетная схема соответствует аварийным режимам СЭС и на ней в однолинейном изображении показывают источники СЭС, точки КЗ и все силовые элементы, по которым возможно протекание тока КЗ или его составляющих, т. е. генераторы, синхронные компенсаторы, статические источники реактивной мощности (ИРМ), малоудаленные от точек КЗ обобщенные нагрузки, силовые трансформаторы и автотрансформаторы, реакторы, ВЛ и КЛ, связывающие источники питания с точками КЗ. В расчетной схеме учитывают электродвигатели как источники подпитки точек КЗ при их небольшой электрической удаленности и суммарной мощности (или каждого в отдельности) 1000 кВ · А и более.

Под *электрической удаленностью* точки КЗ от источника питания или подпитки понимают приведенное к номинальной мощности и номинальному напряжению источника суммарное сопротивление короткозамкнутой цепи в относительных единицах (при его значении, большем трех, КЗ считается *удаленным*, а при значении, меньшем или равном трем, — *малоудаленным*). Удаленность точки КЗ можно оценить отношением тока источника в начальный момент времени КЗ к его номинальному току. КЗ *малоудаленное*, если это отношение равно или больше единицы. В противном случае КЗ является *удаленным*.

В зависимости от постановки задачи на схеме намечают несколько расчетных точек КЗ и указывают виды КЗ. Конечной целью расчетов может быть определение как максимальных (для проверки электрооборудования на стойкость к токам КЗ), так и минимальных (для проверки релейной защиты) значений аварийных токов, а также остаточных напряжений в различных точках сети. Поэтому на этапе составления расчетной схемы выясняют расчетные условия: какие

ее элементы должны быть включены; где должны быть расположены точки КЗ; каков вид КЗ и каким должен быть принят расчетный момент времени КЗ для получения соответствующих значений параметров расчетного аварийного режима. Расчетному режиму придается смысловое значение, исходя из конечной цели расчета тока КЗ. При перспективных расчетах СЭС максимальные режимы КЗ следует определять с учетом развития сети.

Каждый элемент расчетной схемы характеризуется соответствующими параметрами. Для синхронного генератора — это номинальная полная $S_{ном}$ (МВ · А) или активная $P_{ном}$ (МВт) мощность; номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_{ном}$; номинальное напряжение $U_{ном}$ (кВ); сверхпереходное реактивное сопротивление x_{*d} ; реактивное сопротивление обратной последовательности x_{*2} ; постоянная времени затухания апериодической составляющей тока трехфазного КЗ T_a (с). Значения этих параметров в случае турбо- и гидрогенераторов приводятся в паспортных данных машин. Эквивалентный источник питания может быть получен объединением нескольких генераторов с суммарной номинальной мощностью $S_{Σном}$ и результирующим сверхпереходным сопротивлением x_{*c} .

Если СЭС питается от мощной ЭЭС, то связь с ней может быть задана током или мощностью КЗ. При отсутствии этих данных приближенный расчет выполняют по предельному току отключения выключателей, установленных на шинах связи с ЭЭС, считая, что ток или мощность при трехфазном КЗ непосредственно за выключателем равны соответственно его номинальному отключаемому току $I_{откл.ном}$ или номинальной отключаемой мощности $S_{откл.ном}$ при заданном напряжении. Если в рассматриваемом узле находится местная станция, которая создает при КЗ ток $I_{ст}''$ или мощность $S_{ст}''$, следует исходить из значения тока $I_{откл.ном} - I_{ст}''$ или мощности $S_{откл.ном} - S_{ст}''$. На основе этих параметров находят сопротивление энергетической системы x_c .

Генераторы, синхронные компенсаторы и обобщенные нагрузки с большой электрической удаленностью целесообразно заменять эквивалентным источником с неизменной по амплитуде э. д. с. Действующее значение э. д. с. такого источника можно считать равным среднему номинальному напряжению ступени трансформации, на которой он связан с остальной частью расчетной схемы. Его сопротивление равно суммарному сопротивлению соответствующей части СЭС.

Параметрами синхронного компенсатора являются: номинальная мощность $S_{ном}$ (МВ · А); номинальное напряжение $U_{ном}$ (кВ); сверхпереходное сопротивление x_{*d} ; сопротивление обратной последовательности x_{*2} ; постоянная времени затухания апериодической составляющей тока трехфазного КЗ T_a (с).

Синхронный двигатель задается параметрами: номинальной полной $S_{ном}$ (МВ · А) или номинальной активной $P_{ном}$ (МВт) мощностью; номинальным коэффициентом мощности $\cos \varphi_{ном}$; номинальным напряжением $U_{ном}$ (кВ); к. п. д. η (%); сверхпереходным реактивным

ным сопротивлением x_{*d} или кратностью пускового момента $M_{*пуск}$, причем

$$x_{*d} \approx (1/I_{*пуск}) \sqrt{1 - (M_{*пуск}/I_{*пуск})^2}. \quad (2.1)$$

Асинхронный двигатель характеризуется: номинальной мощностью $P_{ном}$ (МВт); номинальным напряжением $U_{ном}$ (кВ); номинальным коэффициентом мощности $\cos \varphi_{ном}$; к. п. д. η (%); кратностью пускового тока $I_{*пуск}$; кратностью пускового момента $M_{*пуск}$; кратностью максимального момента M_{*max} .

Обобщенная нагрузка включает в себя осветительную нагрузку, питание электродвигателей, печей, выпрямителей и т. п. Для обобщенной нагрузки сверхпереходная э. д. с. $E''_{*н} = 0,85$. Среднее значение сопротивления нагрузки, приведенное к среднему номинальному напряжению ступени трансформации в месте подключения нагрузки и к полной мощности нагрузки, $x''_{*н} = 0,35$ для $t = 0$ и $x_{*н} = 1,2$ для $t > 0$.

При определении начального тока КЗ обычно учитывают обобщенную нагрузку, которая непосредственно связана с точкой КЗ или незначительно электрически удалена от нее.

При определении начального тока трехфазного КЗ синхронные генераторы и конденсаторы, мощные синхронные и асинхронные двигатели, подключенные непосредственно в месте КЗ или на небольшом электрическом удалении от него, а также обобщенные нагрузки необходимо отражать на расчетной схеме сверхпереходными значениями э. д. с. E'' и сопротивления x_d'' .

Двухобмоточный трансформатор задается параметрами: номинальной мощностью $S_{ном}$ (МВ · А); номинальными высшим и низшим напряжениями обмоток U_B и U_H (кВ); напряжением КЗ u_K (%); потерей КЗ P_K (кВт) или отношением x_1/r_1 .

Трехобмоточный трансформатор (автотрансформатор) имеет параметры: номинальную мощность $S_{ном}$ (МВ · А); номинальные напряжения обмоток U_B , U_C и U_H (кВ); напряжение КЗ между обмотками u_{KB-C} , u_{KB-H} и u_{KC-H} (%); потери КЗ P_{KB-C} , P_{KB-H} , P_{KC-H} (кВт).

Параметрами двухобмоточного трансформатора с расщепленной обмоткой низшего напряжения (НН) являются: номинальная мощность обмотки высшего напряжения (ВН) S_B или номинальная мощность обмотки НН $S_{H1(H2)} = 0,5 S_B$ (МВ · А); номинальное напряжение обмоток U_B и $U_{H1(H2)}$ (кВ); напряжение КЗ между обмотками $u_{KB-H1(H2)}$ и u_{KH1-H2} (%); потери КЗ P_K (кВт) или отношение x_1/r_1 .

Реактор характеризуется параметрами: номинальным напряжением $U_{ном}$ (кВ); номинальным индуктивным сопротивлением $x_{ном}$ (Ом или %); коэффициентом связи $k_{св}$ (для двоянного реактора); номинальным током $I_{ном}$ (А); номинальными потерями мощности $P_{ном}$ (кВт) или отношением $x_{ном}/r$.

Параметрами ВЛ являются: ее длина (км); количество параллельных цепей; индуктивные сопротивления прямой последователь-

ности x_1 и нулевой последовательности x_0 (Ом/км); активное сопротивление прямой последовательности r_1 (Ом/км) или отношение x_1/r_1 ; активное сопротивление нулевой последовательности r_0 (Ом/км). Значения сопротивлений r_1 и x_1 даются в справочниках в зависимости от марки провода и усредненного значения среднего геометрического расстояния между проводами. Средние расчетные значения x_1 следующие: 0,4 Ом/км для ВЛ напряжением 6—220 кВ; 0,33 Ом/км для ВЛ напряжением 330 кВ (два провода на фазу) и 0,3 Ом/км для ВЛ напряжением 500 кВ (три провода на фазу). Сопротивление x_0 зависит от сечения проводов, расстояний между фазами, наличия или отсутствия заземленных тросов и соседних параллельных цепей.

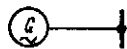
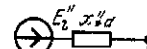
Параметрами КЛ являются: ее длина (км); количество кабелей в линии; индуктивные сопротивления прямой последовательности x_1 и нулевой последовательности x_0 (Ом/км); активное сопротивление прямой последовательности r_1 (Ом/км) или отношение x_1/r_1 ; активное сопротивление нулевой последовательности r_0 (Ом/км). Значения сопротивлений КЛ зависят от типов кабелей и изменяются в широких пределах. Средние расчетные значения x_1 в случае трехжильных КЛ следующие: 0,12 Ом/км для КЛ напряжением 35 кВ; 0,08 Ом/км для КЛ напряжением 6 и 10 кВ; 0,07 Ом/км для КЛ напряжением 3 кВ.

Значения сопротивлений x_0 и r_0 зависят от способов прокладки кабелей и их типов. В случае трехжильных КЛ приближенно можно считать, что $x_0 = (3,5 \div 4,6) x_1$; $r_0 = 10r_1$.

2.5. Схемы замещения и их преобразования

Схему замещения СЭС составляют на основе ее расчетной схемы для начального момента переходного процесса (источники замещаются сверхпереходными э. д. с. и сопротивлениями). Ее составляют для каждой точки КЗ и в нее включают элементы расчетной схемы, по которым возможно протекание тока КЗ или его составляющих к данной точке КЗ. Переход от расчетной схемы к схеме замещения сводится к замене расчетной схемы эквивалентной электрической цепью, включающей в себя источники э. д. с. и неизменные сопротивления, и к приведению параметров элементов и э. д. с. различных ступеней СЭС к базисным условиям (к одной ступени напряжения, выбранной за основную).

Таблица 2.3. Расчетные схемы и схемы замещения элементов СЭС

Наименование элемента	Схемы	
	расчетная	замещения
Генератор (синхронный конденсатор)		

Продолжение табл. 2.3

Наименование элемента	Схемы	
	расчетная	замещения
Эквивалентный источник системы		
Синхронный двигатель		
Асинхронный двигатель		
Обобщенная нагрузка		
Двухобмоточный трансформатор		
Трехобмоточный трансформатор		
Трехфазный трансформатор с обмоткой НН, расщепленной на две части		
Трехфазный автотрансформатор		
Группа однофазных автотрансформаторов с обмоткой НН, расщепленной на две части		

Продолжение табл. 2.3

Наименование элемента	Схемы	
	расчетная	замещения
Реактор		
Сдвоенный реактор		
ВЛ		
КЛ		

Схема замещения СЭС представляет собой совокупность схем замещения ее отдельных элементов, соединенных между собой в той же последовательности, что и на расчетной схеме (табл. 2.3). При этом трансформаторные связи в расчетной схеме заменяют электрическими — элементы с магнитосвязанными цепями вводят в схему замещения в виде соответствующих эквивалентных электрических сопротивлений. Целесообразно обозначать сопротивления в виде дроби: в числителе — арабскими цифрами порядковый номер элемента, в знаменателе — значение его сопротивления. На схеме замещения указывают все источники питания и точку КЗ.

Сопротивления элементов, э. д. с. источников питания, а также токи ветвей и напряжения в любых точках схемы замещения могут быть выражены в именованных или в относительных единицах. Под *относительным значением* какой-либо величины следует понимать ее отношение к другой одноименной величине, выбранной за единицу. Обычно относительные значения параметров элементов заданы при номинальных условиях. Пересчет э. д. с. источников питания и сопротивлений элементов из относительных единиц в именованные выполняют по формулам

$$E = E_{*ном} U_{ном}; \quad z = z_{*ном} U_{ном}^2 / S_{ном}. \quad (2.2)$$

Пользуются точным и приближенным приведениями э. д. с. и параметров элементов, заданных на различных ступенях напряжения СЭС. При *точном приведении* параметров используют действительные коэффициенты трансформации трансформаторов между ступенями напряжения расчетной схемы СЭС.

При расчете в именованных единицах осуществляют приведение к основной ступени напряжения, пользуясь выражениями

$$\left. \begin{aligned} \dot{E} &= K_1 K_2 \dots K_n E; \\ \dot{U} &= K_1 K_2 \dots K_n U; \\ \dot{I} &= I / (K_1 K_2 \dots K_n); \\ \dot{z} &= (K_1 K_2 \dots K_n)^2 z. \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

Здесь K_1, K_2, \dots, K_n — коэффициенты трансформации трансформаторов (автотрансформаторов), представляющие собой отношение напряжений холостого хода обмотки, обращенной к основной ступени напряжения, и обмотки, принадлежащей другой ступени, более близкой к ступени, элементы которой подлежат приведению; $\dot{E}, \dot{U}, \dot{I}, \dot{z}$ и E, U, I, z — соответственно приведенные и приводимые параметры.

При расчете в относительных единицах выполняют приведение параметров к базисным условиям на основной ступени напряжения: базисной мощности S_6 и базисному напряжению U_6 . Значение базисной мощности может приниматься любым (для упрощения вычислений рекомендуется принимать его соразмерным номинальной мощности источников питания или кратным 100 МВ·А, 1000 МВ·А). За базисное напряжение принимается среднее номинальное напряжение основной ступени (обычно в качестве основной ступени выбирается ступень напряжения, где произошло КЗ).

Для основной ступени напряжения рассчитывают базисный ток

$$I_6 = S_6 / (\sqrt{3} U_6). \quad (2.4)$$

Для других ступеней напряжения базисные условия пересчитывают по формулам

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_6 &= U_6 / (K_1 K_2 \dots K_n); \\ \dot{I}_6 &= (K_1 K_2 \dots K_n) I_6 \text{ или } \dot{I}_6 = S_6 / (\sqrt{3} \dot{U}_6). \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

Формулы (2.5) используют для вычисления относительных значений параметров схемы замещения не на основной ступени напряжения:

$$z_{*6} = z \sqrt{3} \dot{I}_6 / \dot{U}_6 = z S_6 / \dot{U}_6^2, \quad (2.6)$$

если сопротивление элемента задано в омах (ВЛ и КЛ, реакторы);

$$z_{*6} = z_{*ном} S_6 U_{ном}^2 / (S_{ном} \dot{U}_6^2), \quad (2.7)$$

если сопротивление элемента задано в относительных единицах при номинальных напряжении $U_{ном}$ и мощности $S_{ном}$ (генераторы, электродвигатели, трансформаторы);

$$z_{*6} = z_{*ном} \dot{I}_6 U_{ном} / (I_{ном} \dot{U}_6), \quad (2.8)$$

если сопротивление элемента задано в относительных единицах при номинальных напряжении $U_{ном}$ и токе $I_{ном}$ (реакторы);

$$E_{*6} = E / \dot{U}_6, \quad (2.9)$$

если э. д. с. источника питания задана в именованных единицах;

$$E_{*6} = E_{*ном} U_{ном} / \dot{U}_6, \quad (2.10)$$

если э. д. с. источника питания задана в относительных единицах при номинальном напряжении $U_{ном}$.

Из выражений (2.6) — (2.10) следует, что под пересчитанными базисными условиями в формулах приведения надо понимать базисные напряжения и ток той ступени напряжения, на которой заданы приводимые параметры.

Приближенное приведение параметров для составления схемы замещения СЭС используется в практических расчетах. Рекомендуется замена действительных напряжений холостого хода обмоток трансформаторов (автотрансформаторов), а также номинальных напряжений различных элементов (кроме реакторов) расчетной схемы, находящихся на одной ступени трансформации, средними номинальными напряжениями $U_{ср}$. Шкала этих напряжений, принятая исходя из номинальных напряжений сетей, следующая: 515; 340; 230; 158; 115; 37; 24; 20; 18; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15; 0,69; 0,4; 0,23; 0,127 кВ.

Коэффициент трансформации любого трансформатора (автотрансформатора) равен отношению $U_{ср}$ тех ступеней, которые он связывает, а результирующий коэффициент трансформации всех трансформаторов расчетной схемы определяется отношением средних номинальных напряжений крайних ступеней. Расчетные выражения при этом становятся проще.

Выражения (2.3), используемые для определения в именованных единицах параметров элементов, приведенных к основной ступени трансформации, где находится точка КЗ, упрощаются и принимают вид

$$\dot{E} = E U_6 / U_{ср}; \quad \dot{U} = U U_6 / U_{ср}, \quad (2.11)$$

где $U_{ср}$ — среднее номинальное напряжение ступени, с которой выполняется приведение; U_6 — то же основной ступени.

Если сопротивление элемента задано в относительных единицах, то

$$\dot{z} = z_{*ном} U_6^2 / S_{ном}. \quad (2.12)$$

Выполняя приближенное приведение параметров элементов схемы к базисным условиям и выражая их в относительных единицах, за базисное напряжение для любой ступени трансформации n рекомендуется принимать среднее номинальное напряжения этой ступени ($U_6 = U_{ср}$). Тогда базисный ток

$$I_6 = S_6 / (\sqrt{3} U_{ср}). \quad (2.13)$$

Расчетные выражения для определения приведенных к базисным условиям относительных значений параметров элементов схемы замещения, включенных на ступени с напряжением $U_{ср}$, имеют вид

$$z_{*б} = z \sqrt{3} I_б / U_{ср} = z S_б / U_{ср}^2, \quad (2.14)$$

если сопротивление элемента задано в омах;

$$z_{*б} = z_{*ном} S_б / S_{ном}, \quad (2.15)$$

если сопротивление элемента задано в относительных единицах (генераторы, электродвигатели и трансформаторы);

$$x_{*р.б} = x_{*р.ном} I_б / I_{р.ном} \quad (2.16)$$

(реакторы с номинальным напряжением $U_{р.ном}$, равным среднему номинальному напряжению сети);

$$x_{*р.б} = x_{*р.ном} I_б U_{р.ном} / (I_{р.ном} U_{ср}) \quad (2.17)$$

(реакторы, используемые в установках с напряжением ниже номинальных напряжений реакторов);

$$E_{*б} = E / U_{ср}, \quad (2.18)$$

если э. д. с. источника питания задана в именованных единицах;

$$E_{*б} = E_{*ном} U_б / U_{ср}, \quad (2.19)$$

если э. д. с. источника питания задана в относительных единицах.

Когда применяются трансформаторы или автотрансформаторы с широким диапазоном регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) или специальные регулирующие устройства, параметры схемы замещения СЭС рекомендуется приводить к базисным условиям по действительным коэффициентам трансформации.

Путем эквивалентных преобразований схема замещения СЭС приводится к простейшему виду для определения результирующего сопротивления короткозамкнутой цепи. С этой целью используются известные методы преобразования, применяемые при расчете линейных электрических цепей: последовательное и параллельное сложения сопротивлений; замена нескольких источников с разными э. д. с. и сопротивлениями, присоединенных к общей точке сети, одним эквивалентным источником; преобразование треугольника в эквивалентную звезду, звезды в эквивалентный треугольник и многолучевой звезды в полный многоугольник с диагоналями (табл. 2.4).

Таблица 2.4. Эквивалентные преобразования схем

Вид преобразования	Схемы		Эквивалентные соотношения
	исходная	эквивалентная	
Последовательное соединение			$z_{эк} = \sum_{k=1}^n z_k$

Продолжение табл. 2.4

Вид преобразования	Схемы		Эквивалентные соотношения
	исходная	эквивалентная	
Параллельное соединение Замена группы источников эквивалентным			$z_{эк} = 1 / \sum_{k=1}^n (1/z_k)$
			$\dot{E}_{эк} = z_{эк} \sum_{k=1}^n (\dot{E}_k / z_k)$ $z_{эк} = 1 / \sum_{k=1}^n (1/z_k)$
Замена треугольника звездой			$z_{123} = z_{12} + z_{31} + z_{23}$ $z_1 = z_{12} z_{31} / z_{123}$ $z_2 = z_{12} z_{23} / z_{123}$ $z_3 = z_{23} z_{31} / z_{123}$
			$z_{12} = z_1 + z_2 + z_1 z_2 / z_3$ $z_{23} = z_2 + z_3 + z_2 z_3 / z_1$ $z_{31} = z_3 + z_1 + z_3 z_1 / z_2$
Замена звезды треугольником			$z_{12} = z_1 + z_2 + z_1 z_2 / z_3$ $z_{23} = z_2 + z_3 + z_2 z_3 / z_1$ $z_{31} = z_3 + z_1 + z_3 z_1 / z_2$
			$z_{12} = z_1 + z_2 + z_1 z_2 / z_3$ $z_{23} = z_2 + z_3 + z_2 z_3 / z_1$ $z_{31} = z_3 + z_1 + z_3 z_1 / z_2$
Замена многолучевой звезды многоугольником с диагоналями			$z_{12} = z_1 z_2 Y_{1-n}$ $z_{23} = z_2 z_3 Y_{1-n}$ $z_{k(k-1)} = z_k z_{k-1} Y_{1-n}$ где $Y_{1-n} = \sum_{k=1}^n (1/z_k)$
			$\dot{E}_{12} = (\dot{E}_1 (z_2 + z_3) - (\dot{E}_2 + \dot{E}_3) z_1) / z_{123}$ $\dot{E}_{23} = (\dot{E}_2 (z_1 + z_3) - (\dot{E}_1 + \dot{E}_3) z_2) / z_{123}$ $\dot{E}_{31} = (\dot{E}_3 (z_1 + z_2) - (\dot{E}_1 - \dot{E}_2) z_3) / z_{123}$ где $z_{123} = z_1 + z_2 + z_3$. Сопротивления z_{12} , z_{23} , z_{31} определяются так, как и при замене звезды треугольником
Замена звезды с э. д. с. в лучах треугольником с э. д. с. в сторонах			

Используя коэффициенты токораспределения, сложную схему замещения СЭС с несколькими источниками (рис. 2.1, а) можно преобразовать в многолучевую схему замещения с генерирующими лучами и точкой КЗ в узле лучей (рис. 2.1, в). При преобразовании наряду с упрощением схемы замещения можно установить роль каждого источника в питании точки КЗ.

Выполняя преобразование в изложенной последовательности действий, руководствуются следующими правилами:

условно полагают ток в месте КЗ равным единице ($c_{\Sigma} = 1$); приравнивают коэффициенты токораспределения (они показывают относительную долю тока КЗ, протекающего по ветви) в генерирующих ветвях исходной схемы замещения (см. рис. 2.1, а) и в

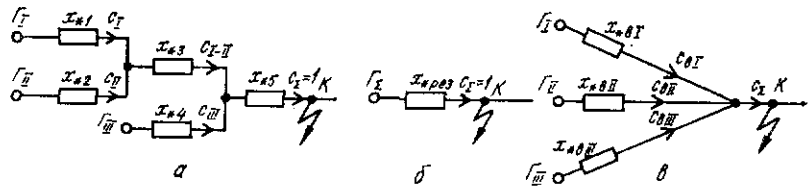


Рис. 2.1. Преобразование схемы замещения СЭС с помощью коэффициентов токораспределения

соответствующих лучах новой схемы замещения (см. рис. 2.1, в), т. е. $c_I = c_{BI}$; $c_{II} = c_{BII}$; $c_{III} = c_{BIII}$ (при этом для генерирующих ветвей обеих схем замещения выполняются тождества

$$c_I + c_{II} + c_{III} = c_{\Sigma}; \quad c_{BI} + c_{BII} + c_{BIII} = 1);$$

преобразование сопротивлений исходной схемы замещения к простейшему виду (рис. 2.1, б) выполняют объединением нулевых точек источников питания Γ_I , Γ_{II} и Γ_{III} , т. е.

$$x_{*рез} = x_{*5} + x_{*4} (x_{*3} + x_{*1} x_{*2} / (x_{*1} + x_{*2})) / (x_{*3} + x_{*4} + x_{*1} x_{*2} / (x_{*1} + x_{*2}));$$

считают, что коэффициенты токораспределения в параллельных ветвях обратно пропорциональны их сопротивлениям, т. е.

$$c_{III} / c_{\Sigma} = (x_{*3} x_{*4} / (x_{*3} + x_{*4})) / x_{*4};$$

$$c_{I-II} / c_{\Sigma} = (x_{*3} x_{*4} / (x_{*3} + x_{*4})) / x_{*4};$$

$$c_I / c_{I-II} = (x_{*1} x_{*2} / (x_{*1} + x_{*2})) / x_{*1};$$

значения коэффициентов токораспределения устанавливают, начиная от точки КЗ и заканчивая ветвями источников питания, по исходной схеме замещения, т. е.

$$c_{III} = c_{\Sigma} x_{*4} / (x_{*3} + x_{*4});$$

$$c_{I-II} = c_{\Sigma} x_{*3} / (x_{*3} + x_{*4});$$

$$c_I = c_{I-II} x_{*2} / (x_{*1} + x_{*2});$$

$$c_{II} = c_{I-II} - c_I;$$

по $x_{*рез}$ и c_{BI} , c_{BII} , c_{BIII} определяют сопротивления лучей новой схемы замещения

$$x_{*BI} = c_{\Sigma} x_{*рез} / c_{BI};$$

$$x_{*BII} = c_{\Sigma} x_{*рез} / c_{BII};$$

$$x_{*BIII} = c_{\Sigma} x_{*рез} / c_{BIII}.$$

Основной задачей расчета режима с КЗ является определение тока непосредственно в аварийной ветви или в точке КЗ. Поэтому схему замещения СЭС необходимо преобразовывать так, чтобы аварийная ветвь, по возможности, была сохранена до конца преобразования. С этой целью концы нагрузочных ветвей, э. д. с. которых считаются равными нулю, не следует соединять с точкой трехфазного КЗ, а лучше эти ветви объединять в эквивалентные с генерирующими ветвями.

Если трехфазное КЗ находится в узле с несколькими сходящимися в нем ветвями, то этот узел можно расчленить, сохранив на конце каждой образовавшейся ветви такое же КЗ. Далее полученную схему нетрудно преобразовать относительно любой из точек КЗ, учитывая другие ветви с КЗ как нагрузочные с э. д. с., равными нулю. Этот прием особенно эффективен, когда необходимо найти ток в одной из ветвей, присоединенных к узлу с КЗ.

При симметрии схемы замещения СЭС относительно точки КЗ или симметрии участка схемы относительно какой-либо промежуточной точки в ходе преобразования можно соединить точки, имеющие одинаковые потенциалы, и исключить из схемы сопротивления, по которым токи КЗ не протекают.

В ряде случаев преобразование схем замещения СЭС упрощается, если трехлучевую звезду заменить эквивалентным треугольником, затем разрезать его по вершине, где приложена э. д. с. Образовавшиеся параллельные ветви заменяют эквивалентными с такой же э. д. с. Объединение нескольких ветвей иногда полностью не производят и заканчивают двух-, трех- или многолучевой звездой.

Замена двух и более однотипных источников питания одним эквивалентным возможна, если источники питания находятся в практически одинаковых условиях по отношению к точке КЗ, что проверяется по условию

$$S_{Iном} x_{*резI} / (S_{IIном} x_{*резII}) = 0,4 \div 2,5.$$

Здесь $S_{Iном}$, $S_{IIном}$ — номинальные мощности источников питания; $x_{*резI}$, $x_{*резII}$ — результирующие сопротивления между соответствующим источником питания и точкой КЗ.

Для СЭС промышленных предприятий характерно совместное питание от энергетической системы и электростанции предприятия. Объединение этих источников питания при определении токов КЗ существенно упрощает расчеты. Однако при этом не учитывается индивидуальное изменение токов КЗ.

Если расчетное сопротивление каждой ветви между источником питания и точкой КЗ $x_{*расч} > 3$, то объединение источников питания допустимо. При наличии в схеме ветвей, содержащих источник

неизменной э. д. с. и источник с сопротивлением ветви $x_{расч} \leq 3$, объединять их в один эквивалентный источник не рекомендуется, так как при этом ухудшается точность определения тока КЗ. При упрощении схемы замещения СЭС можно пренебречь источником меньшей мощности, если

$$x_{*реал}/x_{*реал} \geq 20 \text{ и } S_{Iном}/S_{Iном} \leq 0,05, \quad (2.20)$$

где $S_{Iном}$ — мощность источника питания, меньшего по мощности; $x_{*реал}$ — сопротивление цепи между этим источником и точкой КЗ.

Сложные схемы замещения СЭС не обязательно упрощать аналитическим путем, их можно упростить с помощью расчетных моделей постоянного или переменного тока. Результирующее сопротивление между каждым источником и точкой КЗ здесь определяется непосредственным измерением для приведения схемы замещения к простейшему виду.

Полученные в ходе рассмотренных преобразований эквивалентные э. д. с. источников питания и результирующие сопротивления короткозамкнутой цепи являются исходными параметрами для определения токов и напряжений при КЗ.

Пример 2.1. Для электрической сети (рис. 2.2, а) составить схему замещения трехфазного КЗ в точке К и определить результирующее сопротивление короткозамкнутой цепи точным и приближенным методами, пользуясь именованными и относительными единицами.

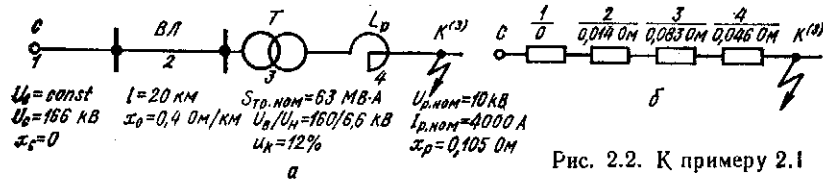


Рис. 2.2. К примеру 2.1

Решение. Схема замещения электрической сети показана на рис. 2.2, б. Расчет в именованных единицах с точным приведением параметров короткозамкнутой цепи к базисным условиям. За базисное принимаем напряжение ступени, где произошло КЗ, т. е. $U_0 = U_B$. Тогда

$$U_C = U_C U_H / U_B = 166 \cdot 6,6 / 160 = 6,85 \text{ кВ};$$

$$x_1 = 0;$$

$$x_2 = x_0 l U_H^2 / U_0^2 = 0,4 \cdot 20 \cdot 6,6^2 / 160^2 = 0,014 \text{ Ом};$$

$$x_3 = (u_k / 100) U_B^2 U_H^2 / (S_{тр.ном} U_B^2) = 12 \cdot 160^2 \cdot 6,6^2 / (100 \cdot 63 \cdot 160^2) = 0,083 \text{ Ом};$$

$$x_4 = x_p U_H^2 / U_{р.ном}^2 = 0,105 \cdot 6,6^2 / 10^2 = 0,046 \text{ Ом}.$$

Результирующее сопротивление цепи КЗ

$$x_{*рез} = 0 + 0,014 + 0,083 + 0,046 = 0,143 \text{ Ом}.$$

Расчет в именованных единицах с приближенным приведением параметров к базисным условиям. Для рассматриваемой схемы средние номинальные напряжения ступеней равны соответственно 158 и 6,3 кВ. При этом

$$U_C = U_C U_{срН} / U_{срВ} = 166 \cdot 6,3 / 158 = 6,62 \text{ кВ};$$

$$x_1 = 0;$$

$$x_2 = x_0 l U_{срН}^2 / U_{срВ}^2 = 0,4 \cdot 20 \cdot 6,3^2 / 158^2 = 0,013 \text{ Ом};$$

$$x_3 = (u_k / 100) U_{срВ}^2 U_{срН}^2 / (S_{тр.ном} U_{срВ}^2) = 12 \cdot 158^2 \cdot 6,3^2 / (100 \cdot 63 \cdot 158^2) = 0,076 \text{ Ом};$$

$$x_4 = x_p U_{срН}^2 / U_{срВ}^2 = 0,105 \cdot 6,3^2 / 10^2 = 0,042 \text{ Ом}.$$

Результирующее сопротивление цепи КЗ

$$x_{*рез} = 0 + 0,013 + 0,076 + 0,042 = 0,131 \text{ Ом}.$$

Расчет в относительных единицах с точным приведением параметров к базисным условиям. Принимаем за базисную мощность $S_0 = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ и приводим к ней параметры элементов короткозамкнутой цепи: на ступени напряжения, где произошло КЗ,

$$U_0 = 6,6 \text{ кВ};$$

$$I_{H0} = S_0 / (\sqrt{3} U_{H0}) = 100 / (\sqrt{3} \cdot 6,6) = 8,75 \text{ кА};$$

на ступени ВН

$$U_{В0} = U_{H0} U_{В} / U_{Н} = 6,6 \cdot 160 / 6,6 = 160 \text{ кВ};$$

$$I_{В0} = I_{H0} U_{Н} / U_{В} = 8,75 \cdot 6,6 / 160 = 0,361 \text{ кА}.$$

Относительное напряжение системы

$$U_{*0} = U_C / U_{В0} = 166 / 160 = 1,04.$$

Сопротивления, приведенные к базисным условиям,

$$x_{*1} = 0;$$

$$x_{*2} = x_0 l S_0 / U_{В0}^2 = 0,4 \cdot 20 \cdot 100 / 160^2 = 0,031;$$

$$x_{*3} = (u_k / 100) S_0 / S_{тр.ном} = 12 \cdot 100 / 100 \cdot 63 = 0,19;$$

$$x_{*4} = x_p S_0 U_{Н0}^2 / (100 U_{Н0}^2 I_{р.ном}^2) = 10,5 \cdot 100 \cdot 6,6^2 / (100 \cdot 6,6^2 \cdot 10^2) = 0,105.$$

Результирующее сопротивление цепи КЗ

$$x_{*рез} = 0 + 0,031 + 0,19 + 0,105 = 0,326.$$

Расчет в относительных единицах с приближенным приведением параметров к базисным условиям. Имеем

$$U_{*0} = U_C / U_{срВ} = 166 / 158 = 1,05;$$

$$x_{*1} = 0;$$

$$x_{*2} = x_0 l S_0 / U_{срВ}^2 = 0,4 \cdot 20 \cdot 100 / 158^2 = 0,032;$$

$$x_{*3} = (u_k / 100) S_0 / S_{тр.ном} = 12 \cdot 100 / (100 \cdot 63) = 0,19;$$

$$x_{*4} = x_p S_0 U_{срН}^2 / (100 U_{срН}^2 I_{р.ном}^2) = 10,5 \cdot 100 \cdot 6,3^2 / (100 \cdot 6,3^2 \cdot 10^2) = 0,105.$$

Результирующее сопротивление цепи КЗ

$$x_{*рез} = 0 + 0,032 + 0,19 + 0,105 = 0,327.$$

Использование приближенного приведения приводит к уменьшению результирующего сопротивления короткозамкнутой цепи, а следовательно, к завышению значений токов КЗ. Расчеты в относительных и именованных единицах практически совпадают (погрешность не более 0,1 %).

Пример 2.2. Для исходной схемы на рис. 2.3, а составить эквивалентную схему замещения при трехфазном КЗ в точке К и выполнить ее преобразование. **Решение.** Схема замещения, соответствующая заданной расчетной схеме, изображена на рис. 2.3, б.

Преобразование схемы целесообразно начать с последовательного сложения сопротивлений 1 и 5, 2 и 8, 4 и 12, параллельного сложения сопротивлений 13, 14 и последовательного сложения полученного сопротивления с сопротивлением 15. Затем следует источники с э. д. с. E_1 и E_C , E_4 и E_H заменить соответствующими эквивалентными источниками (на рис. 2.3, в им соответствуют участки с

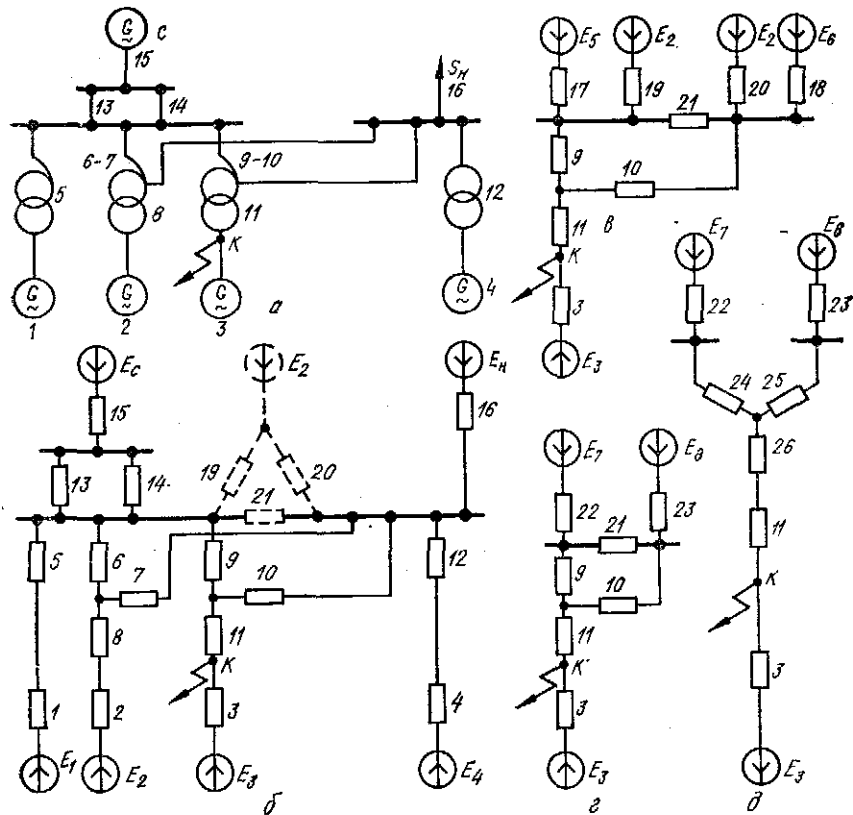


Рис. 2.3. К примеру 2.2

э. д. с. E_5 и E_6). Звезду, которую образуют сопротивления 6 и 7, а также сопротивление, полученное в результате сложения сопротивлений 2 и 8, необходимо заменить эквивалентным треугольником (на рис. 2.3, б треугольник с сопротивлениями 19—21).

Полученный треугольник следует разрезать в точке, где приложена э. д. с. E_3 . В результате получается два источника с одинаковыми э. д. с. E_2 , подключенными соответственно через сопротивления 19 и 20 (рис. 2.3, в).

Источники, присоединенные к одним шинам, нужно заменить эквивалентными (на рис. 2.3, г им соответствуют участки с э. д. с. E_7 и E_8), а треугольник с сопротивлением 9, 10 и 21 преобразовать в эквивалентную звезду.

Завершающие этапы сводятся к последовательному сложению сопротивлений и к замене источников, присоединенных в одной точке, эквивалентным источником питания.

2.6. Приведение параметров элементов короткозамкнутой цепи к базисным условиям

Параметры элементов короткозамкнутой цепи приводятся к базисным условиям на основании выражений (2.6) — (2.19). В практических расчетах сопротивления элементов короткозамкнутой цепи в относительных единицах, приведенные к базисным условиям, определяют по нижеприведенным формулам (расчетные схемы и схемы замещения элементов указаны в табл. 2.3).

При включении синхронных генераторов, компенсаторов и электродвигателей на ступень напряжения n с базисным напряжением $U_{бп} = U_{ном}$ или $U_{бп} = U_{ср}$

$$x_{*б} = x_{*д}'' S_6 / S_{ном}; \quad (2.21)$$

на ступень напряжения n с $U_{бп} \neq U_{ном}$

$$x_{*б} = x_{*д}'' S_6 U_{ном}^2 / (S_{ном} U_{бп}^2), \quad (2.22)$$

где $x_{*д}''$ — продольная составляющая сопротивления в начальный момент КЗ.

Для синхронных двигателей $x_{*ном} = x_{*д}'' \approx 1 / I_{*пуск}$, где $I_{*пуск} = I_{пуск} / I_{ном}$ — кратность пускового тока при пуске от полного напряжения. Для асинхронных двигателей $x_{*ном} = x_{*д}'' = 1 / I_{*пуск}$ и в формулы (2.21), (2.22) вместо $x_{*д}''$ следует подставлять $x_{*д}$.

При включении трехфазных двухобмоточных трансформаторов на ступень напряжения n с базисным напряжением $U_{бп} = U_{ном}$ или $U_{бп} = U_{ср}$

$$x_{*б} = (u_k / 100) S_6 / S_{ном} \quad (2.23)$$

на ступень напряжения n с $U_{бп} \neq U_{ном}$

$$x_{*б} = (u_k / 100) S_6 U_{ном}^2 / (S_{ном} U_{бп}^2), \quad (2.24)$$

где

$$u_k / 100 = u_{*тр.ном} \approx x_{*тр.ном}''$$

В случае трехфазных трехобмоточных трансформаторов (автотрансформаторов)

$$\left. \begin{aligned} x_{*вб} &= 0,5 (u_{кв-н} + u_{кв-с} - u_{кс-н}) S_6 / (100 S_{ном}); \\ x_{*сб} &= 0,5 (u_{кв-с} + u_{кс-н} - u_{кв-н}) S_6 / (100 S_{ном}); \\ x_{*нб} &= 0,5 (u_{кв-н} + u_{кс-н} - u_{кв-с}) S_6 / (100 S_{ном}). \end{aligned} \right\} \quad (2.25)$$

При включении трехфазных двухобмоточных трансформаторов с расщепленной обмоткой НН и при отдельной работе обмоток НН1, НН2

$$\left. \begin{aligned} x_{*вб} &= u_{кв-н1(н2)} (1 - k_{расщ} / 4) S_6 / (100 S_{ном}); \\ x_{*н1б} &= x_{*н2б} = u_{кв-н1(н2)} k_{расщ} S_6 / (200 S_{ном}), \end{aligned} \right\} \quad (2.26)$$

где $k_{расщ}$ — коэффициент расщепления ($k_{расщ} = x_{расщ}/x_{кв-н1(н2)}$);
 $x_{н1} = x_{н2} = x_{расщ}/2$. По данным испытаний $k_{расщ} = 3,5$. При этом

$$\left. \begin{aligned} x_{вб} &= 0,125 u_{кв-н1(н2)} S_6 / (100 S_{ном}); \\ x_{н1б} &= x_{н2б} = 1,75 u_{кв-н1(н2)} S_6 / (100 S_{ном}). \end{aligned} \right\} \quad (2.27)$$

В случае параллельной работы обмоток $НН1$ и $НН2$ трансформатор имеет сквозное индуктивное сопротивление

$$x_{скв,б} = (u_{кв-н1(н2)} / 100) S_6 / S_{ном}. \quad (2.28)$$

Сопротивление трансформаторов с РПН вычисляется в зависимости от регулируемого напряжения $U_{вл}$ на данном ответвлении n и напряжения КЗ $u_{кл}$, соответствующего этому напряжению, по формуле

$$x_{трлб} = (u_{кл} / 100) S_6 U_{вл}^2 / (S_{тр,ном} U_{бл}^2). \quad (2.29)$$

Входящие в (2.29) напряжение КЗ и соответствующее ему напряжение ответвления определяются для трех положений регулятора РПН: среднего и двух крайних. ГОСТ 12965—74 устанавливает расчетные значения этих напряжений, отнесенные к номинальной мощности трансформатора и напряжениям соответствующих ответвлений. Для трансформатора с расщепленной обмоткой НН значение $u_{кл}$ отнесено к значению мощности $S_{н1(н2)} = 0,5 S_{тр,ном}$. Для трехобмоточного трансформатора сопротивления трехлучевой схемы замещения подсчитываются по (2.29) после определения по заданным значениям $u_{кв-сл}$, $u_{кв-нл}$, $u_{кв-нл}$ напряжений КЗ обмоток $u_{квл}$, $u_{ксл}$ и $u_{кнл}$ в среднем и крайних положениях регулятора РПН.

При включении однофазных двухобмоточных трансформаторов с расщепленной обмоткой НН

$$\left. \begin{aligned} x_{вб} &= 0; \\ x_{н1б} &= x_{н2б} = 2 (u_{кв-н1(н2)} / 100) S_6 / S_{ном}, \end{aligned} \right\} \quad (2.30)$$

а однофазных автотрансформаторов с такой же обмоткой

$$\left. \begin{aligned} x_{вб} &= 0,5 (u_{кв-н} + u_{кв-с} - u_{кв-н}) S_6 / (100 S_{ном}); \\ x_{сб} &= 0,5 (u_{кв-с} + u_{кв-н} - u_{кв-н}) S_6 / (100 S_{ном}); \\ x_{н1б} &= x_{н2б} = 2 x_{скв} S_6 / S_{ном}; \\ x_{нб} &= (x_{н} - x_{скв}) S_6 / S_{ном}, \end{aligned} \right\} \quad (2.31)$$

где

$$\begin{aligned} x_{скв} &= (u_{кв-н} / 100) \parallel (u_{кв-с} / 100); \\ x_{н} &= 0,5 (u_{кв-н} + u_{кв-с} - u_{кв-с}) / 100. \end{aligned}$$

Приведенное сопротивление одноцепного реактора

$$x_{б} = x_{ном} I_6 U_{р,ном} / (100 I_{р,ном} U_6), \quad (2.32)$$

а сдвоенного

$$\left. \begin{aligned} x_{3б} &= -k_{св} x_{ном} I_6 U_{р,ном} / (100 I_{р,ном} U_6); \\ x_{1б} &= x_{2б} = (1 + k_{св}) x_{ном} I_6 U_{р,ном} / (100 I_{р,ном} U_6). \end{aligned} \right\} \quad (2.33)$$

Приведенные сопротивления ВЛ и КЛ

$$r_{б} = r_1 l S_6 / U_{ср}^2; \quad x_{б} = x_1 l S_6 / U_{ср}^2, \quad (2.34)$$

где l — длина линии, км.

Приведенное сопротивление питающей ЭЭС

$$x''_{с.б} = I_6 / I_{откл,ном}, \quad (2.35)$$

или

$$x''_{с.б} = S_6 / S''_к,$$

где $S''_к$ — заданная мощность КЗ на шинах понижающей подстанции в точке, где СЭС связана с ЭЭС; $I_{откл,ном}$ — номинальный ток отключения выключателей, установленных или намечаемых к установке в узловой точке системы.

Контрольные вопросы

1. Каковы причины появления электромагнитных переходных процессов в СЭС и их возможные последствия?
2. Каковы основные виды КЗ и вероятности их возникновения в элементах СЭС в сетях различного напряжения?
3. Что понимается под терминами «короткое замыкание», «простое замыкание»? Каковы обозначения видов замыканий в зависимости от режима нейтрали сети?
4. Какие условия и основные допущения принимаются при расчетах КЗ?
5. Как выбираются и пересчитываются базисные условия для различных ступеней напряжения СЭС?
6. Зависит ли результат расчета токов КЗ от выбора базисных условий?
7. На чем основаны точное и приближенное приведения сопротивлений элементов короткозамкнутой цепи (генераторов, трансформаторов, ЛЭП и реакторов) в схемах замещения?
8. Каковы цели расчета КЗ? Какова последовательность преобразования схем замещения при расчетах?
9. Что понимается под электрической удаленностью точки КЗ от источника питания?

Темы рефератов

1. Виды, причины и последствия электромагнитных переходных процессов в СЭС.
2. Оценка погрешности в расчете тока КЗ по точному и приближенному приведениям параметров элементов схемы замещения короткозамкнутой цепи.

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ ПРИ ТРЕХФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

3.1. Переходный процесс в синхронной машине без демпферных обмоток

Возникновение КЗ на зажимах синхронной машины или вблизи расположенных точек сети приводит к появлению в машине переходного процесса, обусловленного изменением результирующего магнитного потока в ее воздушном зазоре. Во время переходного процесса изменяются э. д. с. и ток короткозамкнутой цепи от их номинальных значений, которые они имели перед КЗ, до новых значений, соответствующих установившемуся режиму КЗ.

При нормальной работе синхронной машины без демпферных обмоток полный поток ее обмотки возбуждения Φ_f при холостом ходе состоит из полезного потока Φ_{fad} и потока рассеяния $\Phi_{\sigma f}$ (рис. 3.1, а). В свою очередь, полезный поток Φ_{fad} равен геометрической разности продольного потока в воздушном зазоре $\Phi_{\sigma d}$ и потока продольной реакции статора Φ_{ad} . Результирующий магнитный поток $\Phi_{рез}$, сцепленный с обмоткой возбуждения, равен сумме потоков $\Phi_{\sigma d}$ и $\Phi_{\sigma f}$.

Рис. 3.1. Диаграммы магнитных потоков синхронной машины при нормальном режиме (а) и внезапном КЗ на ее зажимах (б)

При внезапном КЗ на зажимах синхронной машины происходит увеличение магнитного потока реакции статора на $\Delta\Phi_{ad}$ из-за изменения тока в обмотке статора. Ввиду малого активного сопротивления обмотки статора этот поток направлен против основного потока возбуждения Φ_f и стремится изменить его в сторону уменьшения. Однако баланс магнитных потоков в начальный момент не изменится (рис. 3.1, б), так как согласно закону Ленца изменение потока на $\Delta\Phi_{ad}$ вызывает ответный поток реакции обмотки возбуждения $\Delta\Phi_f$, компенсирующий поток $\Delta\Phi_{ad}$. В результате сумма приращений потокосцеплений

$$\Delta\Psi_{ad} + \Delta\Psi_f = 0, \quad (3.1)$$

или

$$\Delta I_d x_{ad} + \Delta I_f (x_{\sigma f} + x_{ad}) = 0, \quad (3.2)$$

где ΔI_d и ΔI_f — соответственно приращения токов статора и ротора, которые отличаются между собой на величину, обусловленную рассеянием обмотки возбуждения.

Поток рассеяния в ненасыщенной машине $\Phi_{\sigma f}$ характеризуется коэффициентом рассеяния обмотки возбуждения

$$\sigma_f = \Phi_{\sigma f} / \Phi_f = x_{\sigma f} / (x_{\sigma f} + x_{ad}) = x_{\sigma f} / x_f. \quad (3.3)$$

Увеличение потока Φ_f до Φ'_f приводит к пропорциональному увеличению потока $\Phi_{\sigma f}$ до $\Phi'_{\sigma f}$ и соответствующему уменьшению потока $\Phi_{\sigma d}$ до $\Phi'_{\sigma d}$. При этом результирующий поток $\Phi_{рез}$, сцепленный с обмоткой возбуждения, остается неизменным и равным $\Phi_{рез}$.

Неизменность результирующего потока, сцепленного с обмоткой возбуждения, позволяет характеризовать машину в начальный момент переходного процесса результирующим потокосцеплением этой обмотки $\Psi_{рез}$. Если рассматривать $\Psi_{рез}$ как потокосцепление на холостом ходу машины, то часть этого потокосцепления, связанная со статором,

$$\Psi'_d = (1 - \sigma_f) \Psi_{рез}. \quad (3.4)$$

Этому потокосцеплению соответствует э. д. с. статора E'_q , которая в начальный момент переходного процесса остается такой же, как и до его появления (до КЗ).

Потокосцепление (3.4) можно выразить через соответствующие токи и сопротивления, записав

$$\Psi'_d = (1 - \sigma_f) (x_f + x_{ad}) = (x_{ad} / (x_{\sigma f} + x_{ad})) \times \\ \times \dot{I}_f (x_{\sigma f} + x_{ad}) + \dot{I}_d x_{ad} + \dot{I}_d (x_{ad}^2 / (x_{\sigma f} + x_{ad})).$$

Потокосцепление Ψ'_d соответствует э. д. с. в статоре

$$\begin{aligned} \dot{E}'_q &= \dot{E}_q - j I_d (x_{ad}^2 / (x_{\sigma f} + x_{ad})) = \\ &= \dot{U}_q + j I_d (x_d - x_{ad}^2 / (x_{\sigma f} + x_{ad})) = \dot{U}_q + j I_d x'_d. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Э. д. с. \dot{E}'_q называют *поперечной переходной э. д. с.*, а сопротивление

$$x'_d = x_d - x_{ad}^2 / (x_{\sigma f} + x_{ad}) = x_d - x_{ad}^2 / x_f \quad (3.6)$$

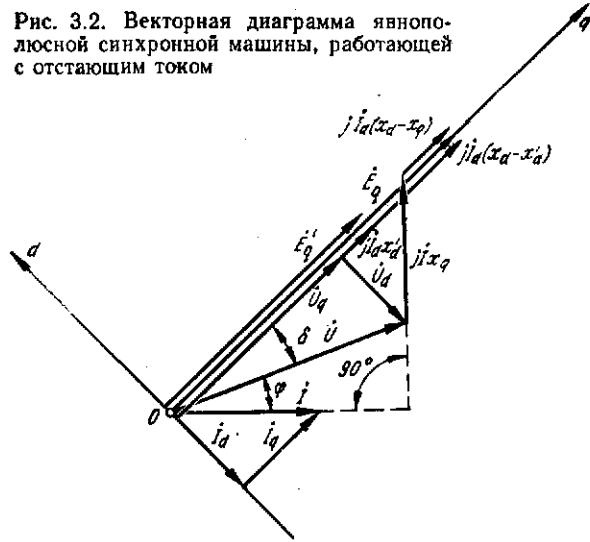
— *продольным переходным индуктивным сопротивлением.*

Значение \dot{E}'_q можно определить по формуле (3.5), если подставить в нее значения \dot{U}_q и \dot{I}_d , с которыми машина работала до появления переходного процесса.

Векторная диаграмма явнополюсной синхронной машины, работающей с отстающим током, показана на рис. 3.2. По направле-

нию э. д. с. \dot{E}'_q совпадает с э. д. с. \dot{E}_q , а по значению меньше ее на $\dot{I}_d(x_d - x'_d)$. Поскольку э. д. с. \dot{E}'_q остается неизменной в начальный момент КЗ, эта э. д. с. совместно с x'_d позволяет оценить внезапный переход от одного режима работы машины к другому.

Рис. 3.2. Векторная диаграмма явнополюсной синхронной машины, работающей с отстающим током



Переходные э. д. с. и индуктивное сопротивление машины без демпферных обмоток могут быть получены также из ее схемы замещения (рис. 3.3, а), которая аналогична схеме замещения двухобмоточного трансформатора (рис. 3.3, б).

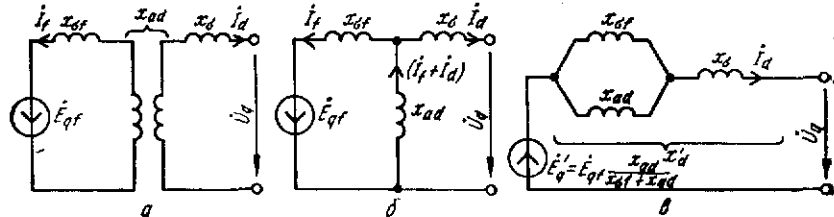


Рис. 3.3. К рассмотрению переходного процесса в синхронной машине без демпферных обмоток

Заменив ветви с $x_{\sigma f}$ и x_{ad} одной эквивалентной ветвью, можно получить схему замещения машины с параметрами \dot{E}'_q и x'_d (рис. 3.3, в). При этом

$$\dot{E}'_q = \dot{E}_{qf} x_{ad} / (x_{\sigma f} + x_{ad}) = \dot{E}_{qf} x_{ad} / x_f, \quad (3.7)$$

$$x'_d = x_\sigma + x_{\sigma f} x_{ad} / (x_{\sigma f} + x_{ad}). \quad (3.8)$$

Если в поперечной оси ротора замкнутых контуров нет, то $E'_q = 0$, $x'_q = x_q$ и периодическая составляющая тока в начальный мо-

мент переходного процесса, называемая *начальным переходным током*, определяется выражением

$$\dot{I}'_d = \dot{E}'_q / (x_d + x_{вн}), \quad (3.9)$$

где $x_{вн}$ — внешнее индуктивное сопротивление цепи статора.

3.2. Переходный процесс в синхронной машине с демпферными обмотками

В синхронной машине с демпферными обмотками значения э. д. с. и индуктивного сопротивления в начальный момент переходного процесса зависят от параметров этих обмоток.

На рис. 3.4 изображена принципиальная схема синхронной машины, имеющей на роторе, кроме обмотки возбуждения, по одной демпферной обмотке в его продольной и поперечной осях. Обмотка статора и обе обмотки ротора в его продольной оси связаны между собой общим потоком взаимноиндукции Φ_{ad} , которому соответствует реактивное сопротивление продольной реакции x_{ad} .

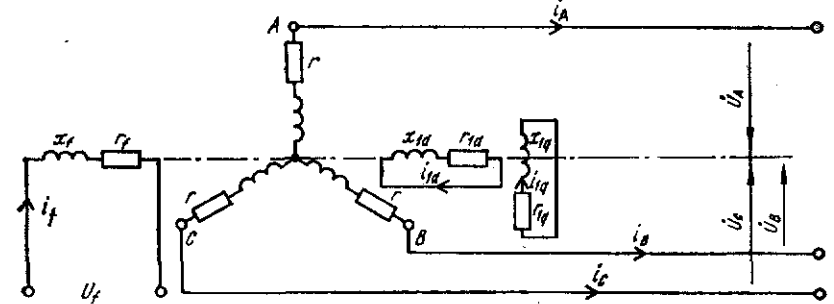


Рис. 3.4. Принципиальная схема синхронной машины с демпферными обмотками в продольной и поперечной осях ротора

Внезапное приращение потока $\Delta\Phi_{ad}$ в такой машине вызывает реакцию ротора — приращения потока обмотки возбуждения $\Delta\Phi_f$ и потока продольной демпферной обмотки $\Delta\Phi_{1d}$. При этом баланс результирующих потокоцеплений должен сохраниться неизменным и соответствовать равенствам:

для обмотки возбуждения

$$\Delta \dot{I}_f (x_{\sigma f} + x_{ad}) + \Delta \dot{I}_{1d} x_{ad} + \Delta \dot{I}_d x_{ad} = 0; \quad (3.10)$$

для продольной демпферной обмотки

$$\Delta \dot{I}_{1d} (x_{\sigma 1d} + x_{ad}) + \Delta \dot{I}_f x_{ad} + \Delta \dot{I}_d x_{ad} = 0, \quad (3.11)$$

где $\Delta \dot{I}_{1d}$ и $x_{\sigma 1d}$ — начальный ток, наведенный в продольной демпферной обмотке, и ее реактивное сопротивление.

Из уравнений (3.10) и (3.11) следует, что

$$\Delta \dot{I}_f x_{\sigma f} = \Delta \dot{I}_{1d} x_{\sigma 1d}, \quad (3.12)$$

т. е. чем меньше рассеяние обмотки, тем больше наведенный в ней ток и тем соответственно больше роль этой обмотки в создании ответной реакции ротора.

Если совместную реакцию обмотки возбуждения и демпферной обмотки в начальный момент переходного процесса заменить такой же реакцией от суммарного тока $\Delta \dot{I}_{rd} = \Delta \dot{I}_f + \Delta \dot{I}_{1d}$ в одной эквивалентной обмотке продольной оси ротора с реактивным сопротивлением рассеяния $x_{\sigma rd}$, то

$$\Delta \dot{I}_{rd} (x_{\sigma rd} + x_{ad}) = (\Delta \dot{I}_f + \Delta \dot{I}_{1d}) (x_{\sigma rd} + x_{ad}) = -\Delta \dot{I}_a x_{ad}. \quad (3.13)$$

С учетом (3.12), (3.10) и (3.13) можно найти эквивалентное реактивное сопротивление рассеяния

$$x_{\sigma rd} = x_{\sigma f} x_{\sigma 1d} / (x_{\sigma f} + x_{\sigma 1d}), \quad (3.14)$$

которое определяется как сопротивление двух параллельных ветвей с $x_{\sigma f}$ и $x_{\sigma 1d}$. При этом реактивное сопротивление машины в продольной оси ротора, называемое *продольным сверхпереходным реактивным сопротивлением*,

$$x''_d = x_d - x_{ad}^2 / (x_{\sigma rd} + x_{ad}) = x_{\sigma} + x_{\sigma rd} x_{ad} / (x_{\sigma rd} + x_{ad}) = x_{\sigma} + x_{ad} \parallel x_{\sigma f} \parallel x_{\sigma 1d}. \quad (3.15)$$

В поперечной оси ротора, где расположена только одна демпферная обмотка, *поперечное сверхпереходное реактивное сопротивление*

$$x''_q = x_q - x_{ad}^2 / x_{1q} = x_{\sigma} + x_{\sigma 1q} / (x_{\sigma 1q} + x_{ad}). \quad (3.16)$$

Э. д. с. за сопротивлениями x''_d и x''_q в начальный момент переходного процесса сохраняют свои значения неизменными и называются *сверхпереходными э. д. с.* \dot{E}''_d и \dot{E}''_q . Значения этих э. д. с. находят по формулам

$$\dot{E}''_d = \dot{U}_d + j I_q x''_q, \quad (3.17)$$

$$\dot{E}''_q = \dot{U}_q + j I_d x''_d, \quad (3.18)$$

где \dot{U}_d , \dot{U}_q , I_d , I_q — составляющие напряжения и тока до нарушения нормального режима работы машины.

Таким образом, синхронную машину с демпферными обмотками в начальный момент переходного процесса характеризуют сверхпереходные сопротивления x''_d , x''_q и сверхпереходные э. д. с. \dot{E}''_d , \dot{E}''_q . Приставкой «сверх» в названиях «сверхпереходные» подчеркивают влияние на переходный процесс демпферных обмоток машины.

Векторная диаграмма явнополюсной синхронной машины с демпферными обмотками в продольной и поперечной осях ротора при работе ее с отстающим током показана на рис. 3.5.

Принципиальную схему трех магнитосвязанных обмоток в продольной оси ротора (рис. 3.6, а) можно представить эквивалентной схемой замещения, аналогичной схеме замещения трехобмоточного трансформатора (рис. 3.6, б), в которой э. д. с. \dot{E}_{qf} и \dot{E}_{q1d} соответствуют результирующим потокоцеплениям обмотки возбуждения

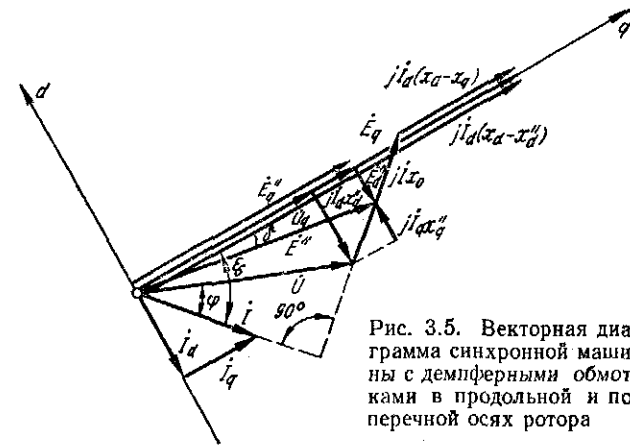


Рис. 3.5. Векторная диаграмма синхронной машины с демпферными обмотками в продольной и поперечной осях ротора

и продольной демпферной обмотки. Упрощенная схема замещения машины с параметрами \dot{E}''_q и x''_d изображена на рис. 3.6, в.

В поперечной оси ротора с параметрами \dot{E}''_d и x''_q схема замещения машины имеет такой же вид, как и для двухобмоточного трансформатора (см. рис. 3.3).

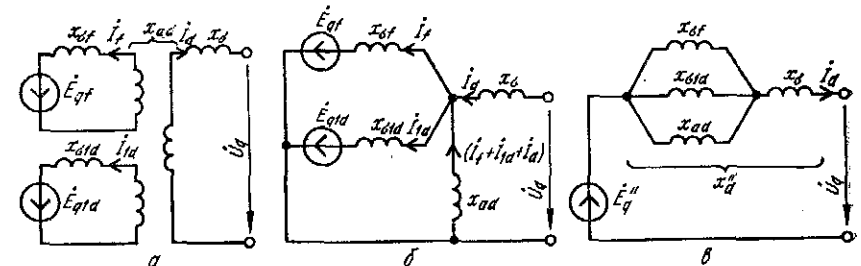


Рис. 3.6. К рассмотрению переходного процесса в синхронной машине с демпферными обмотками

При чисто индуктивной цепи статора продольная и поперечная составляющие сверхпереходного тока, соответствующего начальному моменту переходного процесса, определяются выражениями

$$I''_d = E''_q / (x''_d + x_{вн}); \quad (3.19)$$

$$I''_q = E''_d / (x''_q + x_{вн}). \quad (3.20)$$

Полный сверхпереходный ток

$$I'' = \sqrt{(I''_d)^2 + (I''_q)^2}. \quad (3.21)$$

Угол между полными сверхпереходными значениями тока I'' и э. д. с. E'' в общем случае не равен 90° , так как даже в чисто индуктивной цепи $x_q'' \neq x_d''$.

3.3. Уравнения переходного процесса

Переходный процесс в электрических машинах при некоторых допущениях может быть описан системой дифференциальных уравнений. Исходными допущениями являются условия, упрощающие уравнения:

- отсутствие насыщения магнитной системы машины;
- в воздушном зазоре машины действуют только основные гармоники намагничивающей силы и индукции, в результате чего наведенные в статоре э. д. с. являются синусоидами основной частоты; в магнитной системе машины отсутствуют какие-либо потери;
- фазные обмотки статора полностью симметричны, а ротор симметричен относительно своих продольной и поперечной осей;
- все демпферные обмотки в продольной и поперечной осях ротора заменяются соответственно эквивалентными продольной и поперечной демпферными обмотками;
- ротор машины в течение переходного процесса вращается с постоянной синхронной скоростью.

Для синхронной машины, имеющей обмотку возбуждения и по одну демпферной обмотке в продольной и поперечной осях ротора (см. рис. 3.4), систему дифференциальных уравнений в фазных координатах можно записать в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} u_A &= -d\psi_A/dt - r i_A; \\ u_B &= -d\psi_B/dt - r i_B; \\ u_C &= -d\psi_C/dt - r i_C; \\ u_f &= d\psi_f/dt + r_f i_f; \\ 0 &= d\psi_{1d}/dt + r_{1d} i_{1d}; \\ 0 &= d\psi_{1q}/dt + r_{1q} i_{1q}. \end{aligned} \right\} (3.22)$$

С учетом принятых допущений входящие в эту систему потоко-сцепления обмоток имеют линейную зависимость от тока данного контура и токов магнитосвязанных с ним других контуров:

$$\left. \begin{aligned} \psi_A &= L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + M_{Af} i_f + M_{A1d} i_{1d} + M_{A1q} i_{1q}; \\ \psi_B &= M_{BA} i_A + L_B i_B + M_{BC} i_C + M_{Bf} i_f + M_{B1d} i_{1d} + M_{B1q} i_{1q}; \\ \psi_C &= M_{CA} i_A + M_{CB} i_B + L_C i_C + M_{Cf} i_f + M_{C1d} i_{1d} + M_{C1q} i_{1q}; \\ \psi_f &= M_{fA} i_A + M_{fB} i_B + M_{fC} i_C + L_f i_f + M_{f1d} i_{1d} + M_{f1q} i_{1q}; \\ \psi_{1d} &= M_{1dA} i_A + M_{1dB} i_B + M_{1dC} i_C + M_{1df} i_f + L_{1d} i_{1d} + M_{1dq} i_{1q}; \\ \psi_{1q} &= M_{1qA} i_A + M_{1qB} i_B + M_{1qC} i_C + M_{1qf} i_f + M_{1qd} i_{1d} + L_{1q} i_{1q}. \end{aligned} \right\} (3.23)$$

С учетом принципа взаимосвязи коэффициентов взаимной индукции ($M_{AB} = M_{BA}$; $M_{Bf} = M_{fB}$ и т. д.) число коэффициентов M в системе уравнений (3.23) сокращается вдвое. В матричной форме эта

система уравнений имеет вид

$$\begin{pmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \\ \psi_f \\ \psi_{1d} \\ \psi_{1q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_A M_{AB} M_{AC} M_{Af} M_{A1d} M_{A1q} \\ M_{BA} L_B M_{BC} M_{Bf} M_{B1d} M_{B1q} \\ M_{CA} M_{CB} L_C M_{Cf} M_{C1d} M_{C1q} \\ M_{fA} M_{fB} M_{fC} L_f M_{f1d} M_{f1q} \\ M_{1dA} M_{1dB} M_{1dC} M_{1df} L_{1d} M_{1dq} \\ M_{1qA} M_{1qB} M_{1qC} M_{1qf} M_{1qd} L_{1q} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_f \\ i_{1d} \\ i_{1q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_A M_{AB} M_{AC} M_{Af} M_{A1d} M_{A1q} \\ M_{BA} L_B M_{BC} M_{Bf} M_{B1d} M_{B1q} \\ M_{AC} M_{BC} L_C M_{Cf} M_{C1d} M_{C1q} \\ M_{Af} M_{Bf} M_{Cf} \begin{bmatrix} L_f \\ M_{f1d} \end{bmatrix} 0 \\ M_{A1d} M_{B1d} M_{C1d} \begin{bmatrix} M_{f1d} \\ L_{1d} \end{bmatrix} 0 \\ M_{A1q} M_{B1q} M_{C1q} 0 0 L_{1q} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_f \\ i_{1d} \\ i_{1q} \end{pmatrix}. \quad (3.24)$$

Коэффициенты взаимной индукции между обмотками, магнитные оси которых сдвинуты на 90° , равны нулю, поскольку магнитная связь между ними отсутствует. Коэффициенты индукции и взаимной индукции, заключенные в прямоугольники, ввиду симметрии статора относительно ротора от пространственного положения ротора не зависят. Все остальные коэффициенты L и M в (3.24) зависят от положения ротора.

Если (3.24) подставить в (3.22), то получится система уравнений с переменными коэффициентами, решение которой вызывает затруднения даже с использованием ЭВМ.

Изменение L и M обусловлено непрерывным изменением сопротивления магнитным потокам в воздушном зазоре машины и приближенно может быть выражено синусоидальной функцией.

Обозначив через A , B и C направления магнитных осей фазных обмоток статора, через d и q — положительные направления продольной и поперечной осей ротора, через γ — угол между магнитной осью фазы A и продольной осью ротора d , через ω — угловую скорость ротора (рис. 3.7), коэффициенты взаимной индукции можно выразить известными зависимостями:

между обмоткой возбуждения и обмоткой фазы A

$$M_{Af} = M_{fA} = M_d \cos \gamma;$$

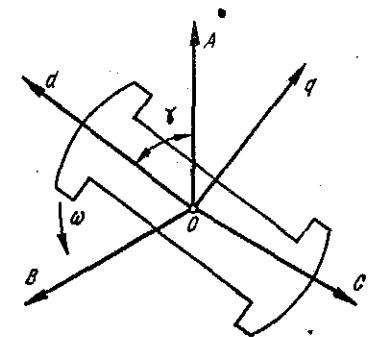


Рис. 3.7. Взаимное положение магнитных осей фазных обмоток A , B , C и осей ротора d , q

между демпферной обмоткой в продольной оси ротора и обмоткой фазы A

$$M_{1dA} = M_{A1d} = M_d \cos \gamma;$$

между демпферной обмоткой в поперечной оси ротора и обмоткой фазы A

$$M_{1qA} = M_{A1q} = M_q \cos(\gamma - \pi/2) = M_q \sin \gamma.$$

В приведенных выражениях M_d и M_q — коэффициенты взаимной индукции при совпадении соответственно осей d и q с магнитной осью фазы A .

Коэффициенты взаимной индукции между обмоткой возбуждения и обмотками фаз B и C соответственно определяются выражениями

$$M_{1B} = M_d \cos(\gamma - 2\pi/3);$$

$$M_{1C} = M_d \cos(\gamma - 4\pi/3) = M_d \cos(\gamma + 2\pi/3).$$

Индуктивности фазных обмоток и взаимной индуктивности между ними имеют постоянную составляющую, а также переменную составляющую двойной частоты и в практических расчетах определяются по формулам

$$L_A = l_0 + l_2 \cos 2\gamma;$$

$$M_{AB} = m_0 + m_2 \cos 2(\gamma - \pi/3);$$

$$L_B = l_0 + l_2 \cos 2(\pi/3 - \gamma) = l_0 + l_2 \cos 2(\gamma + \pi/3);$$

$$L_C = l_0 + l_2 \cos 2(4\pi/3 - \gamma) = l_0 + l_2 \cos 2(\gamma - \pi/3);$$

$$M_{AC} = m_0 + m_2 \cos(\gamma + \pi/3);$$

$$M_{BC} = m_0 + m_2 \cos 2\gamma,$$

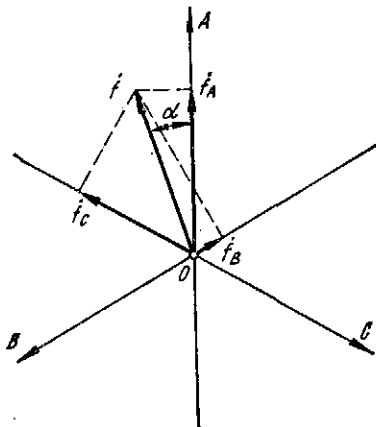


Рис. 3.8. Обобщенный вектор \vec{f} и его проекции на магнитные оси обмоток A , B и C

где постоянные l и m могут быть найдены по паспортным данным машины:

$$\left. \begin{aligned} l_0 &= (L_d + L_q - L_0)/3; \\ l_2 &= m_2 = (L_d + L_q)/3; \\ m_0 &= (L_0 - (L_q - L_d)/2)/3. \end{aligned} \right\} (3.25)$$

Для упрощения системы дифференциальных уравнений (3.23) мгновенные значения фазных величин ψ , i , u , e целесообразно рассматривать как проекции обобщенного вектора \vec{f} на неподвижные оси времени, совпадающие с магнитными осями обмоток фаз A , B и C (рис. 3.8). Обобщенным вектором можно характеризовать любые фазные величины f_A , f_B и f_C ,

изменяющиеся во времени по произвольному закону, если соблюдается условие

$$f_A + f_B + f_C = 0. \quad (3.26)$$

В общем случае конец вектора \vec{f} описывает сложную кривую с переменной скоростью относительно точки вращения.

Использование обобщенного вектора трехфазной системы позволяет в дифференциальных уравнениях переходного процесса синхронной машины (3.24) освободиться от переменных коэффициентов.

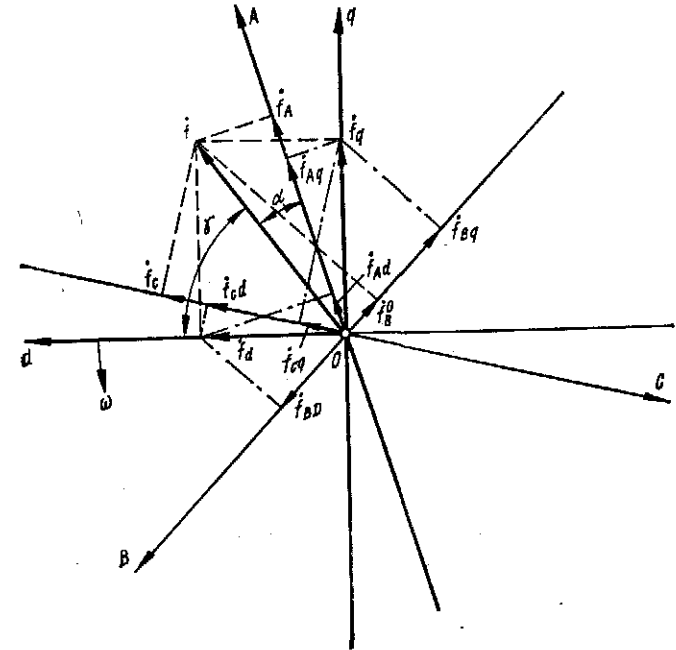


Рис. 3.9. Представление обобщенного вектора \vec{f} в трехосной (A , B , C) и двухосной (d , q) системах координат

Для этого Р. Х. Парк и независимо от него А. А. Горев предложили обобщенный вектор \vec{f} представить в двухосной системе координат, жестко связанной с ротором машины и совмещенной соответственно с продольной и поперечной осями ротора d , q (рис. 3.9).

Если сумма фазных переменных f_A , f_B и f_C не равна нулю, то кроме f_d и f_q необходимо ввести еще одну переменную f_0 , связанную с f_A , f_B и f_C зависимостью

$$f_A + f_B + f_C = 3f_0, \quad (3.27)$$

которую по аналогии с (3.26) можно записать в следующем виде:

$$(f_A - f_0) + (f_B - f_0) + (f_C - f_0) = 0.$$

Поскольку переменная составляющая f_0 во всех трех фазах одинакова, ее называют *нулевой составляющей* мгновенных фазных значений рассматриваемого параметра f .

С учетом f_0 три переменные f_A, f_B и f_C в координатах A, B, C можно однозначно заменить тремя другими переменными f_d, f_q и f_0 в координатах d, q и 0 , которые связаны между собой системой уравнений

$$\begin{vmatrix} f_A \\ f_B \\ f_C \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 1 \\ \cos(\gamma - 2\pi/3) & \sin(\gamma - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\gamma + 2\pi/3) & \sin(\gamma + 2\pi/3) & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{vmatrix}, \quad (3.28)$$

где $\gamma = \omega t + \gamma_0$ (см. рис. 3.9).

Из (3.28) следует, что обратный переход от f_A, f_B и f_C к f_d, f_q и f_0 осуществляется на основании системы уравнений

$$\begin{vmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{vmatrix} = \frac{2}{3} \begin{vmatrix} \cos \gamma & \cos(\gamma - 2\pi/3) & \cos(\gamma + 2\pi/3) \\ \sin \gamma & \sin(\gamma - 2\pi/3) & \sin(\gamma + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} f_A \\ f_B \\ f_C \end{vmatrix}. \quad (3.29)$$

Переход от системы координат A, B, C к системе координат $d, q, 0$ соответствует замене трехфазной машины эквивалентной двухфазной. Пространственное положение магнитных осей обеих обмоток такой машины определяется углом $\gamma = \omega t + \gamma_0$ (см. рис. 3.9).

Так как фазные обмотки, расположенные на осях d и q , неподвижны относительно ротора, то все индуктивности двухфазной машины постоянны. Следовательно, переход от переменных в координатах A, B, C к переменным в координатах $d, q, 0$ позволяет преобразовать уравнения (3.22) в соответствующие уравнения с постоянными коэффициентами.

Для получения уравнений синхронной машины в осях $d, q, 0$ рассмотрим обобщенный вектор потокосцепления $\Psi = \Psi \exp(j\alpha)$, образующий с магнитной осью фазы A угол α (рис. 3.10).

Поскольку модуль Ψ и угол α являются функциями времени, э. д. с.

$$\begin{aligned} E &= -d(\Psi e^{j\alpha})/dt = \\ &= -(d\Psi/dt) e^{-j\alpha} - j\Psi e^{j\alpha} (d\alpha/dt) = \dot{E}_{тр} + \dot{E}_{вр}. \end{aligned} \quad (3.30)$$

Из (3.30) следует, что результирующая э. д. с. машины состоит из двух составляющих — трансформаторной э. д. с. $\dot{E}_{тр}$ и э. д. с. вращения $\dot{E}_{вр}$.

Если перейти к осям d и q , совместив их с осями комплексной плоскости, то потокосцепление

$$\begin{aligned} \Psi &= \Psi_q + \Psi_d = \Psi_q e^{j(\gamma - \pi/2)} + \Psi_d e^{j(\gamma - \pi/2 + \pi/2)} = \\ &= (\Psi_q + j\Psi_d) e^{j(\gamma - \pi/2)}. \end{aligned} \quad (3.31)$$

При этом э. д. с.

$$\begin{aligned} E &= -(d\Psi_q/dt + jd\Psi_d/dt) e^{j(\gamma - \pi/2)} - \\ &- j(\Psi_q + j\Psi_d) e^{j(\gamma - \pi/2)} d\gamma/dt = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= (\Psi_d d\gamma/dt - d\Psi_q/dt) e^{j(\gamma - \pi/2)} - j(\Psi_q d\gamma/dt + d\Psi_d/dt) e^{j(\gamma - \pi/2)} = \\ &= \dot{E}_q + \dot{E}_d = \dot{E}_{врq} + \dot{E}_{трq} + \dot{E}_{врd} + \dot{E}_{трd}. \end{aligned} \quad (3.32)$$

Следовательно, результирующая э. д. с. состоит из э. д. с. вращения и трансформаторной э. д. с. в обеих осях d и q .

Перейдя от переменных значений токов, напряжений и потокосцеплений в координатах A, B, C к переменным соответствующих

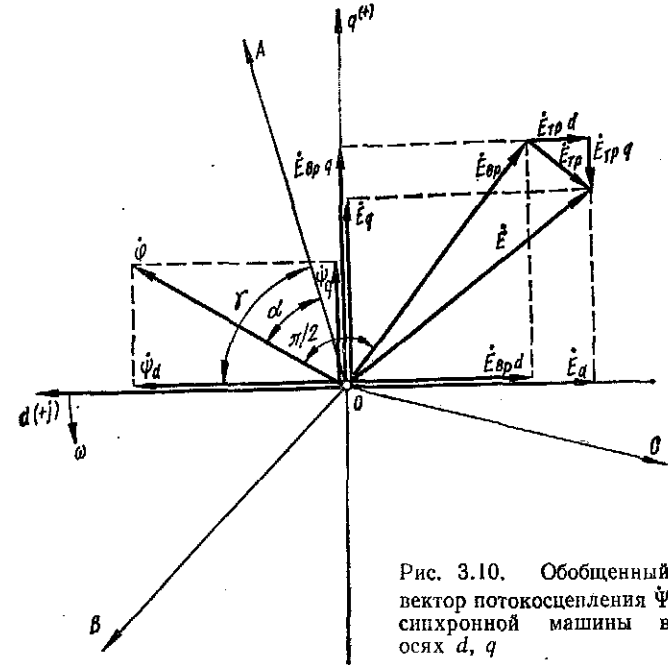


Рис. 3.10. Обобщенный вектор потокосцепления Ψ синхронной машины в осях d, q

параметров в координатах $d, q, 0$ в соответствии с (3.28) и подставив их в исходные уравнения (3.22), можно получить систему уравнений Парка — Горева:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= -d\psi_d/dt - \psi_d d\gamma/dt - r_i i_d; \\ u_q &= -d\psi_q/dt - \psi_q d\gamma/dt - r_i i_q; \\ u_0 &= -d\psi_0/dt - r_i i_0; \\ u_f &= d\psi_f/dt + r_f i_f; \\ 0 &= d\psi_{1d}/dt + r_{1d} i_{1d}; \\ 0 &= d\psi_{1q}/dt + r_{1q} i_{1q}, \end{aligned} \right\} \quad (3.33)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= x_d i_d + x_{ad} i_f + x_{ad} i_{1d}; \\ \psi_q &= x_q i_q + x_{aq} i_{1q}; \\ \psi_f &= x_{af} i_d + x_f i_f + x_{af} i_{1d}; \\ \psi_{1d} &= x_{ad} i_d + x_{ad} i_f + x_{1d} i_{1d}; \\ \psi_{1q} &= x_{aq} i_q + x_{1q} i_{1q}. \end{aligned} \right\} \quad (3.34)$$

Для полного описания электромагнитного переходного процесса в электрической машине необходимо учесть также уравнение

$$M_r - M_s = T_j d\omega/dt, \quad (3.35)$$

где $M_s = 3(\Psi_q I_d - \Psi_d I_q)$ — электромагнитный момент, приложенный к ротору машины.

Решение и анализ системы уравнений (3.33), (3.34) с учетом изменения угла γ , характеризующего движение ротора машины, дают возможность установить характер одновременного протекания электромагнитного и электромеханического переходных процессов и их взаимного влияния в электрической системе и ее отдельных элементах.

В системе уравнений Парка — Горева (3.33), (3.34) учтены все основные составляющие электромагнитного переходного процесса в электрической машине и эти уравнения правильно отражают ток внезапного КЗ.

3.4. Особенности расчетов переходных процессов в электродвигателях

Наиболее точное и одинаково приемлемое описание переходных процессов как в синхронных, так и в асинхронных двигателях дает система уравнений Парка — Горева. Однако при этом нужно учесть некоторые факторы, которые несущественны при расчетах переходных процессов в генераторах.

Режимы генераторов всегда ограничены малыми скольжениями, а скольжение синхронных двигателей может изменяться от нуля до единицы. При больших скольжениях значительно проявляется эффект вытеснения тока в демпферных контурах ротора. Этот эффект может быть учтен несколькими демпферными контурами по каждой оси, что, однако, приводит к увеличению числа уравнений (3.33) и (3.34), а также числа слагаемых в уравнениях для потоко-сцеплений. Приближенно эффект вытеснения тока можно учесть, сохранив по одному демпферному контуру в каждой оси машины, если ввести зависимости r_{1d} и r_{1q} от скольжения. Эти зависимости аналогичны зависимостям $r_2(s)$, характерным для асинхронных двигателей.

В систему уравнений (3.34) входят значения синхронных сопротивлений статора x_d и x_q , обмотки возбуждения x_f и демпферных обмоток x_{1d} , x_{1q} . Эти сопротивления состоят из сопротивлений взаимной индукции по соответствующей оси x_{ad} , x_{aq} и сопротивлений рассеяния x_σ :

$$x_d = x_{ad} + x_\sigma; \quad x_q = x_{aq} + x_\sigma; \quad x_f = x_{ad} + x_{\sigma f};$$

$$x_{1d} = x_{ad} + x_{\sigma 1d}; \quad x_{1q} = x_{aq} + x_{\sigma 1q}.$$

Синхронные (x_d , x_q), переходные (x'_d) и сверхпереходные (x''_d , x''_q) сопротивления указываются в паспорте двигателей. Сопротивление рассеяния статора явнополюсных двигателей $x_\sigma \approx (0,6 \div 0,7) x'_d$.

В систему уравнений Парка — Горева для синхронных двигателей входят следующие величины:

$$x_{ad} = x_d - x_\sigma; \quad x_{aq} = x_q - x_\sigma;$$

$$x_{\sigma f} = x_{ad}(x'_d - x_\sigma)/(x_d - x'_d);$$

$$x_{1d\sigma} = (x'_d - x_\sigma)(x''_d - x_\sigma)/(x'_d - x''_d);$$

$$x_{1q\sigma} = x_{aq}(x''_q - x_\sigma)/(x_q - x''_q).$$

Активное сопротивление статора определяется выражением

$$r = 2x''_d x''_q / (T_a (x''_d + x''_q)),$$

где T_a — постоянная времени затухания аperiodических токов статора.

Активное сопротивление любого роторного контура при разомкнутых остальных контурах определяется через соответствующую постоянную времени, связанную с ним следующими соотношениями:

$$T_{f0} = x_f/r_f; \quad T_{1d0} = x_{1d}/r_{1d}; \quad T_{1q0} = x_{1q}/r_{1q}.$$

Переходный процесс в синхронных двигателях протекает так же, как и в синхронных генераторах. Однако в начальный момент переходного процесса двигатели имеют другие значения сверхпереходных э. д. с. У перевозбужденного синхронного двигателя сверхпереходная э. д. с. выше подведенного напряжения. При этом любое резкое снижение напряжения приводит к увеличению реактивного тока, генерируемого двигателем. В случае невозбуждения синхронного двигателя его э. д. с. ниже подведенного напряжения и реактивный ток потребляется из сети. При равенстве э. д. с. и напряжения реактивный ток в начальный момент переходного процесса отсутствует.

Асинхронные двигатели в начальный момент переходного процесса можно рассматривать как невозбужденные синхронные двигатели, поскольку в нормальном режиме они работают с малым скольжением (2—5 %). Для асинхронных двигателей систему уравнений Парка — Горева используют в тех случаях, когда необходимо учесть электромагнитные переходные процессы. Полная симметрия ротора асинхронной машины и отсутствие возбуждения позволяют упростить уравнения и представить их в более удобной системе координат. При этом часть уравнений из (3.33) и (3.34) исключается, а сопротивления $x_d = x_q$, $x_{ad} = x_{aq}$, $x_{1d} = x_{1q}$.

Однако существенная зависимость параметров ротора от частоты токов в двигателе, модель которого содержит по одному контуру ротора в каждой оси с постоянными параметрами $x_{1d} = x_{1q}$ и $r_{1d} = r_{1q}$, приводит к значительным погрешностям расчета переходных процессов при больших изменениях скольжения. Для более точного описания электромагнитных переходных процессов в асинхронных машинах необходимо представить ротор несколькими контурами в каждой оси.

Сверхпереходное индуктивное сопротивление x_q'' асинхронного двигателя можно найти из схемы замещения двигателя. Оно представляет собой индуктивное сопротивление КЗ при заторможенном двигателе, когда $s = 100\%$. Ввиду полной симметрии ротора x_q'' одинаково по осям d и q .

Практически относительное значение этого сопротивления определяют по пусковому току двигателя:

$$x_{*q}'' = 1/I_{*пуск} \quad (3.36)$$

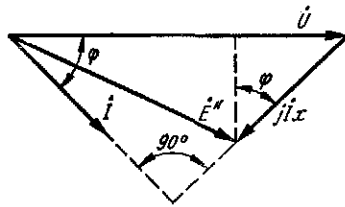


Рис. 3.11. Векторная диаграмма асинхронного двигателя

Сверхпереходную э. д. с. асинхронного двигателя находят из его векторной диаграммы для предшествующего режима (рис. 3.11):

$$E_q'' = \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + (U \sin \varphi - I x_q'')^2} \quad (3.37)$$

где U , I , φ — соответственно предшествующие значения напряжения, тока и угла сдвига фаз между ними.

Приближенно E_q'' можно найти как проекцию вектора этой э. д. с. на вектор U , т. е.

$$E_q'' \approx U - I x_q'' \sin \varphi \quad (3.38)$$

В начальный момент переходного процесса при КЗ существенную роль играют только мощные двигатели. Двигатели небольшой мощности и другие электроприемники учитывают в виде обобщенной нагрузки типового состава потребителей промышленного района с типовой схемой внешнего электроснабжения, которая подключается к крупным узлам СЭС.

Обобщенная нагрузка в начальный момент КЗ приближенно характеризуется параметрами $E_n'' = 0,85$ и $x_{*n}'' = 0,35$, выраженными в относительных единицах при номинальной мощности нагрузки и среднем номинальном напряжении той ступени, к которой она присоединена.

Влияние нагрузки в начальный момент переходного процесса зависит от значения остаточного напряжения в месте ее присоединения и удаленности от точки КЗ. При $E_n'' > U$ нагрузка является дополнительным источником КЗ, и чем ближе она расположена к точке КЗ, тем сильнее сказывается ее роль в питании места повреждения. Поэтому в практических расчетах сверхпереходного тока в точке КЗ и ближайших к ней ветвях учитывают только те нагрузки и отдельные двигатели, которые непосредственно связаны с точкой КЗ или расположены на небольшой электрической удаленности от нее.

Контрольные вопросы

1. Какой вид имеет принципиальная схема машины с демпферными обмотками и без них?

2. Как протекает переходный процесс при КЗ на зажимах синхронной машины без демпферных обмоток?
3. Какие значения э. д. с. и индуктивного сопротивления синхронной машины называются переходными?
4. Какие особенности переходного процесса при КЗ на зажимах синхронной машины с демпферными обмотками?
5. Как определяются сверхпереходные э. д. с. и сопротивления синхронной машины?
6. Какой вид имеют векторные диаграммы синхронной машины с демпферными обмотками и без них?
7. Как описать переходный процесс синхронной машины системой дифференциальных уравнений в фазных координатах?
8. Как можно преобразовать систему дифференциальных уравнений переходного процесса в фазных координатах в систему уравнений Парка — Горева?
9. Как описывается переходный процесс в асинхронных двигателях с помощью системы уравнений Парка — Горева?
10. Что представляют собой сверхпереходные э. д. с. и сопротивления асинхронных двигателей и обобщенных нагрузок?

Темы рефератов

1. Влияние демпферных обмоток синхронных машин на протекание переходного процесса в них.
2. Система уравнений Парка — Горева и ее применение для описания переходных процессов в электрических машинах.
3. Особенности расчетов переходных процессов в электродвигателях.

Глава 4

ТОКИ ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

4.1. Короткое замыкание на зажимах генератора без автоматического регулирования возбуждения

Внезапное КЗ на зажимах генератора приводит к возникновению в нем переходного процесса, обусловленного уменьшением сопротивления короткозамкнутой цепи по сравнению с ее сопротивлением в нормальном режиме.

Переход электрической цепи из одного состояния в другое сопровождается появлением апериодического (свободного) тока, который накладывается на периодический (принужденный) ток, генерируемый источниками питания. Изменения полного тока и его составляющих на зажимах одной из фаз трехфазного генератора без АВР при КЗ показаны на рис. 4.1.

До начала КЗ (точка O) генератор работал в нормальном режиме, при котором в цепи нагрузки протекал ток i_n , отстающий по фазе от э. д. с. e на угол φ . В момент времени, когда ток нагрузки имел значение i_{n0} , произошло КЗ, под влиянием которого наступил переходный процесс, сопровождающийся увеличением тока.

Ток нагрузки $i_{н0}$ и периодическую составляющую тока КЗ для начального момента времени можно определить по формулам

$$\left. \begin{aligned} i_{н0} &= (U_{\max}/Z_n) \sin(\alpha - \varphi_n); \\ i_{п0} &= (U_{\max}/Z_k) \sin(\alpha - \varphi_k), \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

где U_{\max} — максимальное напряжение на зажимах генератора в момент КЗ; Z_n и Z_k — сопротивления цепи при нормальной нагрузке и КЗ; φ_n и φ_k — фазы тока в тех же режимах; α — начальная фаза КЗ (фаза включения на КЗ).

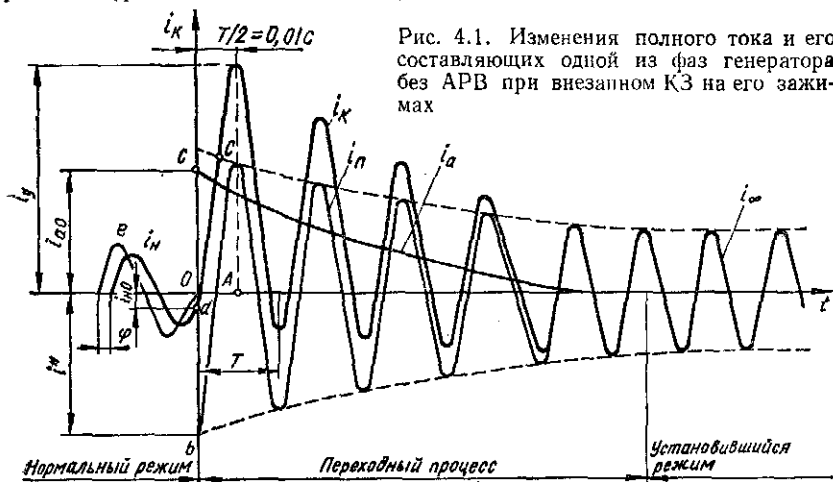


Рис. 4.1. Изменения полного тока и его составляющих одной из фаз генератора без АРВ при внезапном КЗ на его зажимах

Поскольку

$$i_{н0} = i_{п0} + i_{a0},$$

аперiodическая составляющая

$$i_{a0} = i_{н0} - i_{п0}.$$

При КЗ на зажимах генератора и вблизи расположенных от него точках сети преобладающее значение имеет индуктивное сопротивление цепи, поэтому ее активным сопротивлением можно пренебречь. При этом угол φ_k близок к 90° и всегда больше φ_n .

Начальные значения аперiodических составляющих зависят от фазы включения цепи на КЗ. Максимальное значение аперiodической составляющей тока КЗ в начальный момент i_{a0} зависит как от фазы включения, так и от предшествующего тока нагрузки $i_{н0}$ поврежденной цепи.

При $\varphi_k \approx 90^\circ$ максимум аперiodической составляющей тока КЗ наблюдается при нулевой фазе включения на КЗ и отсутствии предшествующего тока в цепи (рис. 4.2). В этом случае значение i_{a0} оказывается равным амплитуде периодической составляющей, если в момент КЗ эта составляющая имеет максимум, т. е.

$$i_{a0} = i_{п0} = I_{п \max} = \sqrt{2}I'' \quad (4.2)$$

Полный ток КЗ во время переходного процесса состоит из периодической и аперiodической составляющих. Мгновенное значение полного тока КЗ в любой момент времени t

$$i_{kt} = i_{nt} + i_{at} \quad (4.3)$$

Периодическая составляющая тока КЗ, если напряжение источника в течение переходного процесса не изменяется, остается неизменной по амплитуде и определяется выражением

$$i_{nt} = (U_{\max}/Z_k) \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) \quad (4.4)$$

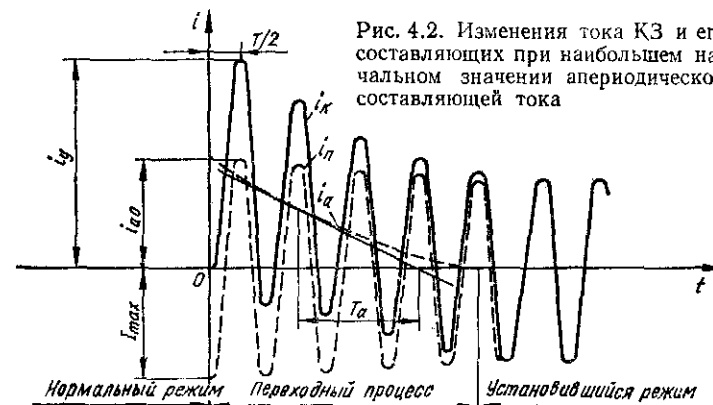


Рис. 4.2. Изменения тока КЗ и его составляющих при наибольшем начальном значении аперiodической составляющей тока

Поскольку генератор является источником конечной мощности и в соответствии с принятым условием работает без АРВ, напряжение на его зажимах, а следовательно, и периодическая составляющая тока КЗ с течением времени уменьшаются. Объясняется это тем, что по мере затухания свободных токов, наведенных в начальный момент КЗ в обмотке возбуждения, демпферных обмотках и в массиве ротора, поток реакции статора при неизменном токе возбуждения ослабляет результирующий магнитный поток в воздушном зазоре генератора (см. гл. 3). Последнее обстоятельство приводит к уменьшению э. д. с., наводимой в статоре, падению напряжения на зажимах генератора и изменению периодической составляющей тока КЗ.

На рис. 4.1 периодическая составляющая тока КЗ i_n в течение переходного процесса изображена в виде синусоиды с убывающей амплитудой. Заметим при этом, что длительность переходного процесса превышает время затухания аперiodической составляющей тока КЗ. Кроме того, начальный ток КЗ больше установившегося значения тока ($I'' > I_\infty$).

Аперiodическая составляющая тока КЗ в любой момент времени t определяется, исходя из затухания ее по экспоненциальному закону:

$$i_{at} = i_{a0} \exp(-t/T_a) = i_{a0}\gamma, \quad (4.5)$$

где $\gamma = \exp(-t/T_a) = i_{at}/i_{a0}$ — коэффициент затухания аперiodической составляющей; $T_a = x/(\omega r)$ — постоянная времени ее

затухания; r и x — активное и индуктивное сопротивления короткозамкнутой цепи.

При частоте тока $f = 50$ Гц $\omega = 2\pi f = 314$ с⁻¹, а $T_a = x/(314 r)$ с. Для малых r среднее значение $T_a = 0,05$ с, а время затухания апериодической составляющей тока при КЗ на зажимах генератора составляет 0,1—0,2 с.

На рис. 4.3 показано возможное изменение периодических и апериодических составляющих токов разных фаз при трехфазном КЗ. Из рисунка следует, что апериодические составляющие токов

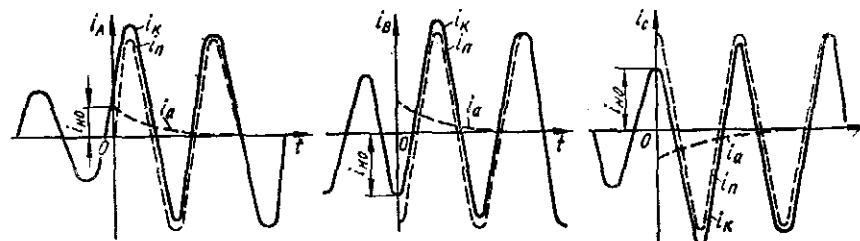


Рис. 4.3. Изменения периодических и апериодических составляющих токов разных фаз при трехфазном КЗ

КЗ в фазах А, В, С разные по значению. Из-за апериодической составляющей полный ток КЗ изменяется по закону, отличному от синусоидального:

$$i_{кз} = i_{пт} + i_{а0} \exp(-t/T_a). \quad (4.6)$$

Наибольшее мгновенное значение полного тока КЗ называют *ударным током*. Он возникает при первом наибольшем значении апериодической составляющей, совпадающей по знаку с периодической составляющей тока КЗ. Этот момент наступает примерно через полпериода после появления КЗ ($t = 0,01$ с). При этом условии ударный ток

$$i_y = i_{п0} + i_{а0} \exp(-0,01/T_a). \quad (4.7)$$

С учетом (4.2) ударный ток

$$\begin{aligned} i_y &= I_{п\max} + I_{п\max} \exp(-0,01/T_a) = \\ &= I_{п\max} (1 + \exp(-0,01/T_a)) = k_y \sqrt{2} I'', \end{aligned} \quad (4.8)$$

где $T_a = x_k/(\omega r_k)$; k_y — ударный коэффициент, характеризующий превышение ударного тока над амплитудой периодической составляющей тока КЗ. Его значение

$$k_y = 1 + \exp(-0,01/T_a) = i_y/(\sqrt{2} I''). \quad (4.9)$$

Ударный коэффициент зависит от постоянной времени затухания апериодической составляющей $T_a = x_k/(314 r_k)$. При $x_k/r_k \rightarrow 0$ $k_y \rightarrow 1$, а при $x_k/r_k \rightarrow \infty$ $k_y \rightarrow 2$, т. е. значения ударного коэффициента изменяются в пределах

$$1 < k_y < 2. \quad (4.10)$$

Зависимость ударного коэффициента от отношения x_k/r_k (постоянной времени T_a) изображена на рис. 4.4. За интервал времени $3T_a$ апериодическая составляющая тока КЗ практически затухает (составляет примерно 5 % ее начального значения).

Действующее значение полного тока КЗ в произвольный момент времени t переходного процесса определяют как среднее квадратическое значение тока за период T , в середине которого находится рассматриваемый момент, поскольку в течение всего переходного процесса полный ток представляет собой несинусоидальную кривую. При этом считают, что за рассматриваемый период амплитуда периодической составляющей и апериодическая составляющая неизменны и равны их среднему значению в данный момент времени t .

Наибольшее действующее значение полного тока КЗ I_y приходится на первый период переходного процесса. Оно определяется в предположении, что апериодическая составляющая в течение этого периода равна ее мгновенному значению в середине периода, т. е. через 0,01 с после возникновения КЗ, а периодическая составляющая — своему начальному значению

$$I_y = \sqrt{i_{п0}^2 + (i_{а0} \exp(-0,01/T_a))^2}. \quad (4.11)$$

Считая, что $i_{а0} = I_{п\max} = \sqrt{2} I''$, получаем

$$I_y = \sqrt{(I'')^2 + (\sqrt{2} I'' \exp(-0,01/T_a))^2}.$$

Так как согласно (4.9)

$$\exp(-0,01/T_a) = k_y - 1,$$

то действующее значение полного тока КЗ

$$I_y = I'' \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2}. \quad (4.12)$$

При изменении ударного коэффициента в пределах $1 < k_y < 2$ отношение I_y/I'' не выходит за пределы

$$1 < I_y/I'' < \sqrt{3},$$

а отношение i_y/I_y имеет максимальное значение $\sqrt{3}$ при $k_y = 1,5$.

Ввиду быстрого затухания апериодической составляющей полный ток КЗ для времени $t \geq 0,15$ с после начала переходного процесса можно считать практически равным периодической составляющей, которая представляет собой установившийся ток КЗ. Мгновенное и действующее значения установившегося тока КЗ обозначаются соответственно i_∞ и I_∞ .

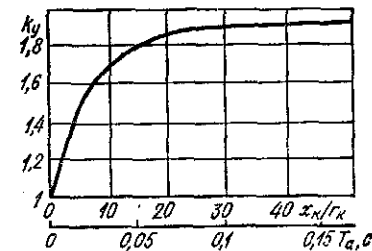


Рис. 4.4. Зависимость ударного коэффициента от отношения x_k/r_k и постоянной времени короткозамкнутой цепи

4.2. Короткое замыкание на зажимах генератора с автоматическим регулированием возбуждения

Назначение АРВ состоит в поддержании на зажимах генератора номинального напряжения при всех возможных режимах работы генератора. В случае понижения напряжения, обусловленного КЗ, АРВ увеличивает ток возбуждения генератора, а следовательно, и напряжение на различных элементах сети.

В начальный момент КЗ ввиду инерции магнитных потоков, сцепленных с обмотками генератора, АРВ на переходный процесс практически не влияет. В дальнейшем действие АРВ сказывается на увеличении тока возбуждения и связанных с ним составляющих

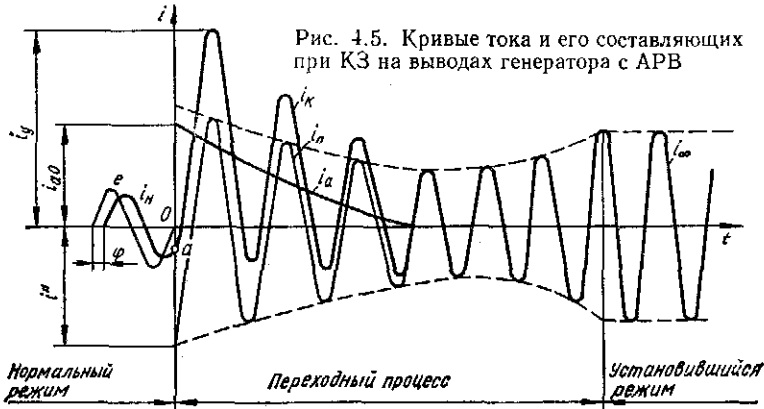


Рис. 4.5. Кривые тока и его составляющих при КЗ на выводах генератора с АРВ

токов статора и демпферных обмоток. Однако этот процесс протекает сравнительно медленно, так что изменяются в основном только э. д. с. генератора и обусловленная ею периодическая составляющая тока статора.

Повышение напряжения генератора благодаря АРВ начинается не в момент возникновения КЗ, а через некоторое время, которое необходимо для срабатывания АРВ. Этот временной интервал определяется временем понижения напряжения до значения, при котором вступает в действие АРВ, и собственным временем срабатывания АРВ. Поэтому ток КЗ до вступления в действие АРВ уменьшается так же, как и при отсутствии АРВ, а затем начинает увеличиваться и достигает установившегося значения, соответствующего возросшему напряжению генератора за счет действия АРВ (рис. 4.5).

В связи с тем что действие АРВ проявляется через несколько периодов после появления КЗ, начальные значения полного тока КЗ и его составляющих, а также ударный ток КЗ остаются такими же, как и при отсутствии АРВ.

Таким образом, при АРВ затухание свободных токов статора и обмотки возбуждения, возникших при внезапном КЗ, в некоторой степени компенсируется увеличением тока КЗ за счет действия АРВ.

В зависимости от соотношения между значениями этих токов и от характера их изменения кривая полного тока КЗ приобретает

разный вид. При этом аperiodическая составляющая i_{at} остается практически такой же, как и при отсутствии АРВ, а периодическая составляющая i_{pt} в зависимости от соотношения между начальным и установившимся токами КЗ при предельном токе возбуждения может затухать, возрастать или оставаться неизменной, как показано на рис. 4.6. Если под действием АРВ напряжение генератора достигает предельного значения (может принимать также номинальное значение), то ток КЗ в дальнейшем остается неизменным.

Изменения действующих значений периодической составляющей тока статора и аperiodических составляющих токов в обмотке возбуждения и демпферной обмотке ротора при КЗ на зажимах генератора показаны на рис. 4.7, а, б и в соответственно. Штриховыми кривыми обозначены токи при отсутствии АРВ, а сплошными с учетом действия АРВ.

Из рисунка следует, что в начале переходного процесса действие АРВ сказывается незначительно, а с течением времени оно прояв-

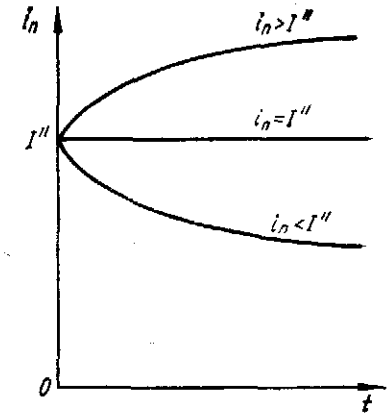


Рис. 4.6. Изменения периодической составляющей тока КЗ генератора с АРВ при постоянной времени обмотки возбуждения $T_e = 0$ и различных значениях предельного тока возбуждения

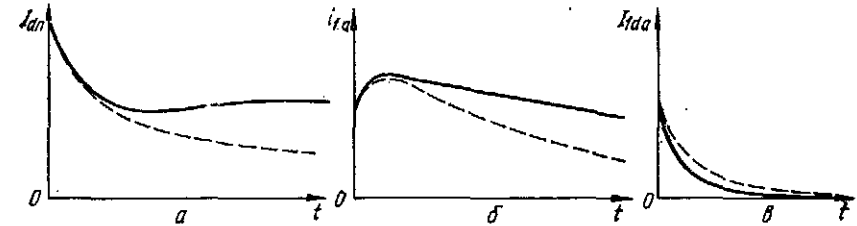


Рис. 4.7. Влияние АРВ на изменение действующих значений токов в обмотках генератора при КЗ на его зажимах

ляется все в большей мере. При достижении предела (потолка) АРВ рассматриваемые токи в обмотках генератора принимают свои конечные установившиеся значения.

Предельное возбуждение синхронных машин нормировано по напряжению возбуждения U (отн. ед.) и скорости нарастания напряжения возбуждения dU/dt (отн. ед./с).

4.3. Короткие замыкания в удаленных точках системы электроснабжения

При КЗ в элементах СЭС токи в обмотках генератора будут меньше, чем в случае КЗ на зажимах генератора, так как результирующее сопротивление короткозамкнутой цепи увеличивается. Вслед-

ствие этого уменьшаются влияние КЗ в СЭС на работу генератора, а также пределы изменения тока КЗ в течение переходного процесса, которые зависят от удаленности точки КЗ относительно источника и будут тем меньше, чем дальше находится точка КЗ в удаленных точках СЭС периодическая составляющая тока во время переходного процесса в генераторе практически не изменится (рис. 4.8).

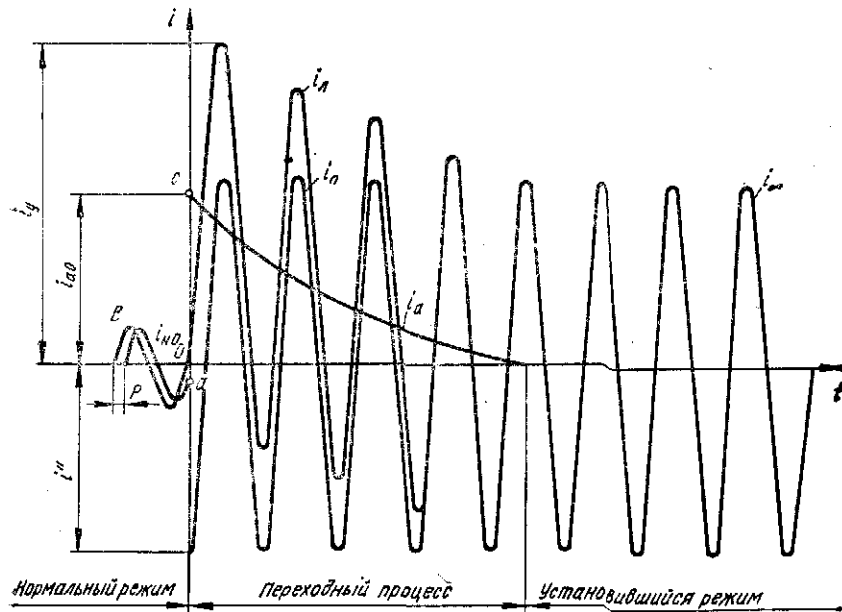


Рис. 4.8. Изменения полного тока и его составляющих при КЗ в удаленных точках СЭС

Удаленной точкой называют такую точку СЭС, при КЗ в которой ток генераторов электростанции изменяется настолько незначительно, что изменением э. д. с. генераторов можно пренебречь и считать напряжение на их зажимах неизменным и равным номинальному. При этом ток КЗ может значительно превышать номинальный и является опасным для участка СЭС, где расположена удаленная точка.

Считая, что при КЗ в удаленной точке э. д. с. генератора и напряжение на его зажимах неизменны, можем утверждать, что периодическая составляющая тока также не меняется и с самого начального момента КЗ принимает установившееся значение

$$I'' = I_{пт} = I_{\infty}. \quad (4.13)$$

Апериодическая составляющая тока возникает при любой удаленности точки КЗ от источника, поскольку всякая цепь обладает индуктивным сопротивлением, и затухает тем быстрее, чем больше активное сопротивление короткозамкнутой цепи. В протяженных

КЛ и сетях напряжением до 1 кВ, где преобладает активное сопротивление, апериодическая составляющая тока затухает в течение 0,15—0,2 с.

Внешнее сопротивление цепи генератора $x_{вн}$, при КЗ за которым сверхпереходный I'' и установившийся I_{∞} токи одинаковы ($I'' = I_{\infty}$), можно найти, выразив их через соответствующие э. д. с. и сопротивление, из равенства

$$E_q''/(x_d'' + x_{вн}) = E_{qn}/(x_d + x_{вн}), \quad (4.14)$$

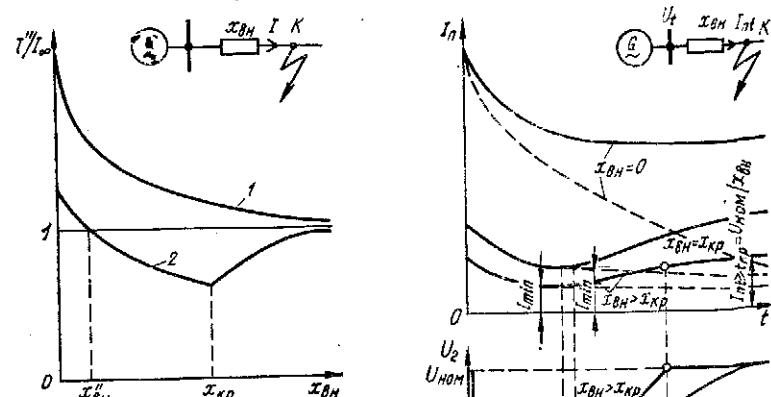
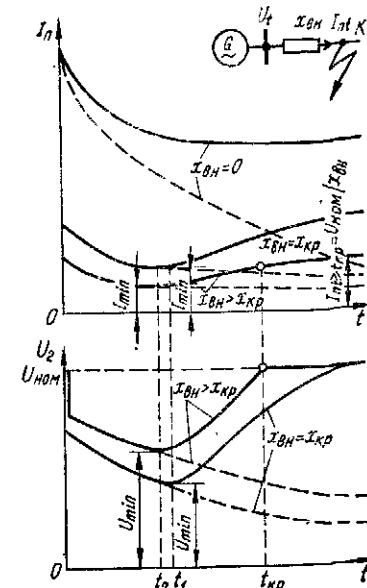


Рис. 4.9. Зависимость отношения I''/I_{∞} от удаленности точки КЗ в СЭС без АРВ (кривая 1) и с АРВ (кривая 2)

Рис. 4.10. Влияние АРВ на изменение тока и напряжения генератора при различных удаленностях точек КЗ



где E_q'' и E_{qn} — э. д. с. генератора в начальный момент КЗ и в установившемся режиме; x_d'' и x_d — сверхпереходное и синхронное сопротивления генератора.

Из (4.14) следует, что

$$x_{вн} = (E_q''x_d - E_d x_d'')/(E_q - E_q''). \quad (4.15)$$

Если построить зависимость отношения I''/I_{∞} от внешнего сопротивления $x_{вн}$ (рис. 4.9), то легко установить, что без АРВ это отношение всегда больше единицы и только в пределе стремится к ней. При АРВ отношение I''/I_{∞} сначала уменьшается до минимального значения (0,6—0,8), а затем начинает возрастать, стремясь в пределе также к единице.

Предельное значение внешнего сопротивления короткозамкнутой цепи генератора, при котором отношение сверхпереходного тока к установившемуся току КЗ в СЭС с АРВ начинает возрастать, называют критическим и обозначают $x_{кр}$. Значение $x_{кр}$ зависит от параметров синхронной машины и предшествующего режима ее работы.

На рис. 4.10 показаны изменения действующих значений периодической составляющей тока статора и напряжения генератора в функции времени при включенном (сплошные линии) и отключенном (штриховые линии) АРВ и удаленностях точек КЗ, характеризующихся значениями внешнего сопротивления короткозамкнутой цепи $x_{нн} = 0$, $x_{вн} = x_{кр}$ и $x_{вн} > x_{кр}$.

Сравнение полученных зависимостей показывает, что при малой удаленности точки КЗ кривая тока генератора из-за действия АРВ более пологая и сохраняет вид спадающей кривой. С увеличением удаленности точки КЗ кривая тока сначала спадает до некоторого минимального значения, а затем начинает возрастать, достигая конечного установившегося тока, значение которого может превысить значение начального тока КЗ.

Из рис. 4.10 также следует, что при $x_{нн} > x_{кр}$ напряжение генератора достигает номинального значения через время $t_{кр}$ и далее остается неизменным. При этом ток КЗ для $t \geq t_{кр}$ также остается неизменным и определяется выражением

$$I_{пт} = U_{ном}/x_{вн}. \quad (4.16)$$

Критическим временем $t_{кр}$ называют продолжительность повышения напряжения генератора до номинального значения под действием АРВ.

Минимальное значение тока или напряжения зависит от параметров генератора и удаленности точки КЗ. С увеличением удаленности время наступления минимума уменьшается, достигая в пределе $t = 0$.

4.4. Начальный ток короткого замыкания

Периодическая составляющая начального тока КЗ может быть определена, исходя из принципа сохранения первоначального результирующего потокосцепления ротора при внезапном нарушении режима работы генератора.

Поскольку в момент внезапного нарушения нормального режима потокосцепление ротора остается неизменным, наведенная в статоре э. д. с. в начале переходного процесса также не меняется. Как показано в гл. 3, переходные э. д. с. и индуктивное сопротивление машины без демпферных обмоток определяются выражениями

$$E'_a = E_{qf}(x_{ad}(x_{\sigma f} + x_{ad})) = E_{qf}(x_{ad}x_f);$$

$$x'_d = x_{\sigma} + x_{\sigma f}x_{ad}/(x_{\sigma f} + x_{ad}).$$

При этом

$$E'_{q0} = E'_{q(0)} = U_{q(0)} + I_{d(0)}x'_d, \quad (4.17)$$

а начальный переходный ток КЗ

$$I'_{d0} = E'_{q0}/(x'_d + x_{вн}). \quad (4.18)$$

Индексы «(0)» и «0» соответствуют здесь параметрам предшествующего режима и начального момента КЗ.

Для синхронных генераторов с демпферными контурами сверхпереходная э. д. с.

$$E''_a = (E_{qf}/x_{\sigma f} + E_{q1d}/x_{\sigma1d}) / (1/x_{\sigma f} + 1/x_{\sigma1d} + 1/x_{ad}),$$

а сверхпереходное сопротивление

$$x''_d = x_{\sigma} + x_{ad} \| x_{\sigma f} \| x_{\sigma1d}.$$

При этом

$$E''_{q0} = E''_{q(0)} = U_{q(0)} + I_{d(0)}x''_d, \quad (4.19)$$

а сверхпереходный ток КЗ

$$I''_{d0} = E''_{q0}/(x''_d + x_{вн}). \quad (4.20)$$

Из выражений (4.17) и (4.19) следует, что для определения E'_{q0} и E''_{q0} токи и напряжения машины нужно раскладывать на составляющие по осям d и q .

Если рассмотреть векторные диаграммы неявнополюсных и явнополюсных синхронных машин до начала переходного процесса (рис. 4.11), то нетрудно убедиться в том, что значения $E'_{q(0)}$ и $E''_{q(0)}$ можно с достаточной для практических расчетов точностью определить по формулам:

для машин без демпферных контуров

$$E'_{q(0)} \approx E'_{(0)} \approx U_{(0)} + I_{(0)}x'_d \sin \varphi_{(0)}; \quad (4.21)$$

для машин с демпферными контурами

$$E''_{q(0)} \approx E''_{(0)} \approx U_{(0)} + I_{(0)}x''_d \sin \varphi_{(0)}. \quad (4.22)$$

Для машин мощностью до 100 МВт при их полной нагрузке, номинальном напряжении и $\cos \varphi = 0,8$ до КЗ средние значения x'_d , x''_d и $E'_{q(0)}$, $E''_{q(0)}$ в относительных единицах составляют: 0,2; 0,13 и 1,12; 1,078 (турбогенераторы); 0,35; 0,25 и 1,15; 1,21 (гидрогенераторы).

Поскольку переходная и сверхпереходная э. д. с. близки к единице, в приближенных практических расчетах при любых значениях нагрузки, предшествующей КЗ, часто принимают $E'_{*q(0)} = 1$ и $E''_{*q(0)} = 1$. В тех случаях, когда нагрузку предварительного режима машины требуется учесть, для определения ее э. д. с. используют выражения (4.17) и (4.19).

Начальный ток КЗ рассчитывают в следующем порядке:

составляют схему замещения короткозамкнутой цепи с E'_q при отсутствии у машин демпферных контуров или с E''_q при их наличии, а значения E'_{q0} и E''_{q0} определяют по (4.17) или (4.19);

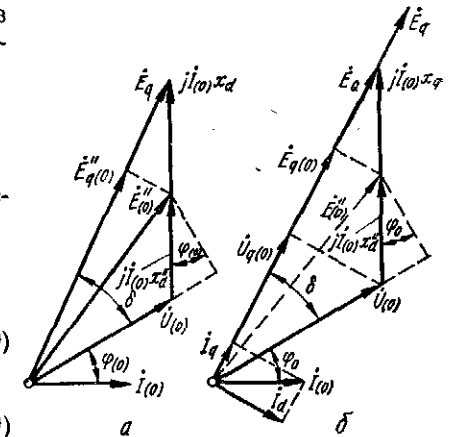


Рис. 4.11. Векторные диаграммы неявнополюсных (а) и явнополюсных (б) синхронных машин до начала переходного процесса

преобразуют схему замещения относительно точки КЗ и находят начальный ток в месте КЗ;

определяют токораспределение в схеме при КЗ в заданной точке.

4.5. Ток короткого замыкания в произвольный момент времени

В связи с размагничивающим действием реакции статора, затуханием свободных токов и действием АРВ ток КЗ синхронной машины изменяется во времени. Действующее значение периодической составляющей тока основной частоты определяется выражением

$$I_{nt} = \sqrt{I_{dnt}^2 + I_{qnt}^2} \quad (4.23)$$

В случае возникновения КЗ на зажимах генератора и связанного с ним увеличения возбуждения периодические составляющие синхронной машины по осям d и q в произвольный момент времени могут быть найдены по формулам [6]

$$\begin{aligned} I_{dnt} = & E_{q(0)}/x_d + (E'_{q(0)}/x'_{d1d} - E_q/x_d) \exp(-t/T'_d) + \\ & + (E''_{q(0)}/x''_d - E_{q(0)}/x_{d1d}) \exp(-t/T''_d) + \Delta I_{np} F_d(t) = \\ = & I_\infty + (I' - I_\infty) \exp(-t/T_d) + (I'' - I') \exp(-t/T''_d) + \\ & + ((E_{qnp} - E_{q(0)})/x_d) F_d(t); \end{aligned} \quad (4.24)$$

$$I_{qnt} = (U_{d(0)}/x''_q - U_{d(0)}/x_q) \exp(-t/T''_q), \quad (4.25)$$

где I_∞ , I' , I'' — соответственно периодические составляющие установившегося, переходного и сверхпереходного токов КЗ;

$$\begin{aligned} x'_{d1d} = & x_d (T'_d/T_{d0}) \approx x_d (T'_f + T'_{1d})/(T_{f0} + T_{1d0}) \approx \\ \approx & (0,9 \div 1) x'_d; \quad x''_q = x_q - x''_{dq}/x_{1q}. \end{aligned}$$

Постоянные времена затухания токов определяются выражениями

$$\begin{aligned} T'_d & \approx T'_f + T'_{1d}; \\ T''_d & \approx \sigma' T'_f T'_{1d}/(T'_f + T'_{1d}); \\ T''_q & = T_{1q0} (x''_q/x_q). \end{aligned}$$

Постоянная времени обмотки возбуждения при замкнутой статорной и разомкнутой демпферной обмотках рассчитывается по формуле

$$T_f = T_{f0} (x'_d/x_d) = T_{f0} (1 - x''_{ad})/(x_d x_q).$$

Постоянная времени демпферной обмотки при замкнутой обмотке статора и разомкнутой обмотке возбуждения находится так:

$$T_{1d} = T_{1d0} (1 - x''_{ad})/(x_d x_{1d}).$$

Значения параметров, входящих в выражения для определения постоянных времени, рассчитываются по формулам

$$\begin{aligned} T_{f0} = & x_f/r_f; \quad T_{1d} = x_{1d}/r_{1d}; \quad \sigma' = 1 - (x'_{ad})^2/(x'_f x'_{ad}); \\ x'_{ad} = & x_\sigma x_{ad}/(x_\sigma + x_{ad}) = x_\sigma x_{ad}/x_d; \quad x'_f = x_f - x''_{ad}/x_d = \\ = & x_{\sigma f} + x'_{ad}; \quad x'_{1d} = x_{1d} - x''_{ad}/x_d = x_{\sigma 1d} + x'_{ad}; \quad T_{1q0} = x_{1q}/r_{1q}. \end{aligned}$$

Функция $F_d(t) = \varphi(T'_d, T''_d, T_e, T_{\sigma 1d})$, где T_e — постоянная времени системы возбуждения, а

$$T_{\sigma 1d} = x_{\sigma 1d}/r_{1d} = (x_{1d} - x_{ad})/r_{1d}.$$

Полный ток КЗ фаз в произвольный момент времени состоит из периодической составляющей, аperiodической составляющей и составляющей двойной частоты, обусловленной несимметрией ротора и наличием аperiodической составляющей тока статора [6]. Например, ток фазы A

$$\begin{aligned} i_A = & i_{пА} + i_{аА} + i_{2А} = i_{пА} - (U_{q(0)} \cos \gamma_{(0)} + \\ & + U_{d(0)} \sin \gamma_{(0)}) ((x'_d + x''_d)/(2x'_d x''_d)) \exp(-t/T_d) - \\ & - (U_{q(0)} \cos(2\omega t - \gamma_{(0)}) - U_{d(0)} \sin(2\omega t + \gamma_{(0)})) \times \\ & \times ((x''_q - x'_q)/(2x''_q x'_q)) \exp(-t/T_a), \end{aligned} \quad (4.26)$$

где $T_a = x_2/r$; $x_2 = 2x''_d x''_q/(x''_d + x''_q)$ — сопротивление обратной последовательности.

Выражение (4.26) показывает, что точный расчет токов КЗ в произвольный момент времени в сложных СЭС, содержащих, кроме источников питания, мощные нагрузки, весьма затруднителен. Учитывая это обстоятельство, а также отсутствие потребности в высокой точности расчетов, для вычисления токов КЗ в произвольный момент времени используют приближенные методы расчета.

4.6. Установившийся режим короткого замыкания

Установившимся режимом называют такую стадию переходного процесса, при которой все возникшие в начальный момент КЗ свободные токи в синхронной машине затухают и изменение напряжения на ее зажимах под действием АРВ прекращается.

Параметры короткозамкнутой цепи при установившемся режиме можно определить на основании характеристик холостого хода и КЗ синхронной машины, ее синхронных сопротивлений x_d в продольной и x_q в поперечной осях, сопротивления рассеяния статора x_σ и предельного тока возбуждения I_{fnp} .

Синхронное сопротивление в продольной оси определяется выражением

$$x_{*d} = c/k_c, \quad (4.27)$$

где c — относительное значение э. д. с. по ненасыщенной характеристике холостого хода при $I_f = 1$; k_c — отношение короткого

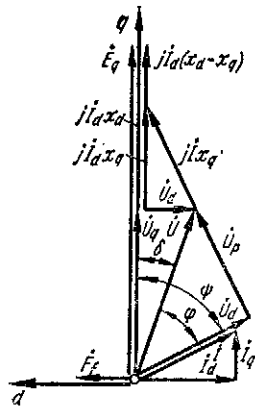


Рис. 4.12. Векторная диаграмма явноточечной синхронной машины

замыкания, соответствующего относительному установившемуся току при трехфазном КЗ на зажимах генератора, к относительному току возбуждения, равному единице. У неявнополюсных машин $x_d \approx x_q$, а у явнополюсных $x_q \approx 0,6x_d$. При этом $c = 1,05 \div 1,2$.

Для упрощения расчетов токов КЗ характеристику холостого хода $E_q = f(I_f)$ спрямляют в точке с координатами $E_{*q} = 1$; $I_{*f} = 1$. В этом случае

$$x_{*d} = 1/k_c; \quad (4.28)$$

$$E_{*u} = I_{*f}. \quad (4.29)$$

Ток возбуждения явнополюсной синхронной машины в относительных единицах при заданной нагрузке можно найти из векторной диаграммы (рис. 4.12) с учетом (4.29):

$$I_f \approx E_q \approx \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + (U \sin \varphi + I x_d)^2}. \quad (4.30)$$

Из векторной диаграммы также следует:

$$E_q = U_q + I_d x_d = I_d (x_d + x_{вн}) + I_f r_{вн};$$

$$I_q = I_d \operatorname{ctg} \psi = I_d r_{вн} / (x_{вн} + x_q).$$

После преобразования последних выражений получим

$$I_d = E_q (x_q + x_{вн}) / ((x_d + x_{вн})(x_q + x_{вн}) + r_{вн}^2); \quad (4.31)$$

$$I_q = E_q r_{вн} / ((x_d + x_{вн})(x_q + x_{вн}) + r_{вн}^2); \quad (4.32)$$

$$I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} = E_q \sqrt{(x_q + x_{вн})^2 + r_{вн}^2} / ((x_d + x_{вн}) \times (x_q + x_{вн}) + r_{вн}^2). \quad (4.33)$$

Для неявнополюсных синхронных машин выражение (4.33) упрощается и принимает вид

$$I = E_q / \sqrt{(x_d + x_{вн})^2 + r_{вн}^2}. \quad (4.34)$$

Практические расчеты токов КЗ показывают, что токи I явнополюсных и неявнополюсных синхронных машин отличаются незначительно и приближенно их можно определять по (4.34).

В зависимости от удаленности точки КЗ при установившемся КЗ возможны два режима работы генераторов:

1. *Режим номинального напряжения*, характеризующийся следующими соотношениями параметров:

$$E_q \leq E_{qпр}; \quad U_r = U_{г.ном}; \quad I_r \leq I_{кр}; \quad x_{вн} \geq x_{кр}, \quad (4.35)$$

где $I_{кр}$ и $x_{кр}$ — критические ток и сопротивление.

При КЗ в точке, соответствующей сопротивлению $x_{кр}$, генератор работает с предельным возбуждением, когда напряжение на его за-

жимах равно номинальному, а ток соответствует критическому значению: $I_{кр} = U_{г.ном} / x_{кр}$.

2. *Режим предельного возбуждения*, при котором

$$E_q = E_{qпр}; \quad U_r \leq U_{г.ном}; \quad I_r \geq I_{кр}; \quad x_{вн} \leq x_{кр}. \quad (4.36)$$

Критическое сопротивление можно найти из равенства

$$(E_{qпр} - U_{г.ном}) / x_d = U_{г.ном} / x_{кр},$$

откуда

$$x_{кр} = x_d U_{г.ном} / (E_{qпр} - U_{г.ном}). \quad (4.37)$$

Если при определении установившегося тока КЗ учитывают обобщенную нагрузку, то ее обычно выражают в относительных единицах при полной рабочей мощности нагрузки и среднем номинальном напряжении питающей сети. В этом случае $x_{*н} = 1,2$; $E_{*н} = 0$.

Контрольные вопросы

1. Как изменяются полный ток и его составляющие при трехфазном КЗ на зажимах генератора без АРВ?
2. Как влияет АРВ генератора на изменение тока при трехфазном КЗ?
3. Какой ток КЗ называется ударным и при каких условиях он возникает?
4. От каких параметров зависит ударный коэффициент?
5. Как определяется действующее значение полного тока КЗ?
6. Как изменяются полный ток и его составляющие при КЗ в удаленных точках СЭС?
7. Какими выражениями определяется периодическая составляющая начального тока КЗ?
8. Какое различие между переходным и сверхпереходным токами КЗ?
9. Можно ли аналитически определить ток КЗ в произвольный момент времени?
10. Какой режим КЗ называется установившимся?
11. Как определить ток КЗ в установившемся режиме?

Темы рефератов

1. Влияние АРВ на характер протекания тока КЗ.
2. Влияние удаленности точки КЗ на источники питания.
3. Изменения полного тока и его составляющих при КЗ в различных точках СЭС.

Глава 5

ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТОКОВ СИММЕТРИЧНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

5.1. Расчет начального значения тока короткого замыкания

Начальное (сверхпереходное) значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ определяют по результирующему сопротивлению короткозамкнутой цепи в именованных $x_{рез.б}$ или в относительных $x_{*рез.б}$ единицах и сверхпереходной э. д. с. E'' синхронной либо асинхронной машины.

Для синхронных генераторов, компенсаторов и двигателей, работающих с перевозбуждением (знак «+»), а также для синхронных машин, работающих с недозавбуждением, и асинхронных двигателей (знак «-»)

$$E''_{(0)} = \sqrt{(U_{(0)} \cos \varphi_{(0)})^2 + (U_{(0)} \sin \varphi_{(0)} \pm I_{(0)} x''_d)^2}, \quad (5.1)$$

где $U_{(0)}$, $I_{(0)}$, $\varphi_{(0)}$ — соответственно напряжение на зажимах машины, ток и угол сдвига фаз в исходном режиме.

Таблица 5.1. Средние относительные значения x''_{*d} и E''_* при номинальных условиях эксплуатации СЭС

Наименование элемента СЭС	x''_{*d}	E''_*
Турбогенератор мощностью до 100 МВт	0,125	1,08
То же мощностью 100—500 МВт	0,2	1,13
Гидрогенератор с успокоительными обмотками	0,2	1,13
То же без успокоительных обмоток	0,27	1,18
Синхронный компенсатор	0,2	1,2
Синхронный двигатель	0,2	1,1
Асинхронный двигатель	0,2	0,9
Обобщенная нагрузка	0,35	0,85

Если эквивалентная э. д. с. E''_{Σ} и результирующее сопротивление выражены в именованных единицах, то начальное значение периодической составляющей тока КЗ

$$I''^{(3)} = E''_{\Sigma} / (\sqrt{3} x_{\text{рез.б}}), \quad (5.2)$$

а если в относительных единицах, то

$$I''^{(3)} = E''_{*\Sigma} I_6 / x_{*\text{рез.б}}, \quad (5.3)$$

где I_6 — базисный ток, соответствующий напряжению той ступени трансформации, на которой произошло КЗ.

Для приближенных расчетов можно воспользоваться средними относительными значениями x''_{*d} и E''_* , указанными в табл. 5.1.

Пуск электродвигателя можно рассматривать как возникновение КЗ за сопротивлением x''_d . При этом пусковой ток можно рассчитать по (5.2), где для получения абсолютного значения тока надо э. д. с. E''_{Σ} заменить напряжением той ступени, к которой подключен электродвигатель, а $x_{\text{рез.б}}$ определить с учетом сопротивления двигателя x''_d .

При заданном исходном режиме можно использовать известный принцип наложения, в соответствии с которым ток в начальный момент переходного процесса может быть найден наложением собственно аварийного тока на исходный. Действительный ток получают как результат наложения ряда условных токов, каждый из кото-

рых определяется действием одной или нескольких э. д. с., причем все остальные элементы схемы остаются включенными.

При значительном числе э. д. с. решение упрощается, если использовать теорему об активном двухполюснике. Согласно этой теореме ток в точке КЗ можно найти как сумму предшествующего тока $I_{(0)}$ в ветви схемы и аварийной составляющей тока I_{K_1} от действия э. д. с., приложенной к точке K_1 и равной $-U_{K_1(0)}$. Условия трехфазного КЗ не изменяются, если считать, что в точке КЗ приложены две равные, но противоположные э. д. с. Значение этих э. д. с. может быть принято произвольным, в частности, равным напряжению, которое было в этой точке до появления КЗ.

Аварийная составляющая тока определяется выражением

$$I_{K_1} = -U_{K_1(0)} / (j x_{\text{вх}K_1}), \quad (5.4)$$

где $x_{\text{вх}K_1}$ — входное сопротивление схемы со стороны КЗ при условии, что все э. д. с. в схеме равны нулю.

Ток и напряжение в произвольной ветви j схемы при КЗ в точке K_1 выражаются так:

$$\dot{U}_j = \dot{U}_{K_1} + \dot{U}_{j(0)}; \quad (5.5)$$

$$I_j = I_{K_1} + I_{j(0)}, \quad (5.6)$$

где $I_{K_1} = I_{K_1} c_{jK_1}$, а c_{jK_1} — коэффициент распределения тока для ветви j схемы при КЗ в точке K_1 (см. (5.4)).

Часто допускают наложение собственно аварийного режима, полученного для схемы с индуктивными сопротивлениями, на предшествующий режим, который соответствует схеме с полными сопротивлениями ее элементов. Такое наложение принципиально неточно, однако в большинстве приближенных расчетов пользоваться им можно. Получаемые ошибки из-за преобладания аварийной составляющей тока незначительны. Приближенный расчет собственно аварийного режима предусматривает учет только индуктивных элементов схемы. При определенных условиях отбрасывают и нагрузочные ветви.

Влияние нагрузки в начальный момент трехфазного КЗ зависит от значения остаточного напряжения в точке ее приложения. Чем дальше находится источник питания (электростанция, подстанция ЭЭС) от точки КЗ и чем ближе расположена нагрузка к этой точке, тем сильнее сказывается ее относительная роль в увеличении тока КЗ. При определении начального тока КЗ обычно учитывают только те нагрузки и отдельные электродвигатели, которые непосредственно связаны с точкой КЗ или находятся на небольшой электрической удаленности от нее.

При большой удаленности точки КЗ от источника питания (за маломощными трансформаторами, реакторами и т. п.) можно считать, что ветвь схемы замещения с точкой КЗ питается от источника неограниченной мощности ($S_c = \infty$, $x''_c = 0$, $E''_{*c} = U_{*c} = 1 = \text{const}$), а периодическая составляющая тока КЗ является незатухающей ($I'' = I_{\text{пт}}$). В этом случае на результирующее сопротивление

ние цепи КЗ влияет в основном сопротивление элементов этой ветви, причем периодическая составляющая тока при трехфазном КЗ определяется выражением

$$I_{Kt}^{(3)} = I_G / x_{*рез.б}, \quad (5.7)$$

а мощность — выражением

$$S_{Kt}^{(3)} = S_G / x_{*рез.б}. \quad (5.8)$$

Получаемые значения тока и мощности по (5.7) и (5.8) будут несколько завышенными по сравнению с действительными значениями, так как реально $x_c \neq 0$.

Пример 5.1. Для СЭС, схема которой показана на рис. 5.1, а, известны токи и напряжения предшествующего режима; заданные токи — индуктивные. Расчетные параметры элементов СЭС указаны на рисунке. Определить начальную пе-

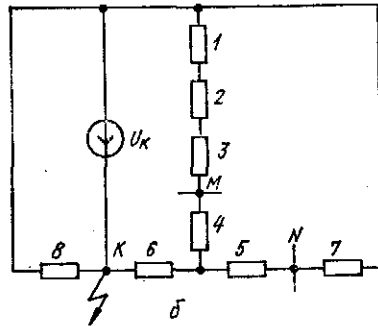
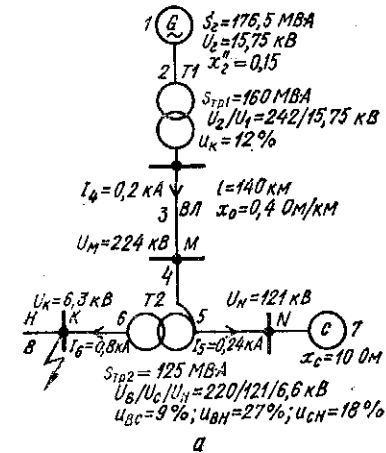


Рис. 5.1. К примеру 5.1

риодическую составляющую аварийного тока в месте замыкания и цепях автотрансформатора Т2, а также линейные напряжения в точках М и N при КЗ в точке К.

Решение. Расчет выполним в именованных единицах. Схема замещения СЭС для аварийного режима изображена на рис. 5.1, б. За базисное примем напряжение ВЛ $U_G = 220$ кВ.

Напряжение в точке КЗ

$$\dot{U}_K = U_H U_B / (\sqrt{3} U_N) = -6,6 \cdot 220 / (\sqrt{3} \cdot 6,3) = -133,2 \text{ кВ.}$$

Сопротивления элементов схемы замещения

$$x_1 = x_{*1}^u U_B^2 / S_T = 0,15 \cdot 220^2 / 176,5 = 41,1 \text{ Ом;}$$

$$x_2 = u_K U_B^2 / (100 S_{TP1}) = 12 \cdot 220^2 / (100 \cdot 160) = 36,3 \text{ Ом;}$$

$$x_3 = l x_0 U_B^2 / U_M^2 = 140 \cdot 0,4 \cdot 220^2 / 224^2 = 54 \text{ Ом;}$$

$$u_B = 0,5 (u_{BC} + u_{BH} - u_{CH}) = 0,5 (9 + 27 - 18) = 9 \text{ %;}$$

$$u_C = 0,5 (u_{BC} + u_{CH} - u_{BH}) = 0,5 (9 + 18 - 27) = 0;$$

$$u_H = 0,5 (u_{BH} + u_{CH} - u_{BC}) = 0,5 (27 + 18 - 9) = 18 \text{ %;}$$

$$x_4 = u_B U_B^2 / (100 S_{TP2}) = 9 \cdot 220^2 / (100 \cdot 125) = 34,8 \text{ Ом;}$$

$$x_5 = 0; \quad x_6 = u_H U_B^2 / (100 S_{TP2}) = 18 \cdot 220^2 / (100 \cdot 125) = 69,7 \text{ Ом;}$$

$$x_7 = x_C U_B^2 / U_N^2 = 10 \cdot 220^2 / 121^2 = 33,1 \text{ Ом;}$$

$$x_8 = U_K U_B^2 / (3 I_0 U_H^2) = 6,3 \cdot 220^2 / (3 \cdot 0,8 \cdot 6,6^2) = 2917 \text{ Ом.}$$

Резльтирующие сопротивления в схеме относительно точки К

$$x_9 = 41,1 + 36,3 + 54 + 34,8 = 166,2 \text{ Ом;}$$

$$x_{10} = x_5 + x_7 = 0 + 33,1 = 33,1 \text{ Ом;}$$

$$x_{11} = x_9 x_{10} / (x_9 + x_{10}) = 166,2 \cdot 33,1 / (166,2 + 33,1) = 27,6 \text{ Ом;}$$

$$x_{12} = x_{11} + x_6 = 27,6 + 69,7 = 97,3 \text{ Ом;}$$

$$x_{рез} = x_{12} x_8 / (x_{12} + x_8) = 97,3 \cdot 2917 / (97,3 + 2917) = 94,1 \text{ Ом.}$$

Ток в точке КЗ

$$I_K'' = (0 - \dot{U}_K) / x_{рез} = [0 - (-133,2)] / 94,1 = 1,42 \text{ кА;}$$

его истинное значение

$$I_K = I_K'' U_G / U_H = 1,42 \cdot 220 / 6,6 = 47,3 \text{ кА.}$$

Распределение аварийной составляющей тока:

$$I_{ав8} = \dot{U}_K / x_8 = -133,2 / 2917 = -0,046 \text{ кА;}$$

$$I_{ав6} = I_K'' + I_{ав8} = 1,42 - 0,046 = 1,374 \text{ кА;}$$

$$I_{ав5} = I_{ав6} x_{11} / x_7 = 1,374 \cdot 27,6 / 33,1 = 1,14 \text{ кА;}$$

$$I_{ав4} = I_{ав6} - I_{ав5} = 1,374 - 1,14 = 0,234 \text{ кА.}$$

Значения периодической составляющей тока КЗ в цепях автотрансформатора:

на стороне ВН

$$I_{ВТР2} = I_{ав4} + I_4 = 0,234 + 0,2 = 0,434 \text{ кА;}$$

на стороне СН

$$I_{СТР2} = I_{ав5} U_B / U_N - I_5 = 1,14 \cdot 220 / 121 - 0,24 = 1,83 \text{ кА;}$$

на стороне НН

$$I_{НТР2} = I_{ав6} U_B / U_H + I_6 = 1,374 \cdot 220 / 6,6 + 0,8 = 47,2 \text{ кА.}$$

Значение тока КЗ на стороне НН совпадает со значением рассчитанного тока в точке КЗ.

Значения аварийных составляющих напряжений в точках М и N:

$$U_{авМ} = -I_{ав4} (x_1 + x_2 + x_3) = -0,234 (41,1 + 36,3 + 54) = -30,75 \text{ кВ;}$$

$$U_{авN} = -I_{ав5} x_7 = -1,14 \cdot 33,1 = -37,7 \text{ кВ.}$$

Значения искомых линейных напряжений в точках М и N:

$$U_{HM} = U_M + \sqrt{3} U_{авМ} = 224 - \sqrt{3} \cdot 30,75 = 170,8 \text{ кВ;}$$

$$U_{HN} = U_N + \sqrt{3} U_{авN} U_N / U_B = 121 + \sqrt{3} \cdot 37,7 \cdot 121 / 220 = 85,1 \text{ кВ.}$$

Как видно, линейное напряжение в точке М снижено примерно на 23 %, а в точке N — на 30 %.

Пример 5.2. Определить сверхпереходный и ударный токи в СЭС при трехфазном КЗ в точке К (рис. 5.2, а). Расчет выполнять с учетом присоединенных нагрузок. Отношение x/r для элементов схемы: генератора — 80; трансформатора — 27; нагрузок — 2,4; ВЛ — 2+3; ИРМ — 40.

Решение. Схема замещения СЭС показана на рис. 5.2, б. Средние относительные значения э. д. с. примем в соответствии с табл. 5.1. Значения реактивных сопротивлений выразим в относительных единицах с учетом базисных условий: $S_6 = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $U_6 = U_{ср} = 115 \text{ кВ}$. При этом базисные напряжения на участках схемы следующие:

$$U_{611} = U_2 U_2 / U_6 = 115 \cdot 6,3 / 115 = 6,3 \text{ кВ};$$

$$U_{6111} = U_2 U_4 / U_6 = 115 \cdot 6,3 / 115 = 6,3 \text{ кВ};$$

$$U_{61V} = U_2 U_1 / U_6 = 115 \cdot 10,5 / 115 = 10,5 \text{ кВ}.$$

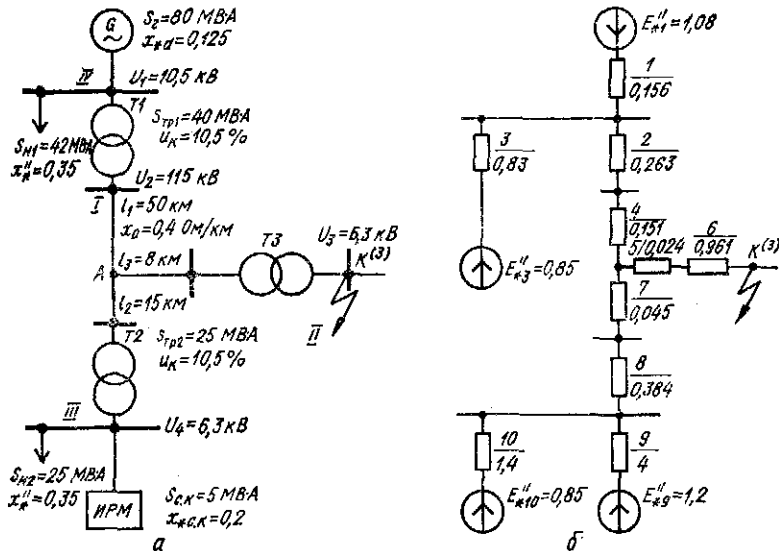


Рис. 5.2. К примеру 5.2

Базисный ток на участке, где рассматривается КЗ,

$$I_{611} = S_6 / (\sqrt{3} U_{611}) = 100 / (\sqrt{3} \cdot 6,3) = 9,2 \text{ кА}.$$

Относительные значения реактивных сопротивлений в схеме замещения СЭС:

$$x_{*1} = x''_a S_6 U_2^2 / (S_G U_{61V}^2) = 0,125 \cdot 100 \cdot 10,5^2 / (80 \cdot 10,5^2) = 0,156;$$

$$x_{*2} = u_K S_6 U_2^2 / (100 S_{Тр1} U_6^2) = 10,5 \cdot 100 \cdot 115^2 / (100 \cdot 40 \cdot 115^2) = 0,263;$$

$$x_{*3} = x''_a S_6 / S_{Н1} = 0,35 \cdot 100 / 42 = 0,83;$$

$$x_{*4} = l x_0 S_6 / U_6^2 = 50 \cdot 0,4 \cdot 100 / 115^2 = 0,151;$$

$$x_{*5} = l x_0 S_6 / U_6^2 = 8 \cdot 0,4 \cdot 100 / 115^2 = 0,024;$$

$$x_{*6} = u_K S_6 U_{н2}^2 / (100 S_{Тр2} U_6^2) = 10,5 \cdot 100 \cdot 110^2 / (100 \cdot 10 \cdot 115^2) = 0,961;$$

$$x_{*7} = l x_0 S_6 / U_6^2 = 15 \cdot 0,4 \cdot 100 / 115^2 = 0,045;$$

$$x_{*8} = u_K S_6 U_{н2}^2 / (100 S_{Тр2} U_6^2) = 10,5 \cdot 100 \cdot 110^2 / (100 \cdot 25 \cdot 115^2) = 0,384;$$

$$x_{*9} = x''_{с.к} S_6 / S_{с.к} = 0,2 \cdot 100 / 5 = 4;$$

$$x_{*10} = x''_a S_6 / S_{н2} = 0,35 \cdot 100 / 25 = 1,4.$$

Реактивные сопротивления и э. д. с. в преобразованной схеме замещения СЭС:

$$x_{*11} = x_{*1} x_{*3} / (x_{*1} + x_{*3}) = 0,156 \cdot 0,83 / (0,156 + 0,83) = 0,132;$$

$$E_{*11} = (E''_{*1} x_{*3} + E''_{*3} x_{*1}) / (x_{*1} + x_{*3}) =$$

$$= (1,8 \cdot 0,83 + 0,85 \cdot 0,156) / (0,83 + 0,156) = 1,043;$$

$$x_{*12} = x_{*11} + x_{*2} + x_{*4} = 0,132 + 0,263 + 0,151 = 0,546;$$

$$x_{*13} = x_{*9} x_{*10} / (x_{*9} + x_{*10}) = 1,4 \cdot 4 / (4 + 1,4) = 1,037;$$

$$E_{*12} = (E''_{*9} x_{*10} + E''_{*10} x_{*9}) / (x_{*9} + x_{*10}) =$$

$$= (1,2 \cdot 1,4 + 0,85 \cdot 4) / (1,4 + 4) = 0,941;$$

$$x_{*14} = x_{*13} + x_{*8} + x_{*7} = 1,037 + 0,384 + 0,045 = 1,466;$$

$$x_{*15} = x_{*5} + x_{*6} = 0,024 + 0,961 = 0,985;$$

$$E_{*ЭК} = (E_{*11} x_{*14} + E_{*12} x_{*12}) / (x_{*12} + x_{*14}) =$$

$$= (1,043 \cdot 1,466 + 0,941 \cdot 0,546) / (0,546 + 1,466) = 1,015;$$

$$x_{*16} = x_{*12} x_{*14} / (x_{*12} + x_{*14}) = 0,546 \cdot 1,466 / (0,546 + 1,466) = 0,397;$$

$$x_{*рез} = x_{*16} + x_{*15} = 0,397 + 0,985 = 1,382.$$

Сверхпереходный ток в относительных единицах

$$I''_* = E_{*ЭК} / x_{*рез} = 1,015 / 1,382 = 0,734.$$

Поскольку поведение нагрузки в начальный момент переходного процесса зависит от значения остаточного напряжения в точке ее присоединения, оценим остаточное напряжение в точке К:

$$U_* = I''_* (x_{*5} + x_{*6}) = 0,734 (0,961 + 0,024) = 0,723.$$

При таком значении U_* влияние нагрузок как источников питания КЗ незначительно.

Активные сопротивления элементов схемы замещения СЭС:

$$r_{*1} = 0,156 / 80 = 1,95 \cdot 10^{-3}; \quad r_{*2} = 0,263 / 17 = 15,47 \cdot 10^{-3};$$

$$r_{*3} = 0,83 / 2,4 = 345,8 \cdot 10^{-3}; \quad r_{*4} = 0,151 / 3 = 50,3 \cdot 10^{-3};$$

$$r_{*5} = 0,024 / 2 = 12 \cdot 10^{-3}; \quad r_{*6} = 0,961 / 10 = 96,1 \cdot 10^{-3};$$

$$r_{*7} = 0,045 / 2,5 = 18 \cdot 10^{-3}; \quad r_{*8} = 0,384 / 12 = 31 \cdot 10^{-3};$$

$$r_{*9} = 4 / 40 = 100 \cdot 10^{-3}; \quad r_{*10} = 1,4 / 2,4 = 583 \cdot 10^{-3}.$$

Положим $r_{*3} = r_{*10} = \infty$, так как эти сопротивления намного больше параллельных им сопротивлений r_{*1} и r_{*9} .

Относительные значения результирующих активных сопротивлений:

$$r_{*11} = r_{*1} + r_{*2} + r_{*4} = (1,95 + 15,47 + 50,3) \cdot 10^{-3} = 67,72 \cdot 10^{-3};$$

$$r_{*12} = r_{*9} + r_{*8} + r_{*7} = (100 + 18 + 32) \cdot 10^{-3} = 150 \cdot 10^{-3};$$

$$r_{*13} = r_{*12}r_{*11}/(r_{*12} + r_{*11}) = 150 \cdot 10^{-3} \cdot 67,72 \cdot 10^{-3}/(150 \cdot 10^{-3} + 67,72 \cdot 10^{-3}) = 46,656 \cdot 10^{-3};$$

$$r_{*рез} = r_{*13} + r_{*5} + r_{*6} = (46,656 + 12 + 96,1) \cdot 10^{-3} = 0,155.$$

Ударный коэффициент

$$k_y = 1 + \exp(-0,01/T_a) = 1 + \exp(-0,01/0,0284) = 1,7,$$

где

$$T_a = x_{*рез}/(\omega r_{*рез}) = 1,382/(2\pi \cdot 50 \cdot 0,155) = 0,0284 \text{ с.}$$

Искомый ударный ток

$$i_{*y} = k_y I_{*c}'' = 1,7 \cdot 0,734 = 1,25,$$

или

$$i_y = i_{*y} I_{6II} = 1,25 \cdot 9,2 = 11,5 \text{ кА.}$$

Пример 5.3. При трехфазном КЗ в точке K_2 СЭС, схема которой изображена на рис. 5.3, а, определить периодическую составляющую аварийного тока, мощность и ударный ток в месте повреждения при раздельной и параллельной работе трансформаторов. При КЗ в точке K_1 мощность $S_{K_1} = 400 \text{ МВ} \cdot \text{А}$.

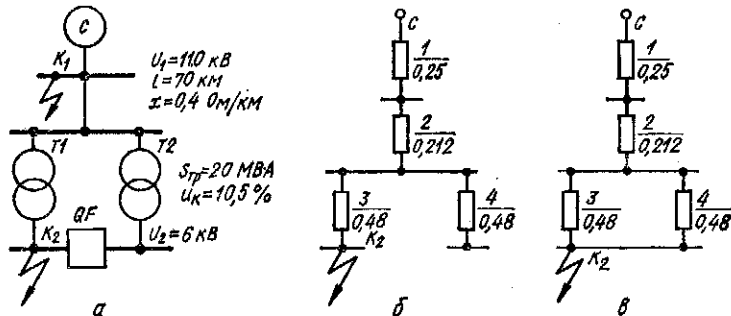


Рис. 5.3. К примеру 5.3

Решение. Примем $S_6 = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_{6I} = 6,3 \text{ кВ}$. Тогда

$$I_6 = S_6/(\sqrt{3}U_{6I}) = 100/(\sqrt{3} \cdot 6,3) = 9,17 \text{ кА};$$

$$U_{6II} = U_{6I}U_{тр1}/U_{тр2} = 6,3 \cdot 115/6,3 = 115 \text{ кВ.}$$

Все величины, которые войдут в схему замещения, выразим в относительных единицах с учетом выбранных базисных условий.

Сопротивление СЭС

$$x_{*1} = S_6/S_{K_1} = 100/400 = 0,25.$$

Э. д. с.

$$E_{*1} = U_{6II}/U_1 = 115/110 = 1,045.$$

Сопротивление ЛЭП

$$x_{*2} = l x_0 S_6/U_{6I}^2 = 70 \cdot 0,4 \cdot 100/115^2 = 0,212.$$

Сопротивления трансформаторов

$$x_{*3} = x_{*4} = u_k S_6 U_1^2 / (100 S_{тр} U_{6II}^2) = 10,5 \cdot 100 \cdot 110^2 / (100 \cdot 20 \cdot 115^2) = 0,48.$$

При раздельной работе трансформаторов (выключатель QF отключен) схема замещения СЭС показана на рис. 5.3, б.

Результирующее сопротивление до точки K_2

$$x_{*рез} = x_{*1} + x_{*2} + x_{*3} = 0,25 + 0,212 + 0,48 = 0,942.$$

Периодическая составляющая аварийного тока в точке K_2

$$I_{K_2}'' = E_{*1} I_6 / x_{*рез} = 1,045 \cdot 9,17 / 0,942 = 10,17 \text{ кА.}$$

Мощность КЗ

$$S_{K_2} = S_6 / x_{*рез} = 100 / 0,942 = 106,2 \text{ МВ} \cdot \text{А.}$$

Ударный ток найдем, исходя из условия, что наибольшее значение тока наступает через полпериода (0,01 с) с момента возникновения КЗ, а постоянная времени $T_a = 0,05 \text{ с}$. При этом

$$k_y = 1 + \exp(-0,01/0,05) = 1,818;$$

$$i_y = k_y \sqrt{2} I_{K_2}'' = 1,818 \sqrt{2} \cdot 10,17 = 26,44 \text{ кА.}$$

При параллельной работе трансформаторов (выключатель QF включен) схема замещения СЭС изображена на рис. 5.3, в.

Результирующее сопротивление до точки K_2

$$x_{*рез} = x_{*1} + x_{*2} + x_{*3}/2 = 0,25 + 0,212 + 0,48/2 = 0,702.$$

Периодическая составляющая аварийного тока в точке K_2

$$I_{K_2}'' = E_{*1} I_6 / x_{*рез} = 1,045 \cdot 9,17 / 0,702 = 13,65 \text{ кА.}$$

Мощность КЗ

$$S_{K_2} = S_6 / x_{*рез} = 100 / 0,702 = 1,42 \text{ МВ} \cdot \text{А.}$$

Ударный ток КЗ

$$i_y = k_y \sqrt{2} I_{K_2}'' = 1,818 \cdot \sqrt{2} \cdot 13,65 = 35,48 \text{ кА.}$$

5.2. Определение тока короткого замыкания в произвольный момент времени по расчетным и типовым кривым

Периодическая составляющая тока КЗ в любой момент времени после появления КЗ может быть рассчитана с использованием специально построенных кривых. Последние являются графическим отображением функциональных зависимостей между периодической составляющей тока КЗ, временем переходного процесса и электрической удаленностью точки КЗ от источника питания.

Кривые обеспечивают быстрое и простое выполнение практических расчетов тока КЗ, охватывают широкий диапазон мощностей источников питания, генераторы различаются только по типу и наличию средств АРВ. Эти особенности кривых получены за счет усреднения параметров реальных генераторов и приближенного учета влияния нагрузки в СЭС на ток КЗ, что сопряжено с определенной неточностью расчетов. Недостатком их является узкая область применения — вычисление тока лишь в точке КЗ и невозможность определения тока КЗ в ветвях схемы.

Построенные кривые делятся на расчетные и типовые. *Расчетные кривые* — это графическое отображение зависимостей

$$I_{*ш}^{(3)} = f(x_{*расч}) \text{ при } t = \text{вар.} \quad (5.9)$$

Построены они были в 1940 г. для типовых генераторов средней мощности (турбогенераторов мощностью до 150 МВт и гидрогенераторов мощностью до 50 МВт, оборудованных машинной системой возбуждения с АРВ и релейной форсировкой) при следующих расчетных условиях:

все источники питания имеют одинаковую электрическую удаленность относительно точки КЗ и СЭС заменяются расчетной схемой с типовым генератором (рис. 5.4, а);

типовой генератор до и в течение КЗ работает с номинальной нагрузкой $z_{*н} = 0,8 + j0,6$, которая условно относится к его за-

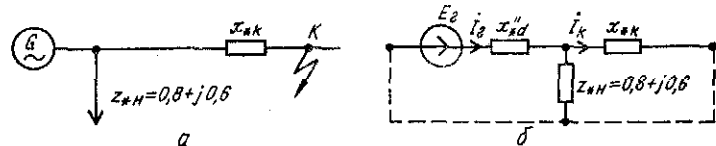


Рис. 5.4. Исходная схема (а) и схема замещения (б) рассматриваемой СЭС

жимам; это позволяет исключить нагрузку из схемы замещения цепи КЗ и не вводить ее в $x_{*расч}$ (рис. 5.4, б), считая, что

$$x_{*расч} = x_{*d} + x_{*к}; \quad (5.10)$$

параметры типового генератора и результирующее сопротивление цепи КЗ представляются в относительных единицах, т. е.

$$I_{*п}^{(3)} = I_{п}^{(3)} / I_{г.ном}; \quad x_{*расч} = x_{*рез.б} S_{г.ном} / S_{б}, \quad (5.11)$$

где $x_{*рез.б}$ — результирующее сопротивление, приведенное к базисным условиям;

сопротивление типового генератора по продольной и поперечной осям одинаковое, т. е. $x_d = x_q$.

Расчетные кривые для типовых турбо- и гидрогенераторов с АРВ показаны соответственно на рис. 5.5 и 5.6. Особенности этих кривых заключаются в следующем:

используются они для вычисления периодической составляющей тока КЗ при электрической удаленности точки КЗ $x_{*расч} \leq 3$, а при $x_{*расч} > 3$ ее можно считать неизменной в течение КЗ и рассчитывать по (5.7);

при $x_{*расч} \geq 1$ расчетные кривые для турбо- и гидрогенераторов практически совпадают;

для гидрогенераторов с успокоительными обмотками $x_{*расч}$ должно быть увеличено на 0,07, при этом для $t \leq 0,1$ с следует пользоваться штрихпунктирными кривыми, а для $t > 0,1$ с — сплошными.

Порядок определения периодической составляющей тока КЗ с помощью расчетных кривых (при $x_{*расч} \leq 3$) следующий:

1) схему замещения СЭС преобразуют к простейшему виду — между каждым источником питания и точкой КЗ помещают результирующее сопротивление $x_{*рез.б}$, которое приводят к номинальным условиям, используя соответствующее выражение (5.11);

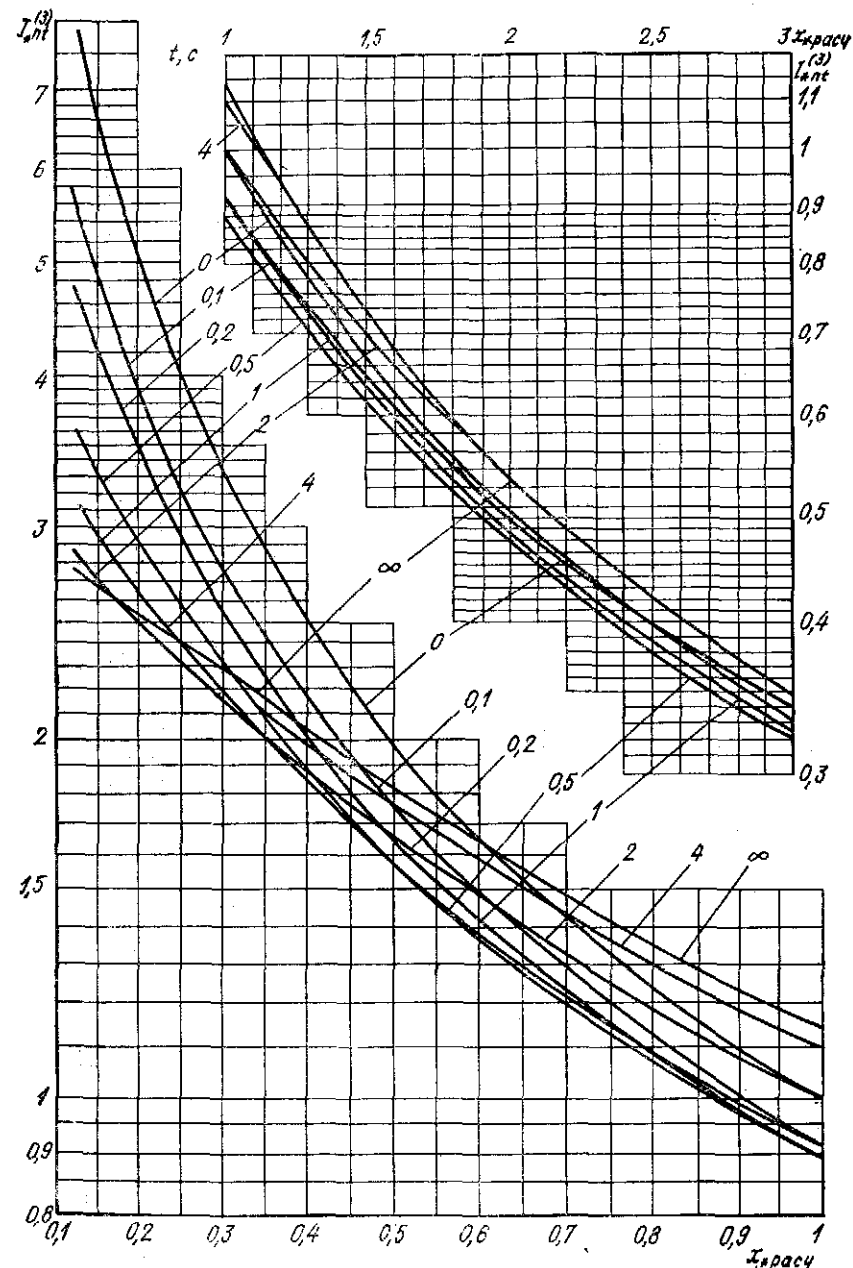


Рис. 5.5. Расчетные кривые для типового турбогенератора с АРВ

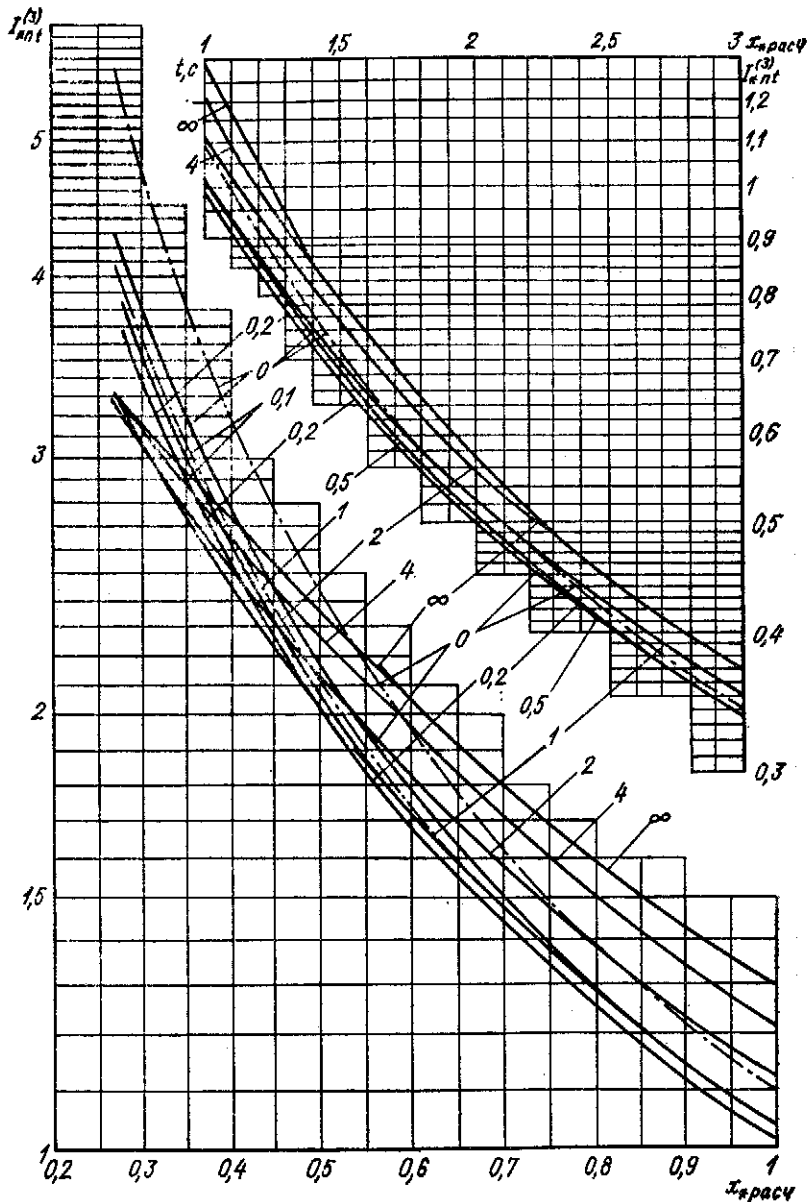


Рис. 5.6. Расчетные кривые для типового гидрогенератора с АРВ

2) по расчетным кривым для расчетного момента времени находят относительное значение периодической составляющей тока $I_{пт}$; 3) вычисляют значение периодической составляющей тока в именованных единицах, т. е.

$$I_{пт} = I_{пт} S_{г.ном} / (\sqrt{3} U_{ном}). \quad (5.12)$$

Типовые кривые — это графическое отображение семейства зависимостей (рис. 5.7, а)

$$I_{пт} / I_{г}'' = f(t) \text{ при } I_{г}'' / I_{г.ном} = \text{var} \quad (5.13)$$

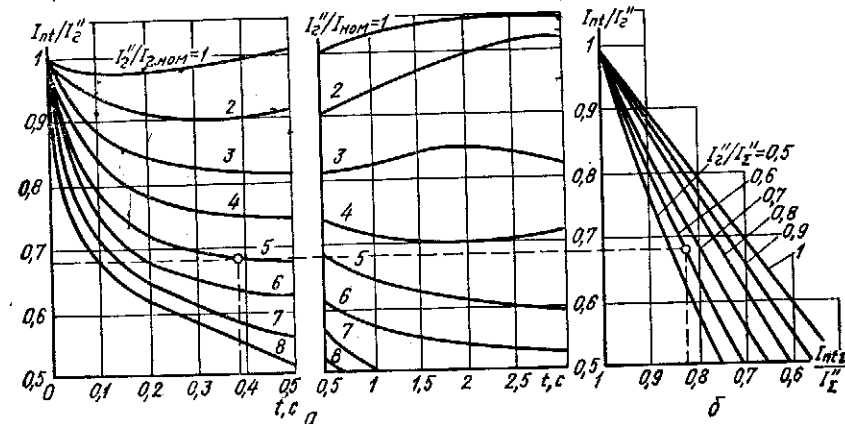


Рис. 5.7. Типовые кривые для мощных синхронных машин

и семейства дополнительных зависимостей (рис. 5.7, б)

$$I_{пт\Sigma} / I_{\Sigma}'' = f(I_{пт} / I_{г}'') \text{ при } I_{г}'' / I_{\Sigma}'' = \text{var}. \quad (5.14)$$

В зависимости (5.13) входят параметры режима одного генератора (или эквивалентного источника): $I_{г}''$, $I_{пт}$ — соответственно сверхпереходный ток и периодическая составляющая тока для момента времени t в генерирующей ветви; $I_{г.ном}$ — номинальный ток источника, приведенный к ступени напряжения с точкой КЗ:

$$I_{г.ном} = S_{г.ном} / (\sqrt{3} U_{ср.ном}). \quad (5.15)$$

Зависимостями (5.14) пользуются (см. п. 5.3) при расчете схем с двусторонним питанием точки КЗ: от генератора (группы генераторов) и электрической системы. Они связывают параметры режима генераторной ветви ($I_{г}''$, $I_{пт}$) с параметрами режима в точке КЗ: I_{Σ}'' — сверхпереходный ток всех источников; $I_{пт\Sigma}$ — периодическая составляющая тока в момент времени t , создаваемая всеми источниками.

Условия построения типовых кривых определяют область применения их в расчетах. Они являются унифицированными для источников питания: турбогенераторов мощностью 12—800 МВт, гидрогенераторов мощностью до 500 МВт и синхронных компенсаторов

мощностью 37,5—100 МВ · А. Кривые построены для следующих условий: синхронные машины имеют вентильную (рабочая) и машинную (резервная) системы возбуждения; кратность форсировки возбуждения для турбогенераторов и синхронных компенсаторов равна 2, а для гидрогенераторов — 1,8; постоянная времени нарастания напряжения на обмотке возбуждения генераторов и синхронных компенсаторов при форсировке их возбуждения равна нулю для $I_r''/I_{r,ном} < 8$.

Типовые кривые используют при определении действующего значения периодической составляющей тока КЗ для моментов времени до 3 с и электрической удаленности точки КЗ от источника питания $I_r''/I_{r,ном} > 1$ (при $I_r''/I_{r,ном} \leq 1$ точка КЗ является электрически удаленной и $I_r = I_{пт} = I_{\infty}$).

Для ветви независимого питания генератором точки КЗ периодическую составляющую тока КЗ определяют в следующем порядке:

1) рассчитывают результирующее сопротивление $x_{рез,б}$ или $x_{рез,б}$ до точки КЗ;

2) вычисляют начальный ток I_r'' в месте КЗ от синхронной машины по формуле (5.2) или (5.3);

3) находят электрическую удаленность $I_r''/I_{r,ном}$ точки КЗ;

4) определяют отношение $(I_{пт}/I_r'')_t$ по типовым кривым на основе уже известного отношения $I_r''/I_{r,ном}$ и момента времени t ;

5) рассчитывают периодическую составляющую тока КЗ по формуле

$$I_{пт} = (I_{пт}/I_r'')_t I_r'' \quad (5.16)$$

Выбор метода определения тока $I_{пт}$ по расчетным или типовым кривым зависит от параметров и характеристик генераторов источника питания: мощности, типа системы возбуждения и расчетного времени КЗ.

5.3. Расчет тока короткого замыкания по его общему и индивидуальному изменению

Если в расчетной схеме СЭС точка КЗ питается от нескольких источников, то следует оценить возможность уменьшения их количества, располагая сведениями об их типе, мощности и электрической удаленности относительно точки КЗ. Различают расчет периодической составляющей тока КЗ по его общему изменению, если количество источников сократить удастся, и индивидуальному изменению, если необходимо вычислять составляющие тока КЗ от каждого или эквивалентных (объединенных однотипных) генераторов.

Расчет по общему изменению тока КЗ заключается в замене однотипных и одинаково электрически удаленных генераторов эквивалентными с последующим определением периодической составляющей тока КЗ для каждого из этих эквивалентных генераторов. Его выполняют в следующем порядке:

1) составляют схему замещения СЭС для определения начального значения периодической составляющей тока КЗ;

2) находят результирующие сопротивления и сверхпереходные э. д. с. генерирующих ветвей;

3) оценивают электрическую удаленность точки КЗ от каждого источника для независимых генерирующих ветвей, не связанных с точкой КЗ общим сопротивлением;

4) выбирают метод определения тока КЗ: если по исходным данным это ветвь питания от энергетической системы или эквивалентный источник относится к источникам неограниченной мощности, то расчет выполняют по формуле (5.7); при оценке электрической удаленности ($x_{расч} > 3$ или $I_{пт}/I_{r,ном} \leq 1$) ток, создаваемый эквивалентным генератором, вычисляют по формуле (5.2) или (5.3); для электрически не удаленных точек КЗ в зависимости от характеристик эквивалентного генератора используют расчетные или типовые кривые (см. п. 5.2).

Расчет по индивидуальному изменению тока КЗ состоит в определении токов КЗ, создаваемых разнотипными генераторами или электростанциями с разной удаленностью их от точки КЗ. Периодические составляющие токов КЗ отдельных генераторов или электростанций изменяются во времени неодинаково. Если вычислять токи КЗ, создаваемые разнотипными генераторами или электростанциями с разной удаленностью от точки КЗ, через общее результирующее сопротивление, то расчет может иметь большую погрешность. Предельное отклонение результатов расчета по общему изменению периодической составляющей тока КЗ характеризуется отношением начального сверхпереходного тока к периодической составляющей тока источника в момент времени t при КЗ на контактах генератора. Для турбогенераторов даже при малых промежутках времени (до 2 с) расчет приводит к существенным погрешностям (отношение $I''/I_{пт}$ достигает трех). Для гидрогенератора предельные ошибки такого расчета гораздо меньше. При отсутствии АРВ погрешность расчета возрастает.

Если характеристики источников таковы, что для определения тока КЗ можно использовать расчетные кривые, то расчет выполняют в следующем порядке. Предварительно приводят действительную схему замещения СЭС к условной радиальной, каждая ветвь которой соответствует выделяемому источнику или группе однотипных источников и связана с точкой КЗ. Преобразование схемы выполняют с использованием коэффициентов токораспределения в соответствии с рекомендациями п. 2.5. Источники, непосредственно связанные с точкой КЗ, а также источники неограниченной мощности следует рассматривать отдельно от остальных источников питания.

Токи, создаваемые источниками, находят отдельно для каждой ветви. В случае независимых генерирующих ветвей связи с точкой КЗ составляющие тока КЗ рассчитывают аналогично расчету по общему изменению тока КЗ (п. 4).

Если характеристики источников позволяют использовать для расчета тока КЗ типовые кривые, то в случае независимых генери-

рующих ветвей можно воспользоваться также рекомендациями последовательности расчета по общему изменению тока КЗ (п. 4). При связи генератора и электрической системы с точкой КЗ через общее сопротивление x_k расчет периодической составляющей тока КЗ выполняют в следующем порядке (рис. 5.8):

1) находят результирующее индуктивное сопротивление $x_{*рез}$ и суммарную э. д. с. $E_{*\Sigma}$ для определения начального значения периодической составляющей тока в точке КЗ по формуле

$$I_{\Sigma}'' = E_{*\Sigma}'' / x_{*рез}; \quad (5.17)$$

2) вычисляют начальное значение периодической составляющей тока в ветви генератора, пользуясь выражением

$$I_{Г}'' = (E_{*Г}'' I_{\Sigma}'' - I_{\Sigma}'' x_{*к}) / x_{*Г}; \quad (5.18)$$

3) определяют отношения $I_{Г}'' / I_{Г,ном}$ и $I_{Г}'' / I_{\Sigma}''$ (если $I_{Г}'' / I_{\Sigma}'' < 0,5$, что соответствует большой электрической удаленности генератора от точки КЗ или малой его мощности, то генератор целесообразно объединить с электрической системой);

4) по кривой $I_{пт} / I_{Г}'' = f(t)$ на рис. 5.7 при известном значении $(I_{Г}'' / I_{Г,ном})_t$ для расчетного момента времени t находят отношение $I_{пт} / I_{Г}''$

и по нему и кривой со значением $I_{Г}'' / I_{\Sigma}''$ устанавливают значение $(I_{пт\Sigma}'' / I_{\Sigma}'')$;

5) по найденному отношению $(I_{пт\Sigma}'' / I_{\Sigma}'')$ и известному значению I_{Σ}'' вычисляют периодическую составляющую тока в точке КЗ, пользуясь выражением

$$I_{пт\Sigma} = (I_{пт\Sigma}'' / I_{\Sigma}'') I_{\Sigma}'. \quad (5.19)$$

Суммарный ток в точке КЗ, создаваемый несколькими источниками, рассчитывают по формуле

$$I_{птI, \dots, N} = I_{птI} + I_{птII} + \dots + I_{птN}. \quad (5.20)$$

Заметим, что выделять много генерирующих ветвей в схеме СЭС нецелесообразно. Схему любой сложности достаточно свести к двум-трем генерирующим ветвям, включая в каждую из них источники питания (генераторы или станции), находящиеся приблизительно на одинаковой удаленности от места КЗ.

Пример 5.4. При трехфазном КЗ поочередно в точках K_1 и K_2 СЭС, схема которой изображена на рис. 5.9, а, определить значение тока в месте повреждения через 2,3 с после начала КЗ. Генераторы имеют АРВ. Выключатель QF отключен.

Решение. На рис. 5.9, б показана схема замещения СЭС, где параметры ее элементов выражены в относительных единицах при $S_6 = 1000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_{6I} = 115 \text{ кВ}$ и $U_{6II} = 6,3 \text{ кВ}$.

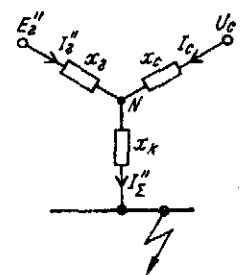


Рис. 5.8. Схема замещения участка СЭС при подпитке точки КЗ от генератора и электрической системы

При КЗ в точке K_1 генератор $G1$ можно рассматривать вместе с питающей системой C , а генератор $G2$ следует учитывать отдельно. Сопротивления элементов схемы замещения

$$x_{*1} = x_{*с} S_6 / S_c = 0,5 \cdot 1000 / 400 = 1,25;$$

$$x_{*2} = x_{*3} = x_{01} l_1 S_6 / U_{6I}^2 = 0,4 \cdot 140 \cdot 1000 / 115^2 = 4,23;$$

$$x_{*4} = x_{*5} = u_{к} S_6 / (100 S_{TP}) = 10,5 \cdot 1000 / (100 \cdot 60) = 1,75;$$

$$x_{*6} = x_{*7} = x_{*d} S_6 / S_r = 0,143 \cdot 1000 / 37,5 = 3,81;$$

$$x_{*8} = x_{02} l_2 S_6 / U_{6II}^2 = 0,08 \cdot 1 \cdot 1000 / 6,3^2 = 2,02.$$

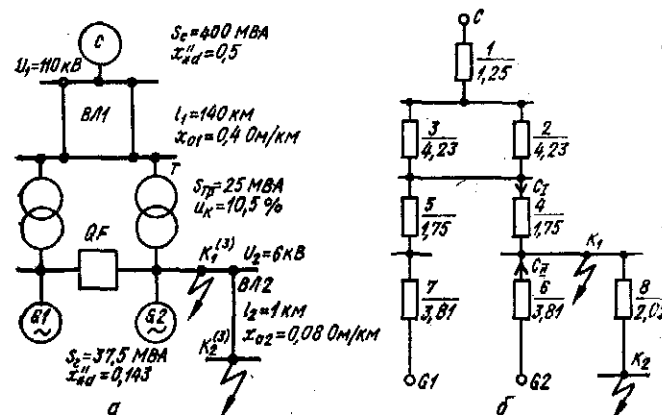


Рис. 5.9. К примеру 5.4

Результирующие сопротивления в схеме со стороны генератора $G1$ и системы до точки K_1

$$x_{*9} = x_{*2} / 2 = 4,23 / 2 = 2,115;$$

$$x_{*10} = x_{*1} + x_{*9} = 1,25 + 2,115 = 3,36;$$

$$x_{*11} = x_{*5} + x_{*7} = 1,75 + 3,81 = 5,56;$$

$$x_{*12} = x_{*10} x_{*11} / (x_{*10} + x_{*11}) = 3,36 \cdot 5,56 / (3,36 + 5,56) = 2,1;$$

$$x_{*13} = x_{*12} + x_{*4} = 2,1 + 1,75 = 3,85.$$

Расчетное сопротивление в схеме

$$x_{*расчI} = x_{*13} (S_c + S_r) / S_6 = 3,85 (400 + 37,5) / 1000 = 1,68.$$

По расчетным кривым рис. 5.5 для турбогенераторов средней мощности при $t = 2,3$ с относительное значение тока $I_{*птI} = 0,7$. Для генератора $G2$ по тем же кривым при

$$x_{*расч} = x_{*6} S_r / S_6 = 3,81 \cdot 37,5 / 1000 = 0,14$$

и $t = 2,3$ с относительное значение тока $I_{*птII} = 2,8$.

Номинальные токи при напряжении 6 кВ:

$$I_1 = (S_c + S_r) / (\sqrt{3} U_2) = (400 + 37,5) / (\sqrt{3} \cdot 6) = 42,1 \text{ кА};$$

генератора $G2$

$$I_{r2} = S_r / (\sqrt{3} U_2) = 37,5 / (\sqrt{3} \cdot 6) = 3,61 \text{ кА}.$$

Ток КЗ в точке K_1

$$I_{K_1} = I_{*nt1}I_1 + I_{*nt1}I_{r2} = 0,7 \cdot 42,1 + 2,8 \cdot 3,61 = 39,57 \text{ кА.}$$

Для определения тока КЗ в точке K_2 рассчитаем коэффициенты токораспределения. Результирующие сопротивления до этой точки

$$x_{*14} = x_{*13}x_{*6}/(x_{*13} + x_{*6}) = 3,85 \cdot 3,81/(3,85 + 3,81) = 1,91;$$

$$x_{*15} = x_{*8} + x_{*14} = 2,02 + 1,91 = 3,93.$$

Коэффициенты токораспределения:
для генератора $G2$

$$c_{11} = x_{*15}/x_{*6} = 3,93/3,81 = 1,03;$$

для генератора $G1$ и системы C

$$c_1 = x_{*15}/x_{*13} = 3,93/3,85 = 1,02.$$

Расчетные сопротивления ветвей:
генератора $G2$

$$x_{*расч11} = x_{*15}S_r/(c_{11}S_6) = 3,93 \cdot 37,5/(1,03 \cdot 1000) = 0,143;$$

генератора $G1$ и системы C

$$x_{*расч1} = x_{*15}(S_r + S_c)/(c_1S_6) = 3,93(400 + 37,5)/(1,02 \cdot 1000) = 1,685.$$

По расчетным кривым рис. 5.5 для турбогенераторов средней мощности при $t = 2,3$ с находим соответственно $I_{*nt1} = 0,65$ и $I_{*nt1} = 2,7$.

Ток КЗ в точке K_2

$$I_{K_2} = I_{*nt1}I_1 + I_{*nt1}I_{r2} = 0,65 \cdot 42,1 + 2,7 \cdot 3,61 = 37,1 \text{ кА.}$$

Пример 5.5. Определить ток трехфазного КЗ в точке K электростанции, схема которой изображена на рис. 5.10, a , в момент времени $t = 0,2$ с.

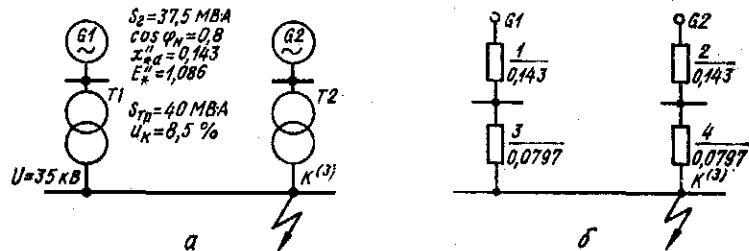


Рис. 5.10. К примеру 5.5

Решение. Сопротивления элементов схемы замещения электростанции (рис. 5.10, b) в относительных единицах при $S_6 = 37,5 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_6 = 37 \text{ кВ}$ и $I_6 = S_6/(\sqrt{3}U_6) = 37,5/(\sqrt{3} \cdot 37) = 0,585 \text{ кА}$

$$x_{*1} = x_{*2} = x_{*d}''S_6/S_c = 0,143 \cdot 37,5/37,5 = 0,143;$$

$$x_{*3} = x_{*4} = u_k S_6/(100S_{tr}) = 8,5 \cdot 37,5/(100 \cdot 40) = 0,08.$$

Номинальный ток каждого генератора

$$I_{r.ном} = S_r/(\sqrt{3}U_{ном}) = 37,5/(\sqrt{3} \cdot 35) = 0,619 \text{ кА.}$$

Оба генератора находятся в одинаковых условиях относительно точки КЗ. Поэтому рассматриваем их как один эквивалентный генератор с результирующим сопротивлением

$$x_{*рез.6} = (x_{*1} + x_{*3})/2 = (0,143 + 0,08)/2 = 0,111.$$

Начальный ток, создаваемый эквивалентным генератором при трехфазном КЗ в точке K ,

$$I_r^{(3)} = E_n''I_6/x_{*рез.6} = 1,086 \cdot 0,585/0,111 = 5,725 \text{ кА.}$$

Отношение тока эквивалентного генератора при трехфазном КЗ к номинальному току отдельных генераторов

$$I_r''/I_{r.ном} = I_r^{(3)}/(2I_{r.ном}) = 5,725/(2 \cdot 0,619) = 4,62.$$

По кривым рис. 5.7 для $t = 0,2$ с находим $I_{nt}/I_r'' = 0,75$. Ток трехфазного КЗ в точке K , создаваемый эквивалентным генератором в момент времени $t = 0,2$ с,

$$I_{nt=0,2} = (I_{nt}/I_r'') I_r^{(3)} = 0,75 \cdot 5,725 = 4,29 \text{ кА.}$$

Пример 5.6. Определить ток трехфазного КЗ в точках K_1 и K_2 СЭС, схема которой показана на рис. 5.11, a , в момент времени $t = 0,2$ с.

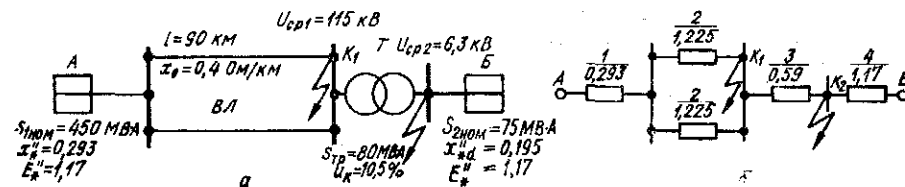


Рис. 5.11. К примеру 5.6

Решение. Сопротивления элементов схемы замещения (рис. 5.11, b) при $S_6 = 450 \text{ МВ} \cdot \text{А}$

$$x_{*1} = x_{*6}''S_6/S_{1ном} = 0,293 \cdot 450/450 = 0,293;$$

$$x_{*2} = x_0 l S_6/U_{cp1}^2 = 0,4 \cdot 90 \cdot 450/115^2 = 1,225;$$

$$x_{*3} = u_k S_6/(100S_{tr}) = 10,5 \cdot 450/(100 \cdot 80) = 0,59;$$

$$x_{*4} = x_{*d}''S_6/S_{2ном} = 0,195 \cdot 450/75 = 1,17.$$

Номинальные токи генераторов теплоэлектростанции (ТЭЦ) A

$$I_{1ном} = I_{16} = S_{1ном}/(\sqrt{3}U_{cp1}) = 450/(\sqrt{3} \cdot 115) = 2,26 \text{ кА};$$

$$I_{2ном} = I_{26} = S_{1ном}/(\sqrt{3}U_{cp2}) = 450/(\sqrt{3} \cdot 6,3) = 41,24 \text{ кА.}$$

Короткое замыкание в точке K_1 . Результирующее сопротивление в схеме при объединении генераторов ТЭЦ A и ТЭЦ B

$$x_{*1рез} = (0,293 + 0,612)(0,59 + 1,17)/(0,293 + 0,612 + 0,59 + 1,17) = 0,597.$$

Начальный ток трехфазного КЗ, создаваемый эквивалентным источником мощностью $S_{\Sigma ном} = 525 \text{ МВ} \cdot \text{А}$,

$$I_r^{(3)} = E_n''I_{16}/x_{*1рез} = 1,17 \cdot 2,26/0,597 = 4,43 \text{ кА.}$$

Относительный номинальный ток этого источника

$$I_{* \Sigma ном} = S_{\Sigma ном}/S_{1ном} = 525/450 = 1,167.$$

Отношение начального тока КЗ эквивалентного источника к его номинальному току

$$I_{*r}/I_{* \Sigma ном} = (E_n''/x_{*1рез})/I_{* \Sigma ном} = (1,17/0,597)/1,167 = 1,68.$$

По кривым рис. 5.7 для $t = 0,2$ с находим $I_{пт}/I_{Г}'' = 0,93$. Ток трехфазного КЗ, создаваемый эквивалентным источником в момент времени $t = 0,2$ с,

$$I_{пт=0,2}^{(3)} = (I_{пт}/I_{Г}'') I_{\Sigma}''^{(3)} = 0,93 \cdot 4,43 = 4,12 \text{ кА.}$$

Короткое замыкание в точке K_2 . Оба генератора рассматриваем независимо друг от друга. Результирующее сопротивление ветви ТЭЦ А до точки K_2

$$x_{*резА} = x_{*1} + x_{*2}/2 + x_{*3} = 0,293 + 0,612 + 0,59 = 1,495.$$

Результирующее сопротивление генератора ТЭЦ Б до точки K_2

$$x_{*резБ} = x_{*4} = 1,17.$$

Начальные токи трехфазного КЗ, создаваемые генераторами

$$I_A''^{(3)} = E_*'' I_{26}/x_{*резА} = 1,17 \cdot 41,24/1,495 = 32,28 \text{ кА;}$$

$$I_B''^{(3)} = E_*'' I_{26}/x_{*резБ} = 1,17 \cdot 41,24/1,17 = 41,24 \text{ кА.}$$

Отношения токов КЗ к номинальным токам генераторов:

$$(I''/I_{Г.ном})_А = E_*''/(x_{*резА} I_{*Аном}) = 1,17/(1,495 \cdot 1) = 0,783;$$

$$(I''/I_{Г.ном})_Б = E_*''/(x_{*резБ} I_{*Бном}) = 1,17/(1,17 \cdot 0,167) = 1,$$

где $I_{*Аном} = 450/450 = 1$; $I_{*Бном} = 75/450 = 0,167$.

Так как для ТЭЦ А ток КЗ в точке K_2 меньше номинального (удаленная точка КЗ), считаем, что при $t = 0,2$ с $I_A''^{(3)} = I_{пт}'' = 32,28$ кА.

Для ТЭЦ Б по кривым рис. 5.7 при $t = 0,2$ с находим $I_{пт}/I_{Г}'' = 0,68$.

Суммарный ток трехфазного КЗ, создаваемый генераторами в момент времени $t = 0,2$ с,

$$I_{\Sigma}''^{(3)} = I_A''^{(3)} + (I_{пт}/I_{Г}'') I_B''^{(3)} = 32,28 + 0,68 \cdot 41,24 = 60,3 \text{ кА.}$$

При расчете тока КЗ в точке K_2 по эквивалентному источнику с результирующим сопротивлением

$$x_{*рез} = x_{*резА} x_{*резБ}/(x_{*резА} + x_{*резБ}) = 1,495 \cdot 1,17/(1,495 + 1,17) = 0,656$$

начальный ток КЗ в данной точке

$$I_{\Sigma}''^{(3)} = E_*'' I_{26}^{(3)}/x_{*рез} = 1,17 \cdot 41,24/0,656 = 73,55 \text{ кА;}$$

его отношение к номинальному току источника

$$I_{\Sigma}''^{(3)}/I_{\Sigma ном} = E_*''/(x_{*рез} I_{*Сном}) = 1,17/(0,656 \cdot 1,167) = 1,53.$$

По кривым рис. 5.7 для $t = 0,2$ с находим $I_{пт}/I_{Г}'' = 0,94$. Ток КЗ, создаваемый эквивалентным источником,

$$I_{пт=0,2}^{(3)} = (I_{пт}/I_{Г}'') I_{\Sigma}''^{(3)} = 0,94 \cdot 73,55 = 69,14 \text{ кА.}$$

Погрешность расчета

$$\gamma = (69,14 - 60,3) \cdot 100/60,3 = 14,7 \%,$$

что недопустимо [21].

Пример 5.7. Определить ток трехфазного КЗ в точке К СЭС, схема которой изображена на рис. 5.12, а, в момент времени $t = 0,1$ с.

Решение. Сопротивления элементов схемы замещения (рис. 5.12, б) в относительных единицах при $S_6 = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_{ср1} = 115 \text{ кВ}$, $U_{ср2} = 37 \text{ кВ}$ и $U_6 = 10,5 \text{ кВ}$

$$x_{*1} = x_*'' S_6/S_C = 0,7 \cdot 100/200 = 0,35;$$

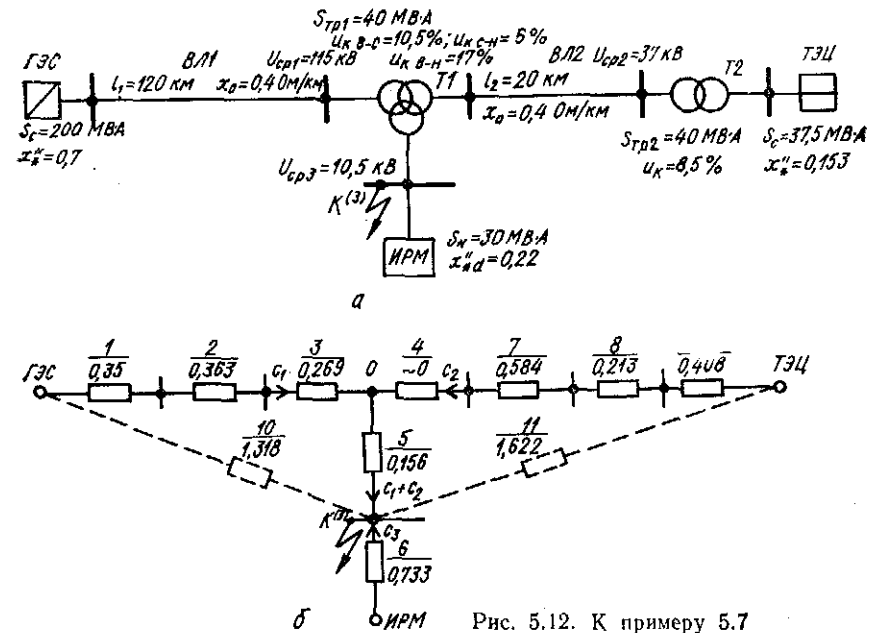


Рис. 5.12. К примеру 5.7

$$x_{*2} = x_0'' S_6/U_{ср1}^2 = 0,4 \cdot 120 \cdot 100/115^2 = 0,363;$$

$$x_{*3} = (u_{кв-с} + u_{кв-н} - u_{кв-н}) S_6/(200 S_{Т1}) = (10,5 + 17 - 6) \cdot 100/(200 \cdot 40) = 0,263;$$

$$x_{*4} = (u_{кв-с} + u_{кв-н} - u_{кв-н}) S_6/(200 S_{Т1}) = (10,5 + 6 - 17) \cdot 100/(200 \cdot 40) = 0,006;$$

$$x_{*5} = (u_{кв-н} + u_{кв-н} - u_{кв-с}) S_6/(200 S_{Т1}) = (17 + 6 - 10,5) \cdot 100/(200 \cdot 40) = 0,156;$$

$$x_{*6} = x_*'' S_6/S_H = 0,22 \cdot 100/30 = 0,733;$$

$$x_{*7} = x_0'' S_6/U_{ср2}^2 = 0,4 \cdot 20 \cdot 100/37^2 = 0,584;$$

$$x_{*8} = u_* S_6/(100 S_{Т2}) = 8,5 \cdot 100/(100 \cdot 40) = 0,213;$$

$$x_{*9} = x_*'' S_6/S_C = 0,153 \cdot 100/37,5 = 0,408.$$

Все источники в СЭС рассматриваем независимо друг от друга. Для определения сопротивлений, связывающих источники с точкой КЗ, выполним соответствующие преобразования схемы замещения и найдем коэффициенты токораспределения c_1 , c_2 и c_3 .

Сопротивления ветвей СЭС от ГЭС и ТЭЦ до точки О соответственно

$$x_{*ГЭС} = x_{*1} + x_{*2} + x_{*3} = 0,35 + 0,363 + 0,269 = 0,982;$$

$$x_{*ТЭЦ} = x_{*9} + x_{*8} + x_{*7} = 0,408 + 0,213 + 0,584 = 1,205.$$

Суммарное сопротивление ветвей ГЭС и ТЭЦ до точки КЗ

$$x_{*Σ} = 0,982 \cdot 1,205/(0,982 + 1,205) + 0,156 = 0,697.$$

Результирующее сопротивление в схеме

$$x_{*рез} = x_{*\Sigma} x_{*6} / (x_{*\Sigma} + x_{*6}) = 0,697 \cdot 0,733 / (0,697 + 0,733) = 0,365.$$

Коэффициенты токораспределения

$$c_3 = x_{*рез} / x_{*6} = 0,365 / 0,733 = 0,498;$$

$$c_1 + c_2 = 1 - 0,498 = 0,502;$$

$$c_1 = (c_1 + c_2) x_{*ГЭС} / (x_{*ГЭС} + x_{*ТЭЦ}) = 0,502 \cdot 1,205 / (0,982 + 1,205) = 0,277;$$

$$c_2 = 0,502 - 0,277 = 0,225.$$

Сопротивления ветвей источников ГЭС и ТЭЦ

$$x_{*10} = x_{*рез} / c_1 = 0,365 / 0,277 = 1,318;$$

$$x_{*11} = x_{*рез} / c_2 = 0,365 / 0,225 = 1,622.$$

Расчетные сопротивления элементов цепи КЗ:
ветви ГЭС

$$x_{*ГЭС\ расч} = x_{*10} S_{ГЭС} / S_6 = 1,318 \cdot 200 / 100 = 2,636;$$

синхронного компенсатора

$$x_{*с.к.\ расч} = x_{*6} S_{с.к.} / S_6 = 0,733 \cdot 30 / 100 = 0,22;$$

ветви ТЭЦ

$$x_{*ТЭЦ\ расч} = x_{*11} S_{ТЭЦ} / S_6 = 1,622 \cdot 37,5 / 100 = 0,61.$$

По рис. 5.5 и 5.6 для $t = 0,1$ с находим генерируемые токи: $I_{*пГЭС} = 0,39$;

$$I_{*пс.к} = 3,2 \text{ и } I_{*птЭЦ} = 1,47.$$

Номинальные токи при $U_{ср3} = 10,5$ кВ:

ГЭС

$$I_{ГЭС\ ном} = S_G / (\sqrt{3} U_{ср3}) = 200 / (\sqrt{3} \cdot 10,5) = 11 \text{ кА};$$

синхронного компенсатора

$$I_{с.к.\ ном} = S_{с.к.} / (\sqrt{3} U_{ср3}) = 37,5 / (\sqrt{3} \cdot 10,5) = 2,06 \text{ кА};$$

ТЭЦ

$$I_{ТЭЦ\ ном} = S_{ТЭЦ\ ном} / (\sqrt{3} U_{ср3}) = 30 / (\sqrt{3} \cdot 10,5) = 1,65 \text{ кА}.$$

Суммарный ток трехфазного КЗ, создаваемый всеми источниками в момент времени $t = 0,1$ с,

$$I_{п\Sigma}^{(3)} = 0,39 \cdot 11 + 3,8 \cdot 1,65 + 1,47 \cdot 2,06 = 18,1 \text{ кА}.$$

Если при расчете токов в точке К все источники в СЭС учитывать совместно, то расчетное сопротивление

$$x_{*\ расч} = x_{*рез} S_{\Sigma} / S_6 = 0,365 \cdot 267,5 / 100 = 0,976.$$

По расчетным кривым рис. 5.6 для $t = 0,1$ с находим ток $I_{*\Sigma} = 1,05$. Ток трехфазного КЗ, создаваемый всеми источниками в СЭС,

$$I_{п\Sigma}^{(3)} = 1,05 (11 + 1,65 + 2,06) = 15,4 \text{ кА}.$$

Погрешность расчета

$$\gamma = (15,4 - 12,6) \cdot 100 / 12,6 = 22,6 \%,$$

что недопустимо [21].

5.4. Учет электродвигателей при расчете токов короткого замыкания

Точка КЗ в СЭС может питаться не только от ЭЭС или отдельных электростанций, но и от электродвигателей, которые при внезапном КЗ в СЭС продолжают по инерции вращаться, переходят в генераторный режим и генерируют ток к месту повреждения. В переходном процессе этот ток у синхронного двигателя спадает до установившегося значения (определяется током возбуждения), у асинхронного двигателя — до нуля. Увеличение тока в месте КЗ из-за перехода двигателей в генераторный режим может быть весьма существенным, если мощный двигатель или группа двигателей подключены вблизи точки КЗ, что характерно для сетей и электроустановок напряжением 6—10 кВ с двигателями мощностью 1000 кВт и более.

При расчете токов КЗ обычно учитывают только те двигатели, которые связаны с местом КЗ непосредственно через КЛ или токопроводы, линейные реакторы или двухобмоточный трансформатор. Не учитывают токи, генерируемые двигателями, подключенными к секции промышленной подстанции, которая связана с другой секцией, где имеется КЗ, через трансформатор с расщепленной обмоткой или через двоянный реактор. В этом случае надо учитывать токи только тех двигателей, которые присоединены ко второй секции.

Ток, генерируемый двигателями, учитывают при проверке аппаратов и проводников РУ 6—10 кВ по условиям КЗ, а также при расчете релейной защиты электроустановок. С этой целью определяют сверхпереходный ток двигателя $I_{дв}$, ударный ток $i_{у,дв}$, а также периодическую $I_{дв}$, $I_{двт}$ и аperiodическую $i_{а,дв}$, $i_{а,двт}$ составляющие тока в любой момент t переходного процесса и в момент τ отключения КЗ. При определении токов, генерируемых двигателями в случае КЗ, за базисные величины принимают номинальные напряжения и мощность (ток) двигателей.

Методика расчета токов КЗ с учетом электродвигателей зависит от места их размещения в расчетной схеме. Расчетные схемы могут быть двух видов:

- 1) радиальные, в которых каждый двигатель связан с точкой КЗ индивидуальным внешним сопротивлением $z_{внi}$ (рис. 5.13, а);
- 2) сложные, в которых точка КЗ находится за общим сопротивлением группы двигателей (рис. 5.13, б) или за общим сопротивлением группы двигателей и системы (рис. 5.13, в).

При включении по радиальной схеме разнотипных двигателей их следует учитывать индивидуально. Остальная часть схемы должна быть преобразована относительно точки КЗ для определения ее результирующего сопротивления и расчета соответствующего тока КЗ $I_{кi}^{(3)}$.

В случае асинхронного двигателя начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ с учетом внешнего сопротивления, через которое двигатель подключен к сборным шинам

подстанции, определяется выражением

$$I_{дв}'' = E_*'' I_{ном} / \sqrt{(x_*'' + x_{*вн})^2 + I_{*вн}^2}, \quad (5.21)$$

где E_*'' — сверхпереходная э. д. с. двигателя, определяемая по формуле (5.1); x_*'' — сверхпереходное сопротивление двигателя, определяемое по формуле (2.1). При отсутствии исходных данных приближенно считают, что $E_*'' = 0,9$.

Полное внешнее сопротивление можно не учитывать при $z_{*вн} \leq (0,1 \div 0,2) x_*''$ (сопротивление кабелей длиной не более 200—300 м

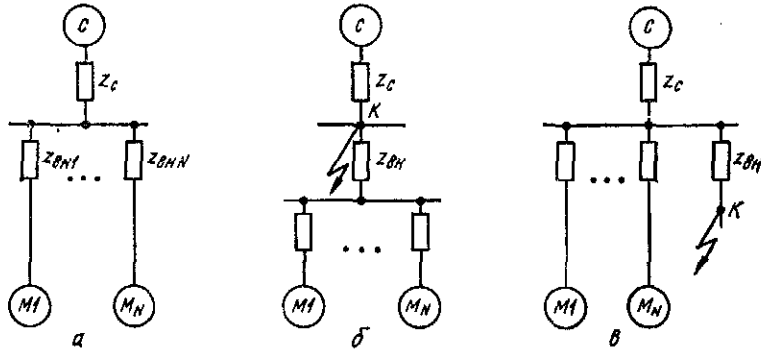


Рис. 5.13. Расчетные схемы с электродвигателями

и сечением не менее 50—70 мм²). В этом случае при расчетах сверхпереходный ток находят по формулам:

для асинхронных двигателей (кроме серий ВДД и ДВДА)

$$I_{дв}'' = I_{*пуск} I_{ном}; \quad (5.22)$$

для таких же двигателей серий ВДД и ДВДА

$$I_{дв}'' = 1,2 I_{*пуск} I_{ном}. \quad (5.23)$$

Если внешнее сопротивление $z_{*вн} > (0,1 \div 0,2) x_*''$, то его необходимо учитывать в расчете. При этом сверхпереходный ток определяют по формулам:

для асинхронных двигателей (кроме серий ВДД и ДВДА)

$$I_{дв}'' = I_{*пуск} I_{ном} / (1 + z_{*вн} / x_*''); \quad (5.24)$$

для таких же двигателей серий ВДД и ДВДА

$$I_{дв}'' = 1,2 I_{*пуск} I_{ном} (1 + z_{*вн} / x_*''). \quad (5.25)$$

Периодическая составляющая тока КЗ, создаваемая асинхронным двигателем в произвольный момент времени переходного процесса, определяется выражением

$$I_{дв}' = I_{дв}'' \exp(-t/T_{дв.расч}'), \quad (5.26)$$

где $T_{дв.расч}'$ — расчетная постоянная времени периодического тока двигателя при КЗ на его зажимах (табл. 5.2). Для двигателей серии АТД

$$T_{дв.расч}' = 0,06 / s_{ном},$$

где $s_{ном}$ — номинальное скольжение, %.

Если внешнее сопротивление, через которое двигатель подключен к сети, учитывают, то постоянную времени, входящую в (5.26), определяют по формуле

$$T_{расч}' = T_{дв.расч}' (1 + x_{*вн} / x_*''). \quad (5.27)$$

Таблица 5.2. Значения постоянных времени и ударных коэффициентов асинхронных двигателей при КЗ на их зажимах

Параметр	Двигатели серий						
	А	ЛО	ЛАЗО	АТД	АТМ	ВДД, ДВДА	ДАМСО
$T_{дв.расч}',$ с	0,04	0,04	0,09	0,6	0,075	0,06	0,044
$T_{а.дв.},$ с	0,04	0,03	0,02	0,058	0,043	0,05	0,035
$k_{у.дв}$	1,56	1,49	1,5	—	1,67	1,66	1,55

В случае синхронного двигателя начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ с учетом внешнего сопротивления также вычисляют по (5.21), но вместо x_*'' подставляют $x_{*д.}$ Э. д. с. E_*'' при этом находят по формуле (5.1), считая, что до КЗ двигатель работал в номинальном режиме с перевозбуждением ($U_{*д(0)} = 1, I_{*д(0)} = 1$). Если за базисные величины приняты мощность S_6 , напряжение U_6 и ток I_6 , то в (5.21) должны быть базисными ток и сопротивления. При отсутствии исходных данных приближенно принимают $E_*'' = 1,1$.

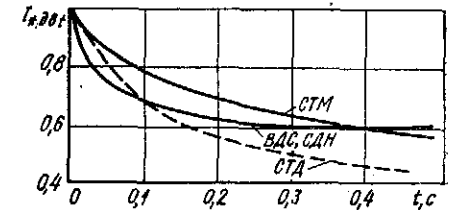


Рис. 5.14. Расчетные кривые для определения тока КЗ, создаваемого синхронными двигателями

Для определения начального действующего значения периодической составляющей тока КЗ, создаваемого синхронным двигателем, можно воспользоваться также выражением (5.23) или (5.25).

Периодическую составляющую тока КЗ в любой момент времени аварийного процесса находят по расчетным кривым для синхронных двигателей (рис. 5.14), где она выражена в долях начального тока КЗ $I_{дв}'$, т. е.

$$I_{дв}' = I_{*дв}'' I_{дв}'. \quad (5.28)$$

Ток КЗ, создаваемый синхронными двигателями, подключенными к системе, рекомендуется определять с учетом сопротивлений, приведенных к их номинальной мощности. При построении кривых на рис. 5.14 кратность форсировки возбуждения принята равной 1,4, а постоянная времени нарастания напряжения на кольцах ротора — нулю.

Апериодическую составляющую тока КЗ, создаваемую синхронными и асинхронными двигателями в любой момент времени аварийного процесса, рассчитывают по формуле

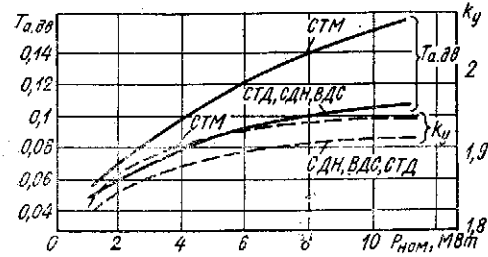


Рис. 5.15. Кривые для определения постоянных времени затухания апериодической составляющей тока КЗ и ударного коэффициента синхронных двигателей

При учете внешнего сопротивления постоянную времени $T_{а.дв}$, входящую в (5.29), находят по формулам: для асинхронных двигателей

$$T_{а.дв} = (x_* + x_{*вн}) / (\omega (x_* / (\omega T_{а.дв}) + r_{*вн})); \quad (5.30)$$

для синхронных двигателей

$$T_{а.дв} = (x'_{*д} + x_{*вн}) / (\omega (x'_{*д} / (\omega T_{а.дв}) + r_{*вн})). \quad (5.31)$$

Ударный ток КЗ, создаваемый асинхронным и синхронным двигателями, определяется выражением

$$i_{у.дв} = k_{у.дв} \sqrt{2} I''_{дв}, \quad (5.32)$$

где $k_{у.дв}$ — ударный коэффициент с учетом внешнего сопротивления, который рассчитывают по формулам:

для асинхронного двигателя

$$k_{у.дв} = \exp(-0,01/T'_{расч}) + \exp(-0,01/T_a); \quad (5.33)$$

для синхронного двигателя

$$k_{у.дв} = 1 + \exp(-0,01/T_a). \quad (5.34)$$

Если внешнее сопротивление не учитывают ($z_{*вн} \leq (0,1 \div 0,2) x'_{*д}$ или $z_{*вн} \leq (0,1 \div 0,2) x'_*$), то значение ударного коэффициента определяют по табл. 5.2. (асинхронные двигатели) или по кривым на рис. 5.15 (синхронные двигатели).

Ток в месте КЗ в радиальной схеме находят суммированием периодических и апериодических составляющих токов всех источни-

ков в СЭС:

$$I_{к'} = I_{с'} + I_{\Sigma дв}; \quad (5.35)$$

$$i_{а'} = \sqrt{2} I'_c \exp(-t/T_{а.с}) + \sqrt{2} I''_{\Sigma дв} \exp(-t/T_{а.дв}). \quad (5.36)$$

Ударный ток в месте КЗ определяется выражением

$$i_y = \sqrt{2} k_{y.c} I'_c + \sqrt{2} k_{y.\Sigma дв} I''_{\Sigma дв}. \quad (5.37)$$

При расчете сложных схем короткозамкнутой цепи, в которых электродвигатели соединены с точкой КЗ через общее сопротивление (см. рис. 5.13, б), асинхронные и синхронные двигатели заменяют эквивалентными электродвигателями и определяют начальное значение периодической составляющей суммарного тока группы двигателей при КЗ на сборных шинах этой группы по формуле

$$I''_{\Sigma дв} = I''_{\Sigma а.дв} + I''_{\Sigma с.дв}, \quad (5.38)$$

где ток $I''_{\Sigma а.дв}$ для группы асинхронных двигателей (кроме серий ВДД и ДВДА) рассчитывают по (5.22), а ток $I''_{\Sigma с.дв}$ для группы синхронных двигателей или асинхронных двигателей вертикального исполнения — (5.23).

Для эквивалентного двигателя также рассчитывают: суммарный номинальный ток

$$I_{эк.ном} = I_{\Sigma а.дв.ном} + 1,2 I_{\Sigma с.дв.ном}; \quad (5.39)$$

кратность пускового тока

$$I_{*эк.пуск} = I''_{\Sigma дв} / I_{эк.ном}; \quad (5.40)$$

сверхпереходное сопротивление

$$x'_{*эк} = 1 / I_{*эк.пуск}; \quad (5.41)$$

постоянную времени затухания периодической составляющей тока

$$T'_{эк} = (T'_{\Sigma а.дв.расч} I''_{\Sigma а.дв} + T'_{\Sigma с.дв.расч} I''_{\Sigma с.дв}) / I''_{\Sigma дв}; \quad (5.42)$$

постоянную времени затухания апериодической составляющей тока

$$T_{а.эк} = (T_{а.\Sigma а.дв} I''_{\Sigma а.дв} + T_{а.\Sigma с.дв} I''_{\Sigma с.дв}) / I''_{\Sigma дв}, \quad (5.43)$$

где $I_{\Sigma а.дв.ном}$, $I_{\Sigma с.дв.ном}$ — номинальные токи группы асинхронных и синхронных двигателей; $T'_{\Sigma а.дв.расч}$, $T'_{\Sigma с.дв.расч}$ — расчетные постоянные времени затухания периодической составляющей тока группы асинхронных (см. табл. 5.2) и синхронных (рис. 5.16) двигателей; $T_{а.\Sigma а.дв}$, $T_{а.\Sigma с.дв}$ — постоянные времени затухания апериодической составляющей тока группы асинхронных (см. табл. 5.2) и синхронных (см. рис. 5.15) двигателей.

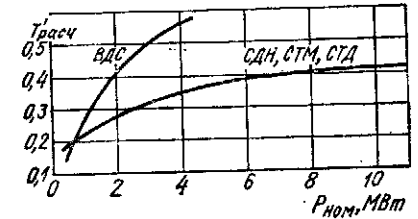


Рис. 5.16. Кривые для определения постоянных времени затухания синхронных двигателей

Начальное значение периодической составляющей, создаваемой эквивалентным электродвигателем при КЗ за внешним сопротивлением, определяется выражением

$$I''_{\text{ЭК}} \approx I_{*\text{ЭК.пуск}} I_{\text{ЭК.ном}} / (1 + z_{*\text{ВН}} / x''_{*\text{ЭК}}), \quad (5.44)$$

где $z_{*\text{ВН}}$ — внешнее сопротивление при базисных условиях, соответствующих номинальным данным эквивалентного электродвигателя.

Периодическую составляющую тока КЗ, создаваемого эквивалентным электродвигателем, рассчитывают по формуле

$$I_{\text{ЭК}t} = I''_{\text{ЭК}} \exp(-t/T'), \quad (5.45)$$

где $T' = T'_{\text{ЭК}} (1 + x_{*\text{ВН}} / x''_{*\text{ЭК}});$

апериодическую составляющую этого же тока — по формуле

$$i_{\text{а.ЭК}t} = \sqrt{2} I''_{\text{ЭК}} \exp(-t/T_{\text{а}}), \quad (5.46)$$

где $T_{\text{а}} = (x''_{*\text{ЭК}} + x_{*\text{ВН}}) / (\omega (x''_{*\text{ЭК}} / (\omega T_{\text{а.ЭК}}) + r_{*\text{ВН}})).$

Ударный ток КЗ, создаваемый эквивалентным электродвигателем, определяется выражением

$$I_{\text{у}} = k_{\text{у.ЭК}} \sqrt{2} I''_{\text{ЭК}}, \quad (5.47)$$

где $k_{\text{у.ЭК}} = \exp(-0,01/T') + \exp(-0,01/T_{\text{а}}).$

Если точка КЗ в схеме находится за общим сопротивлением группы двигателей и системы (см. рис. 5.13, *б*), то токи КЗ рассчитывают в соответствии с рекомендациями п. 5.3 и рассмотренным порядком определения токов КЗ в сложных схемах замещения СЭС.

5.5. Учет токов короткого замыкания, создаваемых электродвигателями в установках собственных нужд тепловых электростанций

При выборе аппаратов и кабелей сетей собственных нужд тепловых электростанций (ТЭС) необходимо учитывать токи, генерируемые при КЗ электродвигателями установок собственных нужд. Для определения этих токов на ответвлении от секции собственных нужд рекомендуется групповой учет электродвигателей. В этом случае электродвигатели, участвующие в подпитке точки КЗ, заменяют эквивалентным электродвигателем с суммарной мощностью $P_{\Sigma\text{ном}}$ и средними расчетными параметрами, указанными ниже:

Коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{ЭК}}$	0,87
К. п. д. $\eta_{\text{ЭК}}$	0,94
Кратность пускового тока $I_{*\text{ЭК.пуск}}$	5,6
Постоянная времени затухания периодической составляющей тока $T'_{\text{ЭК}}$, с	0,07

Постоянная времени затухания апериодической составляющей тока $T'_{\text{а.ЭК}}$, с	0,04
Ударный коэффициент $k_{\text{у.ЭК}}$	1,65

Расчетное состояние электроустановки собственных нужд при КЗ следует выбирать с учетом принятой схемы рабочего и резервного электроснабжения. За расчетные условия КЗ при явно выраженном резерве целесообразно принимать режим КЗ, при котором секция собственных нужд питается по цепи с меньшим сопротивлением, а в подпитке места КЗ участвуют все электродвигатели секции. При скрытом резервировании считают, что один из рабочих трансформаторов собственных нужд отключен и в подпитке места КЗ участвуют электродвигатели двух секций, связанных между собой резервным токопроводом.

Расчет токов КЗ с целью выбора или проверки проводников и аппаратов в системе собственных нужд ТЭС предусматривает определение ряда параметров. Прежде всего на основе полученной схемы замещения цепи электроснабжения секции собственных нужд находят периодическую составляющую тока КЗ, создаваемого системой. Постоянная времени затухания апериодической составляющей тока от системы $T_{\text{а.с}}$ может быть определена по кривой (рис. 5.17), построенной в зависимости от номинальной мощности $S_{\text{тр.ном}}$ трансформатора, питающего секцию. При использовании трансформатора с расщепленными обмотками под $S_{\text{тр.ном}}$ понимают номинальную мощность обмотки, к которой присоединена секция собственных нужд. Если трансформатор связан с секцией через прогяженный токопровод, то постоянную времени рассчитывают с учетом сопротивления токопровода по формуле

$$T_{\text{а.с}} = x_{\text{рез.с}} / (\omega r_{\text{рез.с}}).$$

Далее определяют:

начальное значение периодической составляющей тока КЗ, создаваемого электродвигателями секции (двух секций — при скрытом резервировании),

$$I''_{\text{ЭК}} = I_{*\text{ЭК.пуск}} P_{\Sigma\text{ном}} / (\eta \sqrt{3} U_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ЭК}}) = 4 P_{\Sigma\text{ном}} / U_{\text{ном}}, \quad (5.48)$$

где $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение электродвигателей секции; суммарное начальное значение периодической составляющей тока в месте КЗ

$$I''_{\Sigma} = I_{\text{с}} + I''_{\text{ЭК}}; \quad (5.49)$$

суммарную периодическую составляющую тока КЗ в момент времени τ

$$I_{\tau} = I_{\text{с}} + I''_{\text{ЭК}} \exp(-\tau/T'_{\text{ЭК}}) = I_{\text{с}} + \gamma_{\text{ЭК}t} I''_{\text{ЭК}}, \quad (5.50)$$

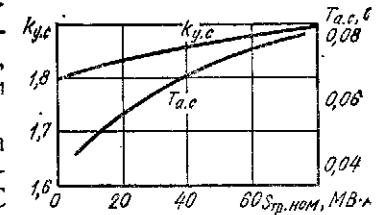


Рис. 5.17. Кривые для определения постоянной времени и ударного коэффициента цепи электроснабжения собственных нужд ТЭС

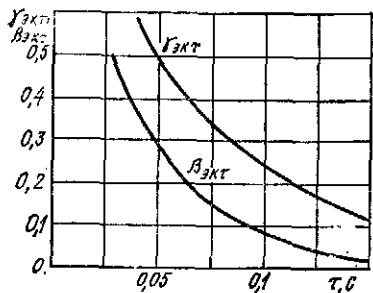


Рис. 5.18. Кривые для определения коэффициентов затухания эквивалентного электродвигателя собственных нужд ТЭС

суммарный ударный ток КЗ

$$i_{y\tau} = k_{y,c} \sqrt{2} I_c + k_{y,экт} \sqrt{2} I'_{экт} \quad (5.52)$$

Значение $k_{y,c}$ находят по кривой на рис. 5.17, если сопротивление токопровода в цепи трансформатора собственных нужд не учитывают.

Пример 5.8. При трехфазном КЗ в точке К подстанции предприятия, схема которой изображена на рис. 5.19, а, определить начальное значение периодической составляющей тока КЗ, периодическую и аperiodическую составляющие тока КЗ в момент времени $\tau = 0,1$ с и ударный ток. Параметры элементов схемы указаны на рисунке.

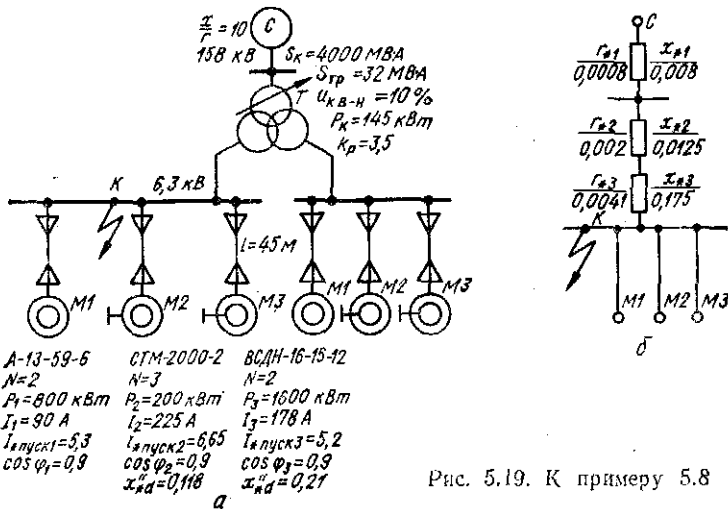


Рис. 5.19. К примеру 5.8

Решение. В рассматриваемых условиях следует учитывать токи, генерируемые только электродвигателями левой по схеме секции, вблизи которой произошло КЗ. Схема замещения для определения тока КЗ в системе показана на рис. 5.19, б. Принимая за базисные условия $S_б = 32 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ и $U_б = 6,3 \text{ кВ}$, находим базисный ток $I_б = 32 / (\sqrt{3} \cdot 6,3) = 2,93 \text{ кА}$.

где $\gamma_{экт}$ — коэффициент затухания периодической составляющей тока (рис. 5.18);

суммарную аperiodическую составляющую тока КЗ в момент времени τ

$$i_{ат\tau} = \sqrt{2} I_c \exp(-\tau/T_{a,c}) + \sqrt{2} I'_{экт} \exp(-\tau/T_{a,экт}) = \sqrt{2} I_c \exp(-\tau/T_{a,c}) + \sqrt{2} \beta_{экт} I'_{экт}, \quad (5.51)$$

где $\beta_{экт}$ — коэффициент затухания аperiodической составляющей тока (рис. 5.18);

Сопротивления элементов схемы замещения, приведенные к базисным условиям, в относительных единицах

$$x_{*1} = S_б / S_k = 32 / 4000 = 0,008;$$

$$r_{*1} = x_{*1} / 10 = 0,0008;$$

$$x_{*2} = 0,125 u_{кв-н} S_б / (100 S_{тр}) = 0,125 \cdot 10 \cdot 32 / (100 \cdot 32) = 0,0125;$$

$$r_{*2} = \Delta P_k U_{ном}^2 S_б / (2 S_{тр}^2 U_б^2) = 0,145 \cdot 6^2 \cdot 32 / (2 \cdot 32^2 \cdot 6,3^2) = 0,002;$$

$$x_{*3} = 1,75 u_{кв-н} S_б / (100 S_{тр}) = 1,75 \cdot 10 \cdot 32 / (100 \cdot 32) = 0,175;$$

$$r_{*3} = 0,004.$$

Результирующие сопротивления в цепи КЗ

$$x_{*рез} = 0,008 + 0,0125 + 0,175 = 0,195;$$

$$r_{*рез} = 0,001 + 0,002 + 0,004 = 0,007;$$

$$z_{*рез} = \sqrt{0,195^2 + 0,007^2} = 0,202.$$

Периодическая составляющая тока КЗ, создаваемого системой,

$$I_c = I_б / z_{*рез} = 2,93 / 0,202 = 14,5 \text{ кА}.$$

Постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ, создаваемого системой,

$$T_{a,c} = x_{*рез} / (314 r_{*рез}) = 0,195 / (314 \cdot 0,007) = 0,09 \text{ с}.$$

Сопротивление КЛ малой длины ($l = 45 \text{ м}$), питающей электродвигатели, не учитываем.

Начальное значение периодической составляющей тока, создаваемого асинхронными двигателями M1

$$I'_{M1} = N I_{*пуск1} I_1 = 2 \cdot 5,3 \cdot 0,09 = 0,954 \text{ кА}.$$

Сверхпереходные э. д. с. синхронных двигателей M2 и M3:

$$E''_{*M2} = \sqrt{(U_{*(0)} \cos \varphi_1)^2 + (U_{*(0)} \sin \varphi_1 + I_{*(0)} x''_{*d})^2} = \sqrt{0,9^2 + (0,436 + 0,118)^2} = 1,057;$$

$$E''_{*M3} = \sqrt{0,9^2 + (0,436 + 0,21)^2} = 1,108.$$

Начальные значения периодических составляющих токов, создаваемых синхронными двигателями

$$I''_{M2} = N E''_{*M2} I_2 / x''_{*d} = 3 \cdot 1,057 \cdot 0,225 / 0,118 = 6,05 \text{ кА};$$

$$I''_{M3} = N E''_{*M3} I_3 / x''_{*d} = 2 \cdot 1,108 \cdot 0,178 / 0,21 = 1,88 \text{ кА}.$$

Суммарное начальное значение периодической составляющей тока, создаваемого всеми источниками в месте КЗ,

$$I'_{дв\tau} = 0,954 + 6,05 + 1,88 + 14,5 = 23,4 \text{ кА}.$$

Периодическая составляющая тока КЗ, создаваемого асинхронными двигателями M1 при $\tau = 0,1 \text{ с}$

$$I_{M1\tau} = I'_{M1} \exp(-\tau/T'_{дв,расч}) = 0,954 \exp(-0,1/0,04) = 0,08 \text{ кА},$$

где $T'_{дв,расч} = 0,4 \text{ с}$ — постоянная времени, найденная по табл. 5.2.

Токи КЗ при $\tau = 0,1$ с, найденные по кривым рис. 5.14 для двигателей $M2$ типа СТМ,

$$I_{*M2\tau} = 0,78,$$

а для двигателей $M3$ типа ВСДН

$$I_{*M3\tau} = 0,68.$$

Периодические составляющие токов КЗ, создаваемых синхронными двигателями $M2$ и $M3$ при $\tau = 0,1$ с

$$I_{M2\tau} = I_{*M2\tau} I_{M2} = 0,78 \cdot 6,05 = 4,72 \text{ кА};$$

$$I_{M3\tau} = I_{*M3\tau} I_{M3} = 0,68 \cdot 1,88 = 1,28 \text{ кА}.$$

Суммарное значение периодической составляющей тока, создаваемого всеми источниками в месте КЗ,

$$I_{\tau\Sigma} = 14,5 + 0,08 + 4,72 + 1,28 = 20,58 \text{ кА}.$$

Постоянная времени двигателей $M1$ согласно табл. 5.2

$$T_{aM1} = 0,04 \text{ с},$$

а двигателей $M2$ и $M3$ по кривым рис. 5.15

$$T_{aM2} = 0,072 \text{ с}; \quad T_{aM3} = 0,056 \text{ с}.$$

Апериодическая составляющая тока в месте КЗ при $\tau = 0,1$ с

$$\begin{aligned} i_{a\tau\Sigma} &= \sqrt{2} I''_{M1} \exp(-0,1/T_{aM1}) + \sqrt{2} I''_{M2} \exp(-0,1/T_{aM2}) + \\ &+ \sqrt{2} I''_{M3} \exp(-0,1/T_{aM3}) + \sqrt{2} I_c \exp(-0,1/T_{a0}) = \\ &= \sqrt{2} \cdot 0,954 \exp(-0,1/0,04) + \sqrt{2} \cdot 6,05 \exp(-0,1/0,072) + \\ &+ \sqrt{2} \cdot 1,88 \exp(-0,1/0,056) + \sqrt{2} \cdot 14,5 \exp(-0,1/0,09) = 9,6 \text{ кА}. \end{aligned}$$

Ударные коэффициенты системы

$$k_{y,c} = 1 + \exp(-0,01/0,09) = 1,895;$$

асинхронных двигателей $M1$ согласно табл. 5.2

$$k_{yM1} = 1,56;$$

синхронных двигателей $M2$ и $M3$ по кривым рис. 5.15

$$k_{yM2} = 1,87; \quad k_{yM3} = 1,84.$$

Ударный ток в месте КЗ

$$\begin{aligned} I_{y\Sigma} &= k_{y,c} \sqrt{2} I_c + k_{yM1} \sqrt{2} I''_{M1} + k_{yM2} \sqrt{2} I''_{M2} + k_{yM3} \sqrt{2} I''_{M3} = \\ &= 1,895 \sqrt{2} \cdot 14,5 + 1,56 \sqrt{2} \cdot 0,954 + 1,87 \sqrt{2} \cdot 6,05 + 1,84 \sqrt{2} \cdot 1,88 = \\ &= 63,1 \text{ кА}. \end{aligned}$$

Пример 5.9. При трехфазном КЗ в точке K подстанции предприятия, схема которой изображена на рис. 5.20, *а*, определить в месте КЗ значение периодической составляющей в момент времени $\tau = 0,2$ с и ударный ток. Номинальные параметры элементов схемы указаны на рисунке.

Решение. В рассматриваемых условиях необходимо учитывать токи, генерируемые только электродвигателями левой по схеме секции через КЛ. Схема замещения для определения тока КЗ в системе показана на рис. 5.20, *б*.

Периодическая составляющая тока КЗ, создаваемого системой, и постоянная времени затухания апериодической составляющей тока T_{a0} определены в предыдущем примере в составляют: $I_a = 14,5$ кА; $T_{a0} = 0,09$ с.

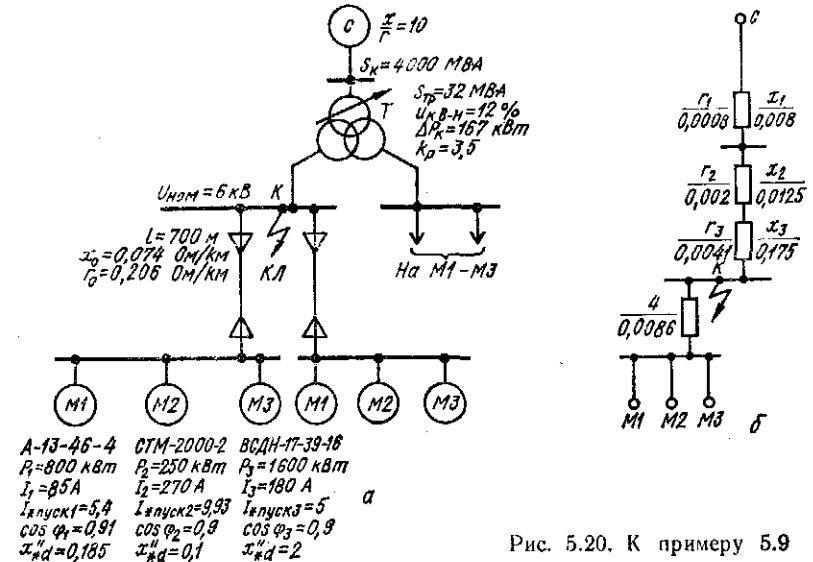


Рис. 5.20. К примеру 5.9

За базисный целесообразно принять суммарный номинальный ток эквивалентного двигателя, определяемый выражением (5.39)

$$I_0 = I_{\text{эк.ном}} = I_{M1\text{ном}} + 1,2 (I_{M2\text{ном}} + I_{M3\text{ном}}) = 85 + 1,2 (270 + 180) = 625 \text{ А},$$

а базисное напряжение $U_0 = U_{\text{эк.ном}} = 6$ кВ.

Начальное значение периодической составляющей тока группы двигателей $M1-M3$ при КЗ на сборных шинах левой по схеме секции согласно (5.38)

$$\begin{aligned} I''_{\text{дв}\Sigma} &= I_{*пуск1} I_1 + 1,2 I_{*пуск2} I_2 + 1,2 I_{*пуск3} I_3 = \\ &= 5,4 \cdot 85 + 1,2 \cdot 9,93 \cdot 270 + 1,2 \cdot 5 \cdot 180 = 4756 \text{ А}. \end{aligned}$$

При объединении всех двигателей в один эквивалентный его параметры в соответствии с (5.40) — (5.43) имеют следующие значения:

$$I_{*эк.пуск} = I''_{\text{дв}\Sigma} / I_{\text{эк.ном}} = 4756 / 625 = 7,6;$$

$$x''_{*эк} = 1 / I_{*эк.пуск} = 1 / 7,6 = 0,13;$$

$$\begin{aligned} T'_{\text{эк}} &= (T'_{\text{расч}M1} I_{*пуск1} I_1 + T'_{\text{расч}M2} \cdot 1,2 I_{*пуск2} I_2 + \\ &+ T'_{\text{расч}M3} \cdot 1,2 I_{*пуск3} I_3) / I''_{\text{дв}\Sigma} = \\ &= (0,04 \cdot 5,4 \cdot 85 + 0,34 \cdot 1,2 \cdot 9,93 \cdot 270 + 0,37 \cdot 1,2 \cdot 5 \cdot 180) / 4756 = 0,31 \text{ с}; \\ T_{a,эк} &= (T_{aM1} I_{*пуск1} I_1 + T_{aM2} \cdot 1,2 I_{*пуск2} I_2 + T_{aM3} \cdot 1,2 I_{*пуск3} I_3) / I''_{\text{дв}\Sigma} = \\ &= (0,04 \cdot 5,4 \cdot 85 + 0,094 \cdot 1,2 \cdot 9,93 \cdot 270 + 0,57 \cdot 1,2 \cdot 5 \cdot 180) / 4756 = 0,08 \text{ с}. \end{aligned}$$

Начальное значение периодической составляющей тока эквивалентного двигателя при КЗ в точке K согласно (5.44)

$$I'_{\text{эк}} = I_{*эк.пуск} I_{\text{н.эк}} / (1 + z_{*вн} / x''_{*эк}) = 7,6 \cdot 0,625 / (1 + 0,009 / 0,13) = 4,4 \text{ кА},$$

где

$$x_{*вн} = \sqrt{3} x_0 I_0 / (NU) = 3 \cdot 0,074 \cdot 0,7 \cdot 0,625 / (3 \cdot 6) = 0,0031;$$

$$r_{*BH} = \sqrt{3} \cdot 0,206 \cdot 0,7 \cdot 0,625 / (3 \cdot 6) = 0,0086;$$

$$z_{*BH} = \sqrt{0,0031^2 + 0,0086^2} = 0,009.$$

Суммарное начальное значение периодической составляющей тока в месте КЗ с учетом двух групп двигателей

$$I''_{\Sigma} = I_c + 2I''_{ЭК} = 14,5 + 2 \cdot 4,4 = 23,3 \text{ кА.}$$

Периодическая составляющая тока эквивалентного двигателя при $\tau = 0,2$ с в соответствии с (5.45)

$$I_{ЭК\tau} = I''_{ЭК} \exp(-0,2/T') = 4,4 \exp(-0,2/0,317) = 2,34 \text{ кА,}$$

где

$$T' = T'_{ЭК} (1 + x_{*BH}/x'_{*ЭК}) = 0,31 (1 + 0,031/0,13) = 0,317 \text{ с.}$$

Суммарная периодическая составляющая тока в месте КЗ при $\tau = 0,2$ с

$$I_{\tau\Sigma} = I_c + 2I_{ЭК\tau} = 14,5 + 2 \cdot 2,34 = 19,18 \text{ кА.}$$

Апериодическая составляющая тока эквивалентного двигателя при $\tau = 0,2$ с согласно (5.45)

$$i_{a.ЭК\tau} = \sqrt{2} I''_{ЭК} \exp(-0,2/T_a) = 2 \cdot 4,4 \exp(0,2/0,0321) = 0,012 \text{ кА,}$$

где

$$T_a = (x'_{*ЭК} + x_{*BH}) / (\omega (x'_{*ЭК} / (\omega T_{a.ЭК}) + r_{*BH})) = \\ = (0,13 + 0,0031) / (314 / (314 / (314 \cdot 0,09) + 0,0086)) = 0,0321 \text{ с.}$$

Суммарное значение аperiodической составляющей тока в месте КЗ при $\tau = 0,2$ с

$$i_{a\tau\Sigma} = i_{a.c\tau} + 2i_{a.ЭК\tau} = \sqrt{2} I_c \exp(-0,2/T_{a.c}) + 2i_{a.ЭК\tau} = \\ = \sqrt{2} \cdot 14,5 \exp(-0,2/0,09) + 2 \cdot 0,012 = 2,33 \text{ кА.}$$

Ударный ток эквивалентного двигателя

$$i_{y.ЭК} = k_{y.ЭК} \sqrt{2} I''_{ЭК} = 1,7 \sqrt{2} \cdot 4,4 = 10,5 \text{ кА,}$$

где

$$k_{y.ЭК} = \exp(-0,01/T') + \exp(-0,01/T_a) = \\ = (\exp(-0,01/0,317) + \exp(-0,01/0,0321)) = 1,7.$$

Суммарный ударный ток в месте КЗ

$$i_{y\Sigma} = k_{y.c} \sqrt{2} I_c + 2i_{y.ЭК} = i_{y.c} + 2i_{y.ЭК} = 1,895 \sqrt{2} \cdot 14,5 + 2 \cdot 10,5 = 61,2 \text{ кА.}$$

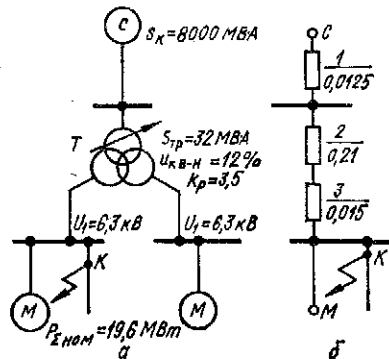


Рис. 5.21. К примеру 5.10

Пример 5.10. При трехфазном КЗ на отвлечении от секции установки собственных нужд, схема которой изображена на рис. 5.21, а, определить значение периодической составляющей тока КЗ в момент времени $\tau = 0,04$ с и ударный ток.

Решение. Припускаем за базисные условия $S_B = 1000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $U_B = U_1 = 6,3 \text{ кВ}$; $I_B = 100 / (\sqrt{3} \cdot 6,3) = 9,16 \text{ кА}$. Схема замещения при КЗ в точке К показана на рис. 5.21, б.

Сопротивления элементов схемы замещения, приведенные к базисным условиям, в относительных единицах

$$x_{*1} = S_6 / S_K = 100 / 8000 = 0,0125;$$

$$x_{*2} = 1,75 u_{KB-H} S_6 / (100 S_{Tp}) = 1,75 \cdot 12 \cdot 100 / (100 \cdot 32) = 0,21;$$

$$x_{*3} = 0,125 u_{KB-H} S_6 / (100 S_{Tp}) = 0,125 \cdot 12 \cdot 100 / (100 \cdot 32) = 0,015;$$

$$x_{*рез} = 0,0125 + 0,21 + 0,015 = 0,238.$$

Периодическая составляющая тока КЗ, создаваемого системой,

$$I_c = I_6 / x_{*рез} = 9,16 / 0,238 = 38,57 \text{ кА.}$$

Постоянная времени аperiodической составляющей тока КЗ при номинальной мощности обмотки НН трансформатора, равной 16 МВ · А, согласно рис. 5.17

$$T_{a.0} = 0,053 \text{ с.}$$

Начальное значение периодической составляющей тока КЗ, создаваемого эквивалентным двигателем левой по схеме секции, в соответствии с (5.48)

$$I''_{ЭК} = 4P_{\Sigma ном} / U_{ном} = 4 \cdot 19,6 / 6 = 13,07 \text{ кА.}$$

Суммарное начальное значение периодической составляющей тока КЗ, создаваемого системой и эквивалентным двигателем,

$$I''_{\Sigma} = I_c + I''_{ЭК} = 38,57 + 13,07 = 51,64 \text{ кА.}$$

Суммарная периодическая составляющая тока КЗ при $\tau = 0,04$ с

$$I_{\tau\Sigma} = I_c + \gamma_{ЭК\tau} I''_{ЭК} = 38,57 + 0,57 \cdot 13,07 = 46,02 \text{ кА,}$$

где коэффициент затухания $\gamma_{ЭК\tau} = 0,57$ (определен по рис. 5.18).

Суммарная аperiodическая составляющая тока КЗ при $\tau = 0,04$ с

$$i_{a\tau\Sigma} = \sqrt{2} I_c \exp(0,04/T_{a.c}) + \sqrt{2} I''_{ЭК} \beta_{ЭК\tau} =$$

$$= \sqrt{2} \cdot 38,57 \exp(-0,04/0,053) + \sqrt{2} \cdot 13,07 \cdot 0,37 = 32,4 \text{ кА,}$$

где коэффициент затухания $\beta_{ЭК\tau} = 0,37$ (определен по рис. 5.18).

Ударный ток КЗ согласно (5.52)

$$i_{y\Sigma} = k_{y.c} \sqrt{2} I_c + k_{y.ЭК} \sqrt{2} I''_{ЭК} = 1,85 \sqrt{2} \cdot 38,57 + 1,83 \sqrt{2} \cdot 13,07 = 134,7 \text{ кА.}$$

Значения $k_{y.c} = 1,85$ и $k_{y.ЭК} = 1,83$ найдены по рис. 5.17.

5.6. Расчеты токов короткого замыкания в электроустановках напряжением до 1 кВ

Электроустановки напряжением до 1 кВ характеризуются большой электрической удаленностью относительно источников питания, как правило, значительной мощности. Обычно мощность подстанций примерно в 25 раз превышает мощность трансформаторов 6—10/0,4 кВ. Поэтому амплитуду периодической составляющей аварийного тока при КЗ на стороне НН трансформатора, через который от электрической системы питаются электроустановки напряжением до 1 кВ, можно считать неизменной. При этом условии сопротивление связи трансформатора 6—10/0,4 кВ с системой можно определить по формуле

$$x'_c = U_{ср В} / (\sqrt{3} I_{ЛВ}) \quad (5.53)$$

или

$$x'_c = U_{ср В} / (\sqrt{3} I_{откл ном}), \quad (5.54)$$

где $U_{срв}$ — среднее номинальное напряжение ступени соответствующей обмотки ВН трансформатора; $I_{кв}$ — значение тока при трехфазном КЗ у выводов обмотки ВН трансформатора; $I_{откл.ном}$ — номинальный ток отключения выключателей, установленных в цепи питания понижающего трансформатора.

Если трансформатор связан с электрической системой посредством КЛ или ВЛ через реактор, то сопротивление x_c можно считать равным суммарному сопротивлению реактора и КЛ или сопротивлению ВЛ.

Рекомендуется в качестве основной выбирать ступень пониженного напряжения. Обычно расчет токов КЗ выполняют в именованных единицах, активные и индуктивные сопротивления выражают в миллиомах, мощность — в киловольт-амперах, ток — в килоамперах, напряжение — в киловольтах.

Достоверность расчета токов КЗ зависит от того, насколько правильно оценены и полно учтены все сопротивления цепи КЗ. В электроустановках напряжением до 1 кВ существенное влияние на значение токов КЗ оказывают активные сопротивления цепи КЗ. Их значения соизмеримы, а иногда и превышают значения индуктивных сопротивлений.

Результирующее сопротивление цепи КЗ состоит из сопротивлений всех силовых элементов сети, включая участки сборных шин, магистральных и распределительных шинопроводов; сопротивлений токовых катушек автоматических выключателей и реле, обмоток трансформаторов тока, контактов коммутационных аппаратов, переходных контактов и дуги в месте КЗ.

Таблица 5.3. Активное и индуктивное сопротивления плоских шин

Сечение шин, мм ²	Сопротивления, мОм/м					
	активное при 65 °С		индуктивное при среднем геометрическом расстоянии между фазами, мм			
	Медь	Алюминий	100	150	200	300
25×3	0,268	0,457	0,179	0,200	0,295	0,244
30×3	0,223	0,394	0,163	0,189	0,206	0,235
30×4	0,167	0,296	0,163	0,189	0,206	0,235
40×4	0,125	0,222	0,145	0,170	0,189	0,214
40×5	0,100	0,177	0,145	0,170	0,189	0,214
50×5	0,080	0,142	0,137	0,156	0,180	0,200
50×6	0,067	0,118	0,137	0,156	0,180	0,200
60×6	0,056	0,099	0,119	0,145	0,163	0,189
60×8	0,042	0,074	0,119	0,145	0,163	0,189
80×8	0,031	0,055	0,102	0,126	0,145	0,170
80×10	0,025	0,044	0,102	0,126	0,145	0,170
100×10	0,020	0,035	0,090	0,113	0,133	0,157
2 (60×8)	0,0209	0,037	0,120	0,145	0,163	0,189
2 (80×8)	0,0157	0,0277	—	0,126	0,145	0,170
2 (80×10)	0,0125	0,0222	—	0,126	0,145	0,170
2 (100×10)	0,010	0,0178	—	—	0,133	0,157

Рассмотрим в отдельности, как определяются сопротивления силовых элементов короткозамкнутой цепи.

Силовые трансформаторы. Полное, активное и индуктивное сопротивления понижающего трансформатора, приведенные к ступени НН, в миллиомах рассчитывают по формулам

$$z_{тр} = u_{к.р} U_{ном Н}^2 \cdot 10^4 / S_{тр}; \quad (5.55)$$

$$r_{тр} = P_{к} U_{ном Н}^2 \cdot 10^6 / S_{тр}^2; \quad (5.56)$$

$$x_{тр} = u_{к.р} U_{ном Н}^2 \cdot 10^4 / S_{тр} = \sqrt{u_{к.р}^2 - (P_{к} / (10 S_{тр}))^2} U_{ном Н}^2 \cdot 10^4 / S_{тр}, \quad (5.57)$$

Таблица 5.4. Активное и индуктивное сопротивления фазы комплектных шинопроводов

Тип шинопровода	Номинальный ток, А	Сопротивления, мОм/м	
		активное	индуктивное
ШМА73	1600	0,031	0,017
ШМА68Н	2500	0,027	0,023
ШМА68Н	4000	0,013	0,020
ШЗМ16	1600	0,017	0,014
ШРА73	250	0,200	0,100
ШРА73	400	0,130	0,100
ШРА73	630	0,085	0,075

Таблица 5.5. Индуктивные сопротивления первичных обмоток трансформаторов тока, мОм

Коэффициент трансформации трансформатора тока	Класс точности трансформатора тока	
	первый	второй
20/5	67	17
30/5	30	8
40/5	17	4,2
50/5	11	2,8
100/5	2,7	0,7
150/5	1,2	0,3
200/5	0,67	0,17
300/5	0,3	0,08
400/5	0,17	0,04
500/5	0,07	0,02

где $S_{тр}$ — номинальная мощность трансформатора, кВ · А; $U_{ном Н}$ — номинальное линейное напряжение обмотки НН трансформатора, кВ; $P_{к}$ — потери КЗ в трансформаторе, кВт; $u_{к.р}$ — реактивная составляющая напряжения КЗ, %; $u_{к}$ — напряжение КЗ трансформатора, %.

Шины и шинопроводы. Их сопротивления определяются на основании значений активного и индуктивного сопротивлений, отнесенных к единице длины шины. В табл. 5.3 эти значения указаны для плоских шин, а в табл. 5.4 — для фазы комплектных шинопроводов.

Воздушные и кабельные линии. Значения активного и индуктивного сопротивлений ЛЭП также вычисляют через табличные данные, которые достаточно полно помещены в [23]. Приблизительно индуктивное сопротивление ВЛ равно 0,4 мОм/м, а КЛ — 0,08 мОм/м.

Коммутационные аппараты, реле и трансформаторы тока. Их индуктивные сопротивления зависят от номинального тока. Для первичных обмоток трансформаторов тока они приведены в табл. 5.5,

для токовых катушек расцепителей автоматических выключателей указаны ниже:

Номинальный ток катушки расцепителя, А	100	140	200	400	600	1000	1600	2500
Сопротивление катушки расцепителя, мОм	0,86	0,55	0,28	0,1	0,094	0,08	0,06	0,05

Активное сопротивление элементов аппаратуры и устройств, контактов, дуги в месте КЗ определяют в составе результирующего переходного сопротивления

$$r_{\text{п}} = r_{\text{к}} + r_{\text{а}} + r_{\text{тр.т}} + r_{\text{д}} \quad (5.58)$$

Здесь $r_{\text{к}}$ — переходное сопротивление контактного соединения токоведущих шин; $r_{\text{а}}$ — активное сопротивление автоматического выключателя, состоящее из активного сопротивления токовых катушек расцепителя и переходного сопротивления контактов; $r_{\text{тр.т}}$ — активное сопротивление первичной обмотки трансформатора тока; $r_{\text{д}}$ — активное сопротивление дуги в месте КЗ.

Результирующее активное переходное сопротивление зависит от мощности понижающего трансформатора комплектной трансформаторной подстанции (КТП), места КЗ по ступеням распределения электрической энергии (ступень КЗ) и минимального расстояния между фазами в месте КЗ. Ниже приведены его значения при КЗ на вторичной стороне КТП:

Мощность трансформатора, кВ · А	400	630	1000	1600	2500
Переходное сопротивление, мОм	9,21	8,02	8,41	5,51	5,12

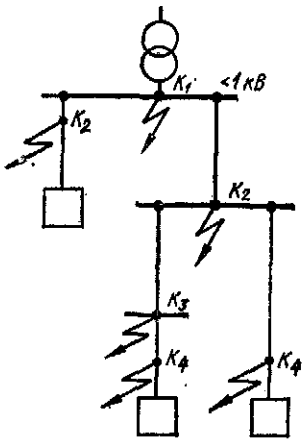
С учетом указанных факторов в [5] получена адекватная оценка результирующего активного переходного сопротивления (5.58) для точки КЗ в сети, находящейся за КТП:

$$r_{\text{п}} = (2,5 \sqrt{S_{\text{тр}}} k_{\text{ст}}^3 + 320a) / S_{\text{тр}} \quad (5.59)$$

где $k_{\text{ст}}$ — коэффициент ступени КЗ, определяемый в соответствии с типовой расчетной схемой сети по табл. 5.6; a — расстояние между фазами проводов сети в месте КЗ, от которого зависит сопротивление дуги в месте КЗ. Его значения в миллиметрах для разных элементов сети указаны ниже:

КТП с трансформатором мощностью, кВ · А		
400	.....	60
630	.....	60
1000	.....	70
1600	.....	120
2500	.....	180
Шиннопровод		
ШМА	.....	10
ШРА	.....	45
Кабель сечением, мм ²		
2,5—10	.....	1,6
16—35	.....	2,4
50—95	.....	2,8
120—150	.....	4
240	.....	4,8

Таблица 5.6. Значения коэффициента ступени КЗ

Расчетная схема сети	Ступень КЗ	$k_{\text{ст}}$
	РУ на станциях и подстанциях	Значение переходного сопротивления для точки K_1 определяется по приведенным выше данным
	Первичные цеховые распределительные пункты; зажимы аппаратов, питаемых радиальными линиями от щитов подстанций или главных магистралей	2
	Вторичные цеховые распределительные пункты; зажимы аппаратов, питаемых от первичных распределительных пунктов	3
	Аппаратура, установленная непосредственно у электроприемников, питающихся от вторичных распределительных пунктов	4

Сопротивления рассмотренных элементов цепи КЗ напряжением до 1 кВ приводятся к базисным условиям на основании выражений: при сопротивлении элемента, выраженном в миллионах,

$$x_6 = x U_6^2 / U_{\text{ср}}^2; \quad (5.60)$$

при сопротивлении элемента, заданном в относительных единицах,

$$x_6 = x_{\text{н}} U_6^2 \cdot 10^6 / S_{\text{ном}}; \quad (5.61)$$

где U_6 — напряжение ступени, на которой находится точка КЗ, кВ; $U_{\text{ср}}$ — среднее номинальное напряжение ступени, где включен соответствующий элемент; $S_{\text{ном}}$ — номинальная мощность элемента, кВ · А.

Индуктивное сопротивление внешней системы до понижающего трансформатора, приведенное к ступени НН

$$x_{\text{с.б}} = x_{\text{с}}'' U_6^2 / U_{\text{ср.в}}^2; \quad (5.62)$$

где $U_{\text{ср.в}}$ — среднее номинальное напряжение ступени соответствующей обмотки ВН трансформатора.

Результирующие сопротивления $r_{\text{рез.б}}$ и $x_{\text{рез.б}}$ цепи КЗ находят путем преобразования схемы замещения согласно рекомендациям п. 2.5 с учетом активного переходного сопротивления. По найденным значениям активного и реактивного результирующих сопротивлений определяют (в килоамперах):

начальное действующее значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ

$$I^{(3)} = U_0 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \sqrt{r_{\text{рез.б}}^2 + x_{\text{рез.б}}^2}); \quad (5.63)$$

ударный ток трехфазного КЗ в электроустановках напряжением до 1 кВ

$$i_y = k_y \sqrt{2} I^{(3)}, \quad (5.64)$$

где $k_y = 1 + \exp(-0,01/T_a)$, а $T_a = x_{\text{рез.б}} / (\omega r_{\text{рез.б}})$;

действующее значение периодической составляющей тока однофазного КЗ, необходимое для выбора защиты от замыканий на землю,

$$I^{(1)} = \sqrt{3} U_0 \cdot 10^3 / \sqrt{(2r_{1\text{рез.б}} + r_{0\text{рез.б}})^2 + (2x_{1\text{рез.б}} + x_{0\text{рез.б}})^2}, \quad (5.65)$$

где $r_{1\text{рез.б}}$, $x_{1\text{рез.б}}$ — результирующие активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности, мОм; $r_{0\text{рез.б}}$, $x_{0\text{рез.б}}$ — результирующие активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности, мОм;

начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ, создаваемого местными асинхронными двигателями,

$$I_{\text{дв}}'' = E_{(0)\text{дв}}'' \cdot 10^3 / \sqrt{(x_{\text{дв}}'' + x_{\text{вн}}'')^2 + (r_{\text{дв}} + r_{\text{вн}})''^2}, \quad (5.66)$$

где $E_{(0)\text{дв}}''$ — фазная сверхпереходная э. д. с. двигателя, кВ; $x_{\text{дв}}''$, $r_{\text{дв}}$ — сверхпереходные индуктивное и активное сопротивления двигателя, мОм; $x_{\text{вн}}''$, $r_{\text{вн}}$ — внешние сопротивления кабеля, мОм.

Кроме того, рассчитывают: сверхпереходную э. д. с. (в вольтах)

$$E_{(0)\text{дв}}'' = \sqrt{(U_{\text{ф}(0)} \cos \varphi_{(0)} - I_{(0)} r_{\text{дв}})''^2 + (U_{\text{ф}(0)} \sin \varphi_{(0)} - I_{(0)} x_{\text{дв}}'')''^2}, \quad (5.67)$$

где $U_{\text{ф}(0)}$, $I_{(0)}$, $\varphi_{(0)}$ — соответственно фазное напряжение, ток статора и угол между векторами напряжения и тока статора в режиме, предшествующем КЗ. Обычно принимают $U_{\text{ф}(0)} = U_{\text{ном}}$, $I_{(0)} = I_{\text{ном}}$, $\varphi_{(0)} = \varphi_{\text{ном}}$ либо полагают $E_{(0)\text{дв}}'' = 0,9U$;

суммарное активное сопротивление асинхронного двигателя в момент КЗ (в миллиомах)

$$r_0 = r_1 + r_2 / C_2, \quad (5.68)$$

где r_1 — активное сопротивление статора, мОм; C_2 — коэффициент, характеризующий соотношение сопротивлений рассеяния обмотки ротора и намагничивания двигателя; r_2 — активное сопротивление ротора, приведенное к статору (мОм) и определяемое выражением

$$r_2 = M_{\text{пуск}} (P_{\text{ном}} + \Delta P_{\text{мх}}) C_2 \cdot 10^3 / (3I_{\text{пуск}}^2 I_{\text{ном}}^2 (1 - s_{\text{ном}})), \quad (5.69)$$

где $M_{\text{пуск}}$ — кратность пускового момента двигателя по отношению к его номинальному моменту; $P_{\text{ном}}$ и $I_{\text{ном}}$ — номинальные значения мощности (кВт) и тока (А) двигателя; $\Delta P_{\text{мх}}$ — механические потери двигателя, включая добавочные потери (кВт), причем $\Delta P_{\text{мх}} =$

$= 0,01 P_{\text{ном}}$; $I_{\text{пуск}}$ — кратность пускового тока; $s_{\text{ном}}$ — номинальное скольжение двигателя;

активное сопротивление статора (в миллиомах), если оно не задано заводом-изготовителем, по формулам:

для двигателей с фазным ротором и с простой «беличьей» обмоткой на роторе

$$r_1 = C_1 M_{\text{пуск}} (1/s_{\text{кр}} + s_{\text{кр}} - 2M_{\text{мах}}/M_{\text{пуск}}) / (2s_{\text{кр}} M_{\text{мах}}), \quad (5.70)$$

где $C_1 = 1,04$ — коэффициент, характеризующий соотношение сопротивлений рассеяния статора и намагничивания двигателя; $s_{\text{кр}}$ — критическое скольжение двигателя;

для двигателей с глубоким пазом или двумя обмотками на роторе

$$r_1 = K_m P_{\text{ном}} (1 - \eta_{\text{ном}}) \cdot 10^3 / (3I_{\text{ном}}^2 \eta_{\text{ном}}), \quad (5.71)$$

где $K_m = 0,3 \div 0,35$ — отношение потерь в меди статора к суммарным потерям мощности в двигателе при его работе в номинальном режиме; $\eta_{\text{ном}}$ — номинальный к. п. д. двигателя;

сверхпереходное индуктивное сопротивление асинхронного двигателя (в миллиомах)

$$x_{\text{дв}}'' = \sqrt{(U_{\text{ф.ном}} \cdot 10^3 / (I_{\text{пуск}} I_{\text{ном}}))^2 - r_{\text{дв}}^2}, \quad (5.72)$$

где $U_{\text{ф.ном}}$ — номинальное фазное напряжение двигателя, В;

ударный ток КЗ (в килоамперах), создаваемый асинхронным двигателем,

$$i_{y.\text{дв}} = k_{y.\text{дв}} \sqrt{2} I_{\text{дв}}'',$$

где $k_{y.\text{дв}}$ — ударный коэффициент для цепи двигателя, определяемый выражением

$$k_{y.\text{дв}} = \exp(-0,01/T_p) + \exp(-0,01/T_a).$$

Здесь T_p — расчетная постоянная времени затухания периодической составляющей тока статора, причем

$$T_p \approx (x_{\text{дв}}'' + x_{\text{вн}}'') / (\omega r_2); \quad (5.73)$$

постоянную времени затухания аperiodической составляющей тока статора

$$T_a \approx (x_{\text{дв}}'' + x_{\text{вн}}'') / (\omega (r_1 + r_{\text{вн}})). \quad (5.74)$$

Пример 5.11. К сборным шинам напряжением 0,4 кВ с помощью кабеля длиной 70 м и сечением $3 \times 120 \text{ мм}^2$ подключен асинхронный двигатель типа АО-104-6 (рис. 5.22). Определить начальное значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ, создаваемого двигателем при КЗ на сборных шинах (двигатель до КЗ имел номинальную нагрузку).

Решение. Номинальный ток двигателя

$$I_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / (\sqrt{3} U_{\text{ном}} \eta_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}}) = \\ = 200 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,94 \cdot 0,89) = 363,2 \text{ А.}$$

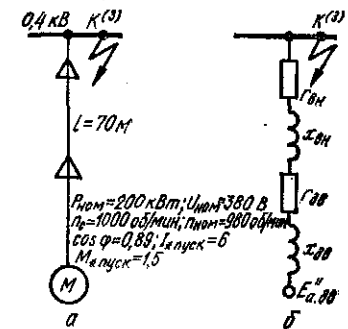


Рис. 5.22. К примеру 5.11

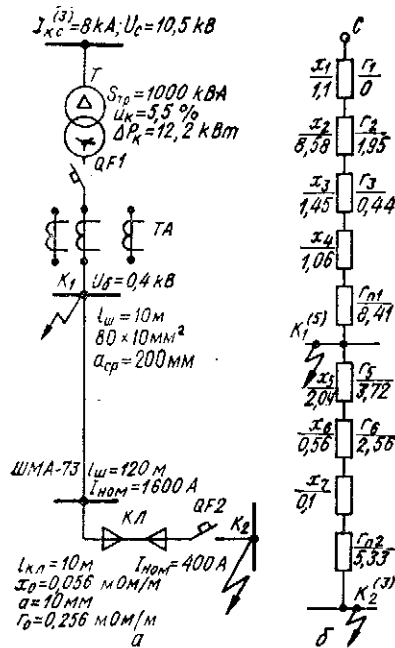


Рис. 5.23. К примеру 5.12

Номинальное скольжение двигателя
 $s_{ном} = (1000 - 980)/1000 = 0,02$.

Активное сопротивление ротора, приведенное к статору согласно (5.69),
 $r_2 = 1,5 (200 + 0,01 \cdot 200) \times$
 $\times 1,04^2 \cdot 10^6 / (3 \cdot 6^2 \cdot 363,2^2 \times$
 $\times (1 - 0,02)) = 23,5 \text{ мОм}$.

Активное сопротивление статора в соответствии с (5.71) при $K_M = 0,33$
 $r_1 = 0,33 \cdot 200 (1 - 0,94) \times$
 $\times 10^6 / (3 \cdot 362,2^2 \cdot 0,94) = 10,65 \text{ мОм}$.

Суммарное активное сопротивление двигателя
 $r_{дв} = 10,65 + 23,5/1,04 = 33,25 \text{ мОм}$.

Сверхпереходное индуктивное сопротивление двигателя согласно (5.72)
 $x''_{дв} =$
 $= \sqrt{(380 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 363,2))^2 - 33,25^2} =$
 $= 95,03 \text{ мОм}$.

Сверхпереходная э. д. с. асинхронно-го двигателя в соответствии с (5.67)

$$E''_{(0)дв} = \sqrt{\left(\frac{380}{\sqrt{3}} \cdot 0,89 - 363,2 \cdot 33,25 \cdot 10^{-3}\right)^2 + \dots} + \dots$$

$$+ \left(\frac{380}{\sqrt{3}} \cdot 0,456 - 363,2 \cdot 95,03 \cdot 10^{-3}\right)^2 = 194,57 \text{ В}$$

Активное и индуктивное сопротивления кабеля
 $r_{вн} = 0,32 \cdot 70 = 22,4 \text{ мОм};$
 $x_{вн} = 0,057 \cdot 70 = 3,99 \text{ мОм}$.

Начальное значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ согласно (5.66)

$$I''_{дв} = 194,57 / \sqrt{(95,03 + 3,99)^2 + (33,25 + 22,4)^2} = 1,7 \text{ кА}$$

Пример 5.12. Рассчитать токи трехфазного КЗ в точках K_1 и K_2 СЭС, схема которой изображена на рис. 5.23. Параметры элементов схемы указаны на рисунке. Электроустановки напряжением 0,4 кВ питаются через шинпровод типа ШМА-73.

Решение. Расчет токов КЗ в точке K_1 . Сопротивления связи питающей подстанции с системой

$$x_1 = 10 \cdot 500 \cdot 0,4^2 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 8000 \cdot 10,5^2) = 1,1 \text{ мОм}; \quad r_1 = 0$$

Сопротивления трансформатора согласно (5.55) — (5.57)

$$z_2 = 5,5 \cdot 0,4^2 \cdot 10^4 / 1000 = 8,8 \text{ мОм};$$

$$r_2 = 12,2 \cdot 0,4^2 \cdot 10^6 / 1000^2 = 1,95 \text{ мОм};$$

$$x_2 = \sqrt{8,8^2 - 1,95^2} = 8,58 \text{ мОм}$$

Сопротивления шины от выводов трансформатора до сборных шин напряжением 0,4 кВ

$$x_3 = 0,145 \cdot 10 = 1,45 \text{ мОм};$$

$$r_3 = 0,044 \cdot 10 = 0,44 \text{ мОм}$$

Индуктивное сопротивление токовой катушки распейтателя автомата QF1 на 1600 А

$$x_4 = 0,06 \text{ мОм}$$

Сопротивления одновитковых первичных обмоток трансформатора тока ТА не учитываем. Результирующее переходное сопротивление при КЗ в точке K_1 по данным, приведенным на с. 108,

$$r_{п1} = 8,41 \text{ мОм}$$

Результирующие сопротивления короткозамкнутой цепи до точки K_1

$$r_{K1,рез.6} = r_2 + r_3 + r_{п1} = 1,95 + 0,44 + 8,41 = 10,8 \text{ мОм};$$

$$x_{K1,рез.6} = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 1,1 + 8,58 + 1,45 + 0,06 = 11,2 \text{ мОм}$$

Полное сопротивление короткозамкнутой цепи

$$z_{K1,рез.6} = \sqrt{10,8^2 + 11,2^2} = 15,6 \text{ мОм}$$

Начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ в точке K_1

$$I''_{K1} = 0,4 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 15,6) = 14,8 \text{ кА}$$

Ударный ток КЗ в точке K_1

$$I_{yK1} = k_{yK1} \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{K1} = 1,005 \sqrt{2} \cdot 14,8 = 21 \text{ кА}$$

где

$$k_{yK1} = 1 + \exp(-0,01/T_{aK1}) = 1 + \exp(-0,01/0,0033) = 1,005;$$

$$T_{aK1} = 11,2 / (314 \cdot 10,8) = 0,0033 \text{ с}$$

Расчет токов КЗ в точке K_2 . Сопротивления шинпровода типа ШМА-73

$$x_5 = 0,017 \cdot 120 = 2,04 \text{ мОм};$$

$$r_5 = 0,031 \cdot 120 = 3,72 \text{ мОм}$$

Сопротивления КЛ от шинпровода до выключателя QF2

$$x_6 = 0,056 \cdot 10 = 0,56 \text{ мОм};$$

$$r_6 = 0,256 \cdot 10 = 2,56 \text{ мОм}$$

Индуктивное сопротивление токовой катушки распейтателя автомата QF2

$$x_7 = 0,1 \text{ мОм}$$

Результирующее переходное сопротивление в точке K_2 с учетом коэффициента ступени КЗ $k_{ст} = 3$ (см. табл. 5.6)

$$r_{п2} = (2,5 \sqrt{1000} \cdot 3^3 + 320 \cdot 10) / 1000 = 5,33 \text{ мОм}$$

Результирующие сопротивления короткозамкнутой цепи до точки K_2

$$r_{K2,рез.6} = r_2 + r_3 + r_5 + r_6 + r_{п2} = 1,95 + 0,44 + 3,72 + 2,56 + 5,33 = 14 \text{ мОм};$$

$$x_{K2,рез.6} = x_{K1,рез.6} + x_5 + x_6 + x_7 = 11,2 + 2,04 + 0,56 + 0,1 = 13,9 \text{ мОм};$$

$$z_{K2,рез.6} = \sqrt{14^2 + 13,9^2} = 19,7 \text{ мОм}$$

Начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ в точке K_2

$$I_{K_2}^{(3)} = 0,4 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 19,7) = 11,7 \text{ кА.}$$

Ударный ток КЗ в точке K_2

$$i_{yK_2} = k_{yK_2} \sqrt{2} I_{K_2}^{(3)} = 1,005 \sqrt{2} \cdot 11,7 = 16,6 \text{ кА,}$$

где

$$k_{yK_2} = 1 + \exp(-0,01/T_{aK_2}) = 1 + \exp(-0,01/0,0032) \approx 1,005,$$

причем

$$T_{aK_2} = 13,9 / (314 \cdot 14) = 0,0032 \text{ с.}$$

5.7. Расчеты токов короткого замыкания с использованием вычислительных машин

Связанные с развитием современных крупных промышленных предприятий, городов и сельскохозяйственных районов проектирование и анализ условий эксплуатации СЭС требуют увеличения объема вычислительных и исследовательских работ. Описания процессов и расчеты режимов СЭС при этом значительно усложняются, а количество параметров, необходимых для характеристики элементов СЭС, возрастает. В некоторых случаях требуется учитывать активное сопротивление, емкостную проводимость ЛЭП, взаимную индукцию между ЛЭП разного напряжения, отрицательное сопротивление обмоток автотрансформаторов, РПН трансформаторов.

Сложные схемы электрической сети предприятий, применение глубоких вводов напряжением свыше 110 кВ, неоднородность сети, значительное увеличение мощности источников энергетической системы, сочетание различных видов источников питания КЗ в СЭС, комплексный и резкопеременный характер нагрузки и ряд других факторов обуславливают необходимость повышения точности расчета токов КЗ и автоматизации расчетов.

Расчет токов КЗ в таких системах представляет собой объемную инженерно-техническую задачу, решение которой существенно облегчается при использовании аналоговых моделей и вычислительной техники. Применение ЭВМ позволяет отказаться от многих допущений при составлении схем замещения электрической сети. При этом удается точнее отобразить в расчетной схеме нагрузку и генераторы, учесть составляющие нагрузочного режима. Большим достоинством использования цифровых ЭВМ для расчета электромагнитных переходных процессов является возможность «просмотра» в широком диапазоне параметров элементов системы и учета не только их типа, но и конкретных особенностей. В итоге повышается точность расчета, гарантирующая достоверность полученных результатов при заданных исходных параметрах для многих вариантов и видов КЗ.

Заметим, что точность любого расчета на цифровых ЭВМ зависит от совершенства его методики, заложенной в программу, и достоверности исходных данных. Основное требование к программе расчета токов КЗ в сложной электрической системе состоит в том, что многовариантные расчеты в разных ее точках при возможных изменениях

в ней (переход от одного режима к другому, отключение и подключение ветвей, аварийные и оперативные коммутации и т. п.) не должны приводить к увеличению времени счета. Программа должна быть универсальной: допускать расчет переходного процесса в любой практически возможной схеме, объем которой не превышает программу. Предъявляются также общие требования, сводящиеся к простоте подготовки исходных данных и обработки полученных результатов, компактности и простоте вычислительного алгоритма. Характеристики программы расчета токов КЗ определяются принятым методом расчета и способом его реализации. Расчет основных параметров схемы должен выполняться по стандартным подпрограммам.

Математическое описание сложной СЭС при сделанных допущениях может быть сведено к составлению системы линейных алгебраических уравнений. Обычно допущения связаны с учетом насыщения трансформаторов и реакторов, моделированием нагрузок постоянными сопротивлениями, представлением синхронных генераторов источниками с неизменной по амплитуде э. д. с. и соответствующим сопротивлением.

Электрическая сеть может быть описана уравнениями контурных токов, узловых напряжений или их комбинациями. В матричной форме система уравнений контурных токов может быть записана в виде

$$z_k I_k = E_k, \quad (5.75)$$

где z_k — квадратная матрица собственных и взаимных сопротивлений сети с независимыми контурами; I_k , E_k — столбцовые матрицы контурных токов и э. д. с.

Система уравнений узловых напряжений для исходной сети в матричной форме имеет вид

$$U_{y_{\text{ул}}} = I_{y_{\text{ул}}} Y_{y_{\text{ул}}}, \quad (5.76)$$

где $Y_{y_{\text{ул}}}$ — квадратная матрица собственных и взаимных проводимостей (порядок матрицы равен числу узлов исходной схемы без учета базисного узла, в качестве которого принимается узел нулевого потенциала); $U_{y_{\text{ул}}}$, $I_{y_{\text{ул}}}$ — столбцовые матрицы узловых напряжений и токов.

Преимущественное распространение при расчете аварийных режимов в электрических системах получил метод узловых напряжений. Метод контурных токов из-за более сложной реализации на ЭВМ применяется реже. Однако он более прост при учете взаимной индукции ЛЭП в системе нулевой последовательности.

В проектной практике широко используют алгоритмы и программы расчета токов КЗ, предложенные институтом «Энергосетьпроект» и ИЭД АН УССР. Программы позволяют выполнять расчеты с учетом активных сопротивлений элементов сети и заданных расхождений э. д. с. по модулю и фазе при всех видах повреждений в сложных сетях. Для решения линейных алгебраических уравнений в этих программах применяются метод Гаусса и z-метод. В ряде организаций разрабатываются программы расчета токов КЗ в сложных сетях с

учетом переходных процессов в синхронных генераторах, трансформаторах, ЛЭП и комплексных узлах нагрузки.

Для расчета токов трехфазного КЗ с помощью цифровых ЭВМ предложен итерационный метод, который основывается на представлении электрического состояния сети при КЗ прямой формой системы уравнений узловых напряжений. Для ускорения сходимости итерационного процесса вычисления узловых напряжений используется коэффициент ускорения. Итерационный метод расчета токов КЗ не предъявляет особых требований к объему памяти ЭВМ. Поэтому его следует использовать при расчетах схем электрических сетей с большим числом узлов и ветвей.

Более эффективно применять *прямой метод* расчета токов КЗ, использующий матрицу узловых сопротивлений схемы и имеющий следующие преимущества перед итерационным: отсутствуют затруднения, связанные со сходимостью вычислительного процесса; сокращается время счета; результаты расчета получаются с достаточно высокой степенью точности. Электрическое состояние сети при КЗ в этом случае представляется обращенной формой системы уравнений узловых напряжений. Ниже описывается алгоритм расчета токов КЗ в электрических сетях, разработанный на основе этого метода.

Исходными данными для расчета трехфазного КЗ является заданная схема замещения сети, сопротивления ветвей которой приведены к базисному напряжению. Сеть отображается комплексными сопротивлениями ветвей. Генераторы в схеме замещения представляются активными ветвями с э. д. с., включенными за переходными сопротивлениями источников, нагрузки — ветвями с комплексными сопротивлениями. В начальный момент переходного процесса э. д. с. генераторов не меняют своего значения. Узлы схемы обозначаются номерами 1, 2, ..., n, а узлу «земля» с напряжением, равным нулю, присваивается номер n + 1.

Исходная информация об электрической сети содержит следующие данные: по каждой ветви схемы — пару узлов ij, представляющих собой концы ветви, действительную и мнимую части комплексного сопротивления (z_{ij} и z_{ij}^{*}); по каждому узлу подключения генераторов — номер узла i, переходные сопротивления X_i, действительную и мнимую части комплексной э. д. с. генератора (E_i и E_i^{*}); номера узлов k схемы, в которых рассматриваются КЗ.

На первом этапе расчета необходимо преобразовать исходную схему замещения сети, заменив заданные в схеме активные ветви с сопротивлениями X_i и э. д. с. генераторов E_i, E_i^{*} пассивными ветвями с теми же сопротивлениями и эквивалентными источниками тока. Значение тока эквивалентного источника определяется выражением

$$I_i = (E_i + jE_i^*) / (jx_i). \quad (5.77)$$

Обычно узловые токи источников преобразованной схемы ориентированы в той системе координат, в которой ранее были определены

для нормального установившегося режима работы сети переходные э. д. с. генераторов.

До возникновения КЗ электрическое состояние сети можно описать уравнением

$$\sum_{j=1}^n z_{ij} I_j = U_i^{(n)}, \quad (5.78)$$

где z_{ij} — элемент матрицы узловых сопротивлений сети; I_j — узловой ток (для узлов подключения генераторов равен току эквивалентного источника, для остальных узлов схемы — нулю); U_i⁽ⁿ⁾ — напряжение узла i схемы в нормальном режиме работы сети.

При появлении трехфазного КЗ в каком-либо узле k схемы сети напряжение в этом узле U_k = 0. В узле k возникает дополнительный узловой ток с направлением от узла и равный току I_k КЗ. Так как напряжение в узле k схемы известно, то уравнение, соответствующее этому узлу, позволяет найти ток КЗ в месте повреждения. Как видно, электрическое состояние сети при трехфазном КЗ в узле k схемы можно описать системой линейных алгебраических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^n z_{kj} I_j - z_{kk} I_k &= 0; \\ \sum_{j=1}^n z_{kj} I_j - z_{ik} I_k &= U_i, \end{aligned} \right\} \quad (5.79)$$

где i = 1, 2, ..., n; i ≠ k.

Из системы уравнений (5.79) можно определить ток КЗ и остаточные напряжения в узлах схемы:

$$I_k^{(3)} = \sum_{j=1}^n z_{kj} I_j / z_{kk} = U_k^{(n)} / z_{kk}; \quad (5.80)$$

$$U_i = \sum_{j=1}^n z_{ij} I_j - z_{ik} I_k = U_i^{(n)} - z_{ik} I_k, \quad (5.81)$$

где i = 1, 2, ..., n; i ≠ k.

Зная остаточные напряжения в узлах схемы, находят параметры режима КЗ в электрической сети:

токи в ветвях преобразованной схемы сети

$$I_{ij} = (U_i - U_j) / z_{ij}; \quad (5.82)$$

ток, создаваемый каждым генератором в исходной схеме сети,

$$I_{gi} = (E_i - U_i) / z_{gi}; \quad (5.83)$$

входные сопротивления исходной схемы сети

$$z_{vxi} = E_i / I_{gi}. \quad (5.84)$$

Разделяя комплексные величины на действительные и мнимые части

$$E_i = E_i + jE_i'; \quad I_i = I_i + jI_i';$$

$$U_i = U_i + jU_i'; \quad z_{ij} = z_{ij} + jz_{ij}'$$

и подставляя их соответственно в (5.77), (5.78) и (5.80) — (5.84), получают выражения, удобные для программирования и расчета на ЭВМ.

Отметим, что цифровые ЭВМ активно используются для решения широкого круга задач, связанных с исследованиями и расчетом электромагнитных параметров аварийных режимов в энергетической системе и крупных СЭС. К ним относятся [11, 19]: определение влияния на мощность КЗ активно сопротивления и емкости проводимости ЛЭП напряжением 110—750 кВ; расчет уставок релейной защиты (дистанционных защит, защит от КЗ на землю, токовых защит от междуфазных КЗ); расчет однофазных токов КЗ в сетях напряжением 500—750 кВ с учетом важнейших дополнительных факторов (доаварийного режима, емкостных проводимостей ЛЭП и т. п.); расчет аварийных неполнофазных режимов в сложной электрической сети; исследование и расчет токов КЗ, создаваемых группой

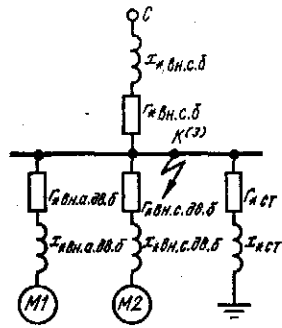


Рис. 5.24. Схема замещения типового узла комплексной нагрузки промышленного предприятия

асинхронных и синхронных двигателей (определение начального значения периодической составляющей тока КЗ, степени затухания периодической и аperiodической составляющих); анализ и получение расчетных кривых для современных мощных генераторов. Комплекс расчетных программ обеспечивается общей информационной базой, в которую входит схема электрической сети. В основу комплекса положены принципы диалога человека с ЭВМ. Программы позволяют выполнять как оперативные, так и плановые расчеты. В целом это предопределяет разработку и внедрение систем автоматического проектирования электроснабжения промышленных предприятий.

Примеры разработанных алгоритмов и программ расчета токов КЗ в СЭС промышленных предприятий приведены в [30]. Их реализация предусматривает математическое моделирование в программе всех элементов СЭС и связей между ними, что является трудосложной задачей.

Следует обратить внимание на особенности схем электроснабжения предприятия, основная функция которых — распределение электрической энергии: наличие узлов нагрузки, которые в режиме КЗ могут подпитываться от групп двигателей разного типа; характерным является расчет токов КЗ в узлах распределения электрической энергии.

Схема замещения типового узла комплексной нагрузки промышленного предприятия показана на рис. 5.24. К такому виду исходная

СЭС предприятия легко может быть приведена аналитически или с использованием расчетных моделей. Вычисление токов КЗ в такой схеме замещения многократно повторяется и может быть выполнено на микроЭВМ в диалоговом режиме по подпрограммам для разных источников питания места КЗ. В качестве исходных данных для расчета могут быть взяты или статистические данные о составе и параметрах комплексных узлов нагрузки различного типа, или параметры эквивалентных моделей реальной СЭС, преобразованной к рассматриваемому узлу. Ниже даны примеры составления указанных подпрограмм расчета трехфазного КЗ в узле комплексной нагрузки на языке БЕЙСИК с использованием изложенных методик.

Пример 5.13. Составить подпрограмму и рассчитать по ней сверхпереходный и ударный токи трехфазного КЗ, создаваемые источниками питающей электрической системы, для схемы замещения, показанной на рис. 5.24. Исходные данные для расчета указаны в табл. 5.7.

Таблица 5.7. Исходные данные к примеру 5.13 и результаты расчета

Показатели	Обозначение	Идентификатор	Значения показателей	
			исходное	расчетное
Сверхпереходный ток	I''	I1	—	17,52 кА
Сверхпереходная э. д. с.	E''_0	E1	—	1,173
Сверхпереходное сопротивление источника	x''_{*d}	X1	0,18	—
Базисные условия:				
мощность	S_0	S3	100 МВ·А	—
напряжение	U_0	U3	6,3 кВ	—
ток	I_0	I3	—	9,164 кА
Внешнее сопротивление связи с источником	$x_{*н.с.б}$	X3	0,4	—
	$r_{*н.с.б}$	R3	0,2	—
Параметры источника в исходном режиме:				
напряжение	$U_{*(0)}$	U0	1	—
ток	$I_{*(0)}$	I0	1	—
функции угла сдвига фаз	$\sin \varphi_{(0)}$	F1	0,6	—
	$\cos \varphi_{(0)}$	F2	0,8	—
Мощность источника	$S_{ном}$	S0	100 МВ·А	—
Среднее номинальное напряжение ступени, где находится источник	$U_{ср.с}$	U2	6,3 кВ	—
Постоянная времени	T_a	T1	—	0,0092 с
Ударный коэффициент	k_y	K2	—	1,34
Ударный ток	i_y	I2	—	33,17 кА
Номинальное напряжение источника	U_c	U9	6 кВ	—

Решение. В момент КЗ периодическая составляющая тока определяется выражением (5.3) с учетом выражений (2.4), (5.1) и равенства $x_{*рез.б} = x_{*н.с.б} + x_{*дб}$. Ударный ток КЗ вычисляем по формуле (4.8). Подпрограмма расчета

имеет вид

```

400 REM 'РАСЧЕТ СВЕРХПЕРЕХОДНОГО УДАРНОГО ТОКОВ'
410 REM 'К.З. ОТ ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ'
415 PRINT 'ВВЕДИТЕ : X1, S3, U3, X3, R3, U0, I0, F1, F2, S0, U2, U9'
420 INPUT X1, S3, U3, X3, R3, U0, I0, F1, F2, S0, U2, U9
421 PRINT 'X1='; X1, 'S3='; S3, 'U3='; U3, 'X3='; X3, 'R3='; R3, 'U0='; U0
422 PRINT 'I0='; I0, 'F1='; F1, 'F2='; F2, 'S0='; S0, 'U2='; U2, 'U9='; U9
430 E1=SQR((U0*F2)^2+(U0*F1+I0*X1)^2)*U3/U9
440 I3=S3/(U3*SQR(3))
450 X1=X1*S3/S0
460 I1=E1*I3/SQR((X1+X3)^2+R3^2)
470 IF R3=0 THEN 500
480 T1=(X1+X3)/(314*R3)
490 GO TO 510
500 T1=.05
510 K2=1+EXP(-.01/T1)
520 I2=K2*I1*SQR(2)
530 PRINT 'ТОКИ К.З. ОТ ИСТОЧНИКА СИСТЕМЫ:'
540 PRINT 'СВЕРХПЕРЕХОДНЫЙ='; I1; 'КА'
550 PRINT 'УДАРНЫЙ='; I2; 'КА'
560 RETURN

```

Результаты расчета приведены в табл. 5.7 (при расчете оператор RETURN заменяется операторами конца программы STOP, END).

Пример 5.14. Составить подпрограмму и рассчитать по ней сверхпереходный и ударный токи трехфазного КЗ, создаваемые синхронным двигателем, для схемы замещения, показанной на рис. 5.24. Исходные данные для расчета указаны в табл. 5.8.

Таблица 5.8. Исходные данные к примеру 5.14 и результаты расчета

Показатели	Обозначение	Идентификатор	Значения показателей	
			исходное	расчетное
Сверхпереходный ток двигателя	$I''_{с.дв}$	I4	—	3,43 кА
Номинальные параметры двигателя:				
мощность	$S_{с.дв}$	S6	5 МВ·А	—
напряжение	$U_{с.дв}$	U6	6 кВ	—
ток	$I_{с.дв}$	I6	—	0,481 кА
коэффициент мощности	$\cos \varphi_{ном}$ ($\sin \varphi_{ном}$)	F4 F5	0,9 0,345	—
Сверхпереходное сопротивление	x''_d	X4	0,137	—
Сверхпереходная э. д. с.	E''_*	E4	—	1,021
Базисная мощность	S_0	S5	100 МВ·А	—
Составляющие внешнего сопротивления:				
реактивная	$x_{вн.б}$	X5	0,12	—
активная	$r_{вн.б}$	R5	0,08	—
Постоянные времени	T_a $T_{a.дв}$	T5 T6	— 0,07 с	0,0445 с —
Ударный коэффициент	k_y	K5	—	1,799
Ударный ток	i_y	I5	—	8,73 кА

Решение. Сверхпереходный ток КЗ двигателя при подпитке через внешнее сопротивление (приводится к базисным условиям — номинальным параметрам двигателя) определяется по формуле (5.3) с учетом выражения (5.1) и равенств $U_{*(0)} = 1$, $I_{*(0)} = 1$. Ударный ток КЗ вычисляем по формуле (5.32) с учетом выражений (5.31) и (5.34). Подпрограмма расчета имеет вид

```

600 REM 'РАСЧЕТ СВЕРХПЕРЕХОДНОГО И УДАРНОГО'
610 REM 'ТОКОВ К.З. ОТ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ'
612 PRINT 'ВВЕДИТЕ : S6, U6, F4, F5, X4, S5, X5, R5, T6'
620 INPUT S6, U6, F4, F5, X4, S5, X5, R5, T6
621 PRINT 'S6='; S6, 'U6='; U6, 'F4='; F4, 'F5='; F5, 'X4='; X4
622 PRINT 'S5='; S5, 'X5='; X5, 'R5='; R5, 'T6='; T6
630 E4=SQR(F4^2+(F5+X4)^2)
640 I6=S6/(U6*SQR(3))
650 X5=X5*S6/S5 \ R5=R5*S6/S5
660 I4=E4*I6/SQR((X4+X5)^2+R5^2)
670 T5=(X4+X5)/(X4/T6+314*R5)
680 K5=1+EXP(-.01/T5)
690 I5=K5*I4*SQR(2)
700 PRINT 'ТОКИ К.З. ОТ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ : '
710 PRINT 'СВЕРХПЕРЕХОДНЫЙ='; I4; 'КА'
720 PRINT 'УДАРНЫЙ='; I5; 'КА'
730 RETURN

```

Результаты расчета приведены в табл. 5.8 (при расчете оператор RETURN заменяется операторами конца программы STOP, END).

Пример 5.15. Составить подпрограмму и рассчитать по ней сверхпереходный и ударный токи трехфазного КЗ, создаваемые асинхронным двигателем, для схемы замещения, показанной на рис. 5.24. Исходные данные для расчета указаны в табл. 5.9.

Таблица 5.9. Исходные данные к примеру 5.15 и результаты расчета

Показатели	Обозначение	Идентификатор	Значения показателей	
			исходное	расчетное
Сверхпереходный ток	$I''_{дв}$	I7	—	0,581 кА
Сверхпереходная э. д. с.	E''_*	E7	—	0,917
Номинальные параметры двигателя:				
мощность	$P_{дв}$	P9	1 МВт	—
напряжение	$U_{дв}$	U9	6 кВ	—
пусковой ток	$I_{пуск}$	I9	6	—
коэффициент мощности	$\cos \varphi_{ном}$	F7	0,9	—
Составляющие внешнего сопротивления:				
реактивная	($\sin \varphi_{ном}$) $x_{вн.б}$	F8 X8	0,345	—
активная	$r_{вн.б}$	R8	0,12	—
Постоянные времени	T_a $T_{a.дв}$ $T_{расч}$ $T_{дв.расч}$	T3 T4 T7 T8	— 0,04 — 0,04	0,037 с — 0,0405 с —
Ударный ток	i_y	I8	—	1,27 кА

Продолжение табл. 5.9

Показатели	Обозначение	Идентификатор	Значения показателей	
			исходное	расчетное
Ударный коэффициент	k_y	K8	—	1,542
Базисная мощность	S_0	S8	100 МВ·А	—
Сверхпереходное сопротивление	x''	X7	—	0,167

Решение. Сверхпереходный ток КЗ вычисляем по формуле (5.21), но предварительно составляющие внешнего сопротивления приводим к номинальным параметрам двигателя, а э. д. с. определяем по формуле (5.1).

Ударный ток рассчитываем по формуле (5.32) с учетом выражений (5.33) (5.27) и (5.30). Подпрограмма расчета имеет вид

```

800 REM 'РАСЧЕТ СВЕРХПЕРЕХОДНОГО И УДАРНОГО ТОКОВ'
810 REM 'К.З. ОТ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ'
812 PRINT 'ВВЕДИТЕ :P9,U9,I9,F7,F8,R8,T4,T8,S8'
820 INPUT P9,U9,I9,F7,F8,X8,R8,T4,T8,S8
821 PRINT 'P9=';P9,'U9=';U9,'I9=';I9,'F7=';F7,'F8=';F8
822 PRINT 'X8=';X8,'R8=';R8,'T4=';T4,'T8=';T8,'S8=';S8
830 X7=1/I9
840 E7=SQR(F7^2+(F8-X7)^2)
850 X8=X8*P9/(S8*F7) \ R8=R8*P9/(S8*F7)
860 I7=E7*P9/(U9*F7*SQR(3)*SQR((X7+X8)^2+R8^2))
870 T7=T8*(1+X8/X7)
880 T3=(X7+X8)/(X7/T4+314*R8)
890 K8=EXP(-.01/T7)+EXP(-.01/T3)
900 I8=I7*K8*SQR(2)
910 PRINT 'ТОКИ К.З. ОТ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ:'
920 PRINT 'СВЕРХПЕРЕХОДНЫЙ=';I7;'КА'
930 PRINT 'УДАРНЫЙ=';I8;'КА'
940 RETURN
    
```

Результаты расчета приведены в табл. 5.9 (при расчете оператор RETURN заменяется операторами конца программы STOP, END).

Пример 5.16. Составить программу и рассчитать по ней сверхпереходный и ударный токи трехфазного КЗ при подпитке его в узле нагрузки N источниками электрической системы, группой из Y синхронных двигателей и группой из Z асинхронных двигателей. Схема замещения системы показана на рис. 5.24.

Решение. Используем подпрограммы из примеров 5.13—5.15 и дополним их текст следующими операторами:

```

10 REM 'РАСЧЕТ СВЕРХПЕРЕХОДНОГО И УДАРНОГО'
20 REM 'ТОКОВ К.З. В УЗЛЕ НАГРУЗКИ'
30 PRINT 'ВВЕДИТЕ N,Y,Z:'
40 INPUT N,Y,Z
50 PRINT 'ВВЕДИТЕ: ','N=';N,'Y=';Y,'Z=';Z
60 DIM A(10),B(10),C(10),M(10),V(10),T(10)
70 FOR I=1 TO N
80 PRINT 'НОМЕР ИСТОЧНИКА =';I
90 GOSUB 400
100 D=I \ J0=I+1 \ A(1)=0 \ M(1)=0 \ A(J0)=A(D)+I1 \ A(D)=A(J0)
110 M(J0)=M(D)+I2 \ M(D)=M(J0)
115 PRINT 'A(J0);J0;'=';A(J0),'M(J0);J0;'=';M(J0)
120 NEXT I
130 FOR J=1 TO Y
140 PRINT 'НОМЕР СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ =';J
150 GOSUB 600
    
```

```

160 D=J \ K0=J+1 \ B(1)=0 \ V(1)=0 \ B(K0)=B(D)+I4 \ B(D)=B(K0)
170 V(K0)=V(D)+I5 \ V(D)=V(K0)
175 PRINT 'B(K0);K0;'=';B(K0),'V(K0);K0;'=';V(K0)
180 NEXT J
190 FOR K=1 TO Z
210 PRINT 'НОМЕР АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ =';K
215 GOSUB 800
217 GOSUB 800
220 D=K \ I0=K+1 \ C(1)=0 \ T(1)=0 \ C(I0)=C(D)+I7 \ C(D)=C(I0)
230 T(I0)=T(D)+I8 \ T(D)=T(I0)
231 PRINT 'C(I0);I0;'=';C(I0),'T(I0);I0;'=';T(I0)
235 NEXT K
236 H=A(J0) \ H1=B(K0) \ H2=C(I0)
240 F=H+H1+H2
245 W=M(J0) \ W1=V(K0) \ W2=T(I0)
250 P=W+W1+W2
260 PRINT 'ТОКИ К.З. В УЗЛЕ:'
270 PRINT 'СВЕРХПЕРЕХОДНЫЙ=';F;'КА'
280 PRINT 'УДАРНЫЙ=';P;'КА'
290 STOP
300 END
    
```

Для контрольной проверки программы воспользуемся исходными данными из примеров 5.13—5.15 при $N = 2$, $Y = 5$, $Z = 5$. В результате получим $I_{\Sigma}^* = 55,1$ кА; $i_{y\Sigma} = 116,34$ кА.

Контрольные вопросы

1. Как определить начальное значение тока КЗ, создаваемого источником неограниченной мощности, генератором, двигателем, обобщенной нагрузкой?
2. На чем основан метод расчетных кривых? Какова область применения этого метода?
3. Для каких расчетных условий определения тока КЗ применяются типовые кривые?
4. Как определяется значение периодической составляющей тока КЗ в расчетный момент времени по расчетным (типовым) кривым?
5. Можно ли при расчете токов КЗ по расчетным кривым объединить в один эквивалентный источник ветвь питания от электрической системы с ветвями питания от генераторов конечной мощности?
6. В каких случаях можно выполнять расчет токов КЗ по их общему изменению?
7. Когда возникает необходимость расчета токов КЗ по их индивидуальному изменению?
8. Как выполняется расчет при подпитке точки КЗ синхронными (асинхронными) двигателями?
9. Каковы особенности расчета токов КЗ в электрических сетях напряжением до 1 кВ?
10. Как определяется активное переходное сопротивление при КЗ на различных ступенях распределения электрической энергии в сети напряжением до 1 кВ?

Темы рефератов

1. Источники питания места КЗ и определение создаваемых ими токов КЗ.
2. Сравнение результатов расчета тока КЗ по его общему и индивидуальному изменению для конкретной схемы СЭС.
3. Особенности расчета тока КЗ для СЭС предприятия.
4. Разработка алгоритма и программы расчета тока КЗ в сети напряжением до 1 кВ для типовой схемы электроснабжения.
5. Применение моделей для расчета режимов СЭС с КЗ.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТА НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ

6.1. Метод симметричных составляющих

При исследовании трехфазных симметричных схем исходят из предположения, что эквивалентную схему короткозамкнутой цепи можно представить в однолинейном изображении и расчет вести для одной фазы, поскольку явления, происходящие в остальных фазах, аналогичны.

При появлении несимметрии в сети нарушается симметрия токов в фазах, фазных и линейных напряжений, падений напряжения в элементах системы и других электрических величин. Из этого следует, что при несимметричном КЗ нельзя ограничиться расчетом только одной фазы. Если при этом исходить из обычного метода расчета, то потребовалось бы составить схему замещения для всех трех фаз рассматриваемой сети с учетом взаимоиндукции между ними и записать уравнения для определения искомых токов и напряжений. Такой метод решения задачи громоздок даже в случае простой схемы. Расчет же сложных схем требует больших затрат труда и времени.

Сравнительно просто несимметричные КЗ, как и другие несимметричные режимы в электрических сетях (обрывы проводов, сложные виды повреждений, работа по системе «два провода — земля» и т. п.), можно рассчитывать с использованием метода симметричных составляющих, идея которого состоит в следующем. В декартовой системе координат любой вектор имеет две степени свободы и может быть представлен через его проекции в виде

$$\dot{N} = N_x + jN_y = |\dot{N}| e^{j \arctg(N_y/N_x)}$$

Отсюда следует, что в общем случае любая система трех несимметричных векторов имеет шесть степеней свободы. Несимметричную систему трех векторов можно представить в виде трех симметричных систем, каждая из которых имеет две степени свободы. Исходя из физической картины явлений в электрических системах, используют три симметричные системы: прямой, обратной и нулевой последовательностей. Для каждой из этих систем явления в фазах подобны, что позволяет воспользоваться однолинейными схемами для каждой последовательности и вести расчет для одной фазы. Такая фаза находится в условиях, отличающихся от условий для двух других фаз, и называется *особой*. В этом одно из главных достоинств метода симметричных составляющих. Основные положения этого метода состоят в следующем. Любой из векторов симметричной трехфазной системы можно представить одноименным вектором другой фазы с помощью оператора поворота

$$\left. \begin{aligned} a &= - (1/2) + j\sqrt{3}/2 = e^{j120^\circ}; \\ a^2 &= - (1/2) - j\sqrt{3}/2 = e^{-j120^\circ} = e^{j240^\circ}. \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

Умножение вектора на оператор a означает поворот его на 120° в положительном направлении (против хода часовой стрелки). Ум-

ножение на a^2 соответствует повороту на 240° в том же направлении или на 120° в противоположном направлении.

Сумма операторов поворота

$$a^2 + a = -1;$$

их разность

$$a^2 - a = -j\sqrt{3}.$$

Так как $a^3 = e^{j360^\circ} = 1$, то $a^{3n+m} = a^m$, если m и n — целые числа.

В симметричной трехфазной системе (рис. 6.1) каждый из векторов можно представить следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} N_A &= aN_B = a^2N_C; \\ N_B &= aN_C = a^2N_A; \\ N_C &= aN_A = a^2N_B. \end{aligned} \right\} \quad (6.2)$$

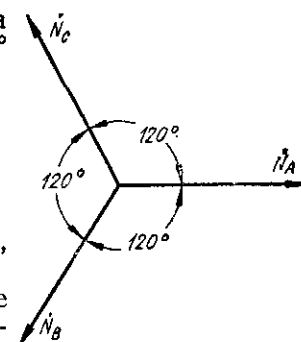


Рис. 6.1. Симметричная трехфазная система векторов

Любую несимметричную систему трех векторов можно разложить на три симметричные системы: прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Система прямой последовательности состоит из трех одинаковых векторов, сдвинутых друг относительно друга на 120° и чередующихся в такой же последовательности, как и основная симметричная система (рис. 6.2, а). Эта система обозначается индексом 1.

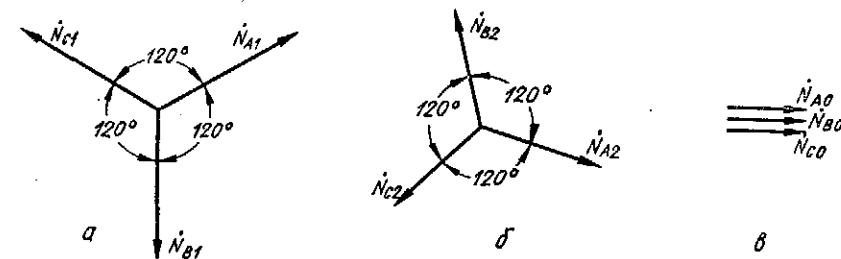


Рис. 6.2. Симметричные системы векторов прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей

Система обратной последовательности также состоит из трех одинаковых векторов, сдвинутых друг относительно друга на 120° , но чередование этих векторов противоположное основной симметричной системе (рис. 6.2, б). Эта система обозначается индексом 2.

Поскольку векторы системы прямой (обратной) последовательности в сумме равны нулю, эти системы являются уравновешенными:

$$\dot{N}_{A1} + \dot{N}_{B1} + \dot{N}_{C1} = N_{A1}(1 + a^2 + a) = 0;$$

$$\dot{N}_{A2} + \dot{N}_{B2} + \dot{N}_{C2} = N_{A2}(1 + a + a^2) = 0.$$

Система нулевой последовательности состоит из трех одинаковых векторов, совпадающих по направлению (рис. 6.2, в). Эта система

векторов обозначается индексом 0. Система нулевой последовательности симметрична, но не уравновешена:

$$\dot{N}_{A0} + \dot{N}_{B0} + \dot{N}_{C0} = 3\dot{N}_{A0} \neq 0.$$

По составляющим прямой, обратной и нулевой последовательностей можно восстановить исходную несимметричную систему:

$$\left. \begin{aligned} \dot{N}_A &= \dot{N}_{A1} + \dot{N}_{A2} + \dot{N}_{A0}; \\ \dot{N}_B &= \dot{N}_{B1} + \dot{N}_{B2} + \dot{N}_{B0}; \\ \dot{N}_C &= \dot{N}_{C1} + \dot{N}_{C2} + \dot{N}_{C0}. \end{aligned} \right\} \quad (6.3)$$

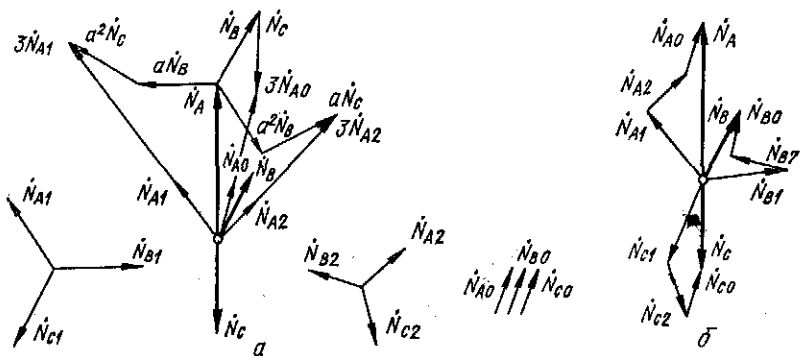


Рис. 6.3. Разложение несимметричной трехфазной системы на симметричные составляющие (а) и их суммирование для получения исходной системы (б)

Если принять за особую фазу А, то с учетом (6.1), (6.2) и рис. 6.2 систему уравнений (6.3) можно записать в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \dot{N}_A &= \dot{N}_{A1} + \dot{N}_{A2} + \dot{N}_{A0}; \\ \dot{N}_B &= a^2\dot{N}_{A1} + a\dot{N}_{A2} + \dot{N}_{A0}; \\ \dot{N}_C &= a\dot{N}_{A1} + a^2\dot{N}_{A2} + \dot{N}_{A0}. \end{aligned} \right\} \quad (6.4)$$

Уравнения (6.4) позволяют выделить из несимметричной системы симметричные составляющие. Для этого необходимо сложить все три уравнения, предварительно уравнив коэффициенты при искомой составляющей (табл. 6.1). Например, чтобы выделить составляющую

Таблица 6.1. Коэффициенты, используемые для выделения симметричных составляющих

Уравнения несимметричной системы векторов	Последовательность		
	прямая	обратная	нулевая
$\dot{N}_A = \dot{N}_{A1} + \dot{N}_{A2} + \dot{N}_{A0}$	1	1	1
$\dot{N}_B = a^2\dot{N}_{A1} + a\dot{N}_{A2} + \dot{N}_{A0}$	a	a ²	1
$\dot{N}_C = a\dot{N}_{A1} + a^2\dot{N}_{A2} + \dot{N}_{A0}$	a ²	a	1

прямой последовательности, достаточно все три уравнения (6.4) соответственно умножить на коэффициенты 1, a, a², а затем сложить. После сложения составляющие \dot{N}_{A1} , \dot{N}_{A2} , \dot{N}_{A0} будут выражены через векторы фазных величин \dot{N}_A , \dot{N}_B , \dot{N}_C следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \dot{N}_{A1} &= (\dot{N}_A + a\dot{N}_B + a^2\dot{N}_C)/3; \\ \dot{N}_{A2} &= (\dot{N}_A + a^2\dot{N}_B + a\dot{N}_C)/3; \\ \dot{N}_{A0} &= (\dot{N}_A + \dot{N}_B + \dot{N}_C)/3. \end{aligned} \right\} \quad (6.5)$$

На рис. 6.3, а графически определены составляющие \dot{N}_{A1} , \dot{N}_{A2} и \dot{N}_{A0} системы векторов \dot{N}_A , \dot{N}_B , \dot{N}_C в соответствии с (6.5), а на рис. 6.3, б по найденным составляющим согласно (6.3) снова получены исходные фазные векторы \dot{N}_A , \dot{N}_B , \dot{N}_C .

6.2. Основные соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений

Строгий математический анализ несимметричных переходных процессов существенно затруднен тем, что при таких процессах образуется пульсирующее магнитное поле ротора, которое имеет полный спектр высших гармоник. Системы токов прямой и обратной последовательностей разных частот при этом оказываются взаимно связанными. Поэтому в расчетах несимметричных переходных процессов допускают, что:

в симметричных цепях токи и напряжения различных последовательностей не взаимодействуют друг с другом;

каждый элемент цепи оказывает свое специфическое сопротивление прохождению токов различных последовательностей.

Считают также, что симметричные составляющие токов связаны с симметричными составляющими напряжений только одноименной последовательности. Иными словами, если какой-либо элемент цепи симметричен и обладает по отношению к симметричным составляющим токов прямой I_{A1} , обратной I_{A2} и нулевой I_{A0} последовательностей соответственно сопротивлениями z_1 , z_2 , z_0 , то симметричные составляющие падения напряжения в этом элементе

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_1 &= z_1 I_1; \\ \Delta U_2 &= z_2 I_2; \\ \Delta U_0 &= z_0 I_0. \end{aligned} \right\} \quad (6.6)$$

Сопротивления z_1 , z_2 , z_0 для сокращения обычно называют *сопротивлениями прямой, обратной и нулевой последовательностей*.

На рис. 6.4, а показана трехфазная цепь при однофазном КЗ в точке К. Действительный ток КЗ протекает в элементах схемы под действием э. д. с. генераторов; при этом в месте КЗ создается несимметричная система напряжений (рис. 6.4, б), которую можно разложить на три симметричные последовательности (рис. 6.4, в)

и считать, что напряжение данной последовательности в месте КЗ для каждой фазы приложено к своей эквивалентной схеме. Выделив из этой системы симметричные составляющие фазы *A* и приложив каждую из них к схеме своей последовательности, получим три отдельные схемы замещения: прямой, обратной и нулевой последовательностей (рис. 6.4, *з*).

По своей природе э. д. с. симметричного трехфазного источника питания образуют основную симметричную систему векторов. При симметричной схеме короткозамкнутой цепи такая система э. д. с.

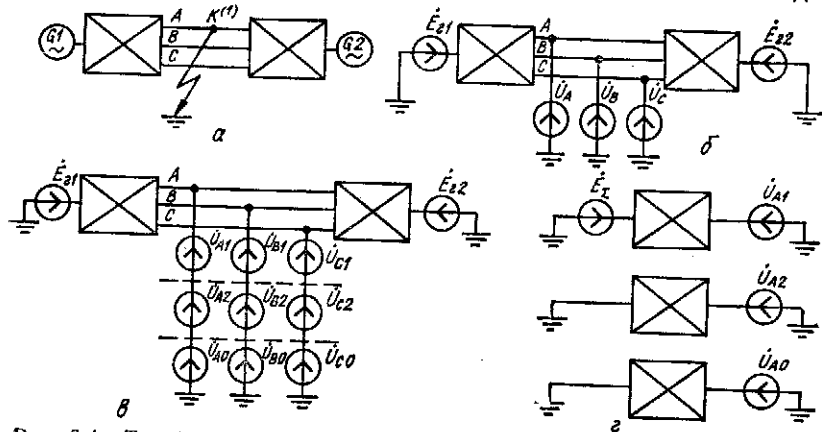


Рис. 6.4. Трехфазная цепь при однофазном КЗ (*а*), несимметричная система напряжений в месте КЗ (*б*), ее разложение на три симметричные системы (*в*) и схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей (*г*)

может вызвать в контуре только токи прямой последовательности, так как напряжения или э. д. с. других последовательностей отсутствуют.

При нарушении в системе симметрии возникают несимметричные напряжения, связанные с появлением в контуре несимметричной системы токов. Токи обратной и нулевой последовательностей образуют в генераторе соответствующие магнитные потоки, которые, сцепляясь с его обмотками, в свою очередь, вызывают соответствующие э. д. с. Последние можно учитывать падением напряжения в реактивном сопротивлении генератора той или иной последовательности аналогично тому, как э. д. с. реакции якоря генератора учитывается падением напряжения в соответствующем реактивном сопротивлении. Поэтому можно считать, что при любом режиме генератор вырабатывает э. д. с. только прямой последовательности, а э. д. с. обратной и нулевой последовательностей генератора равны нулю.

Таким образом, несимметричные режимы в системе можно рассчитывать по эквивалентным однолинейным схемам замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей, имея в виду, что протекающие токи в схемах замещения разных последовательностей зависят лишь от действующей в схеме разности потенциалов и сопротивления данной последовательности.

Основные уравнения для каждой последовательности имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{\kappa 1} &= E_{\Sigma} - z_{1\text{рез}} \dot{I}_{\kappa 1}; \\ \dot{U}_{\kappa 2} &= 0 - z_{2\text{рез}} \dot{I}_{\kappa 2}; \\ \dot{U}_{\kappa 0} &= 0 - z_{0\text{рез}} \dot{I}_{\kappa 0}, \end{aligned} \right\} \quad (6.7)$$

где $\dot{U}_{\kappa 1}$, $\dot{U}_{\kappa 2}$, $\dot{U}_{\kappa 0}$; $I_{\kappa 1}$, $I_{\kappa 2}$, $I_{\kappa 0}$ — симметричные составляющие напряжения и тока в месте КЗ; E_{Σ} — результирующая э. д. с. прямой последовательности относительно точки КЗ; $z_{1\text{рез}}$, $z_{2\text{рез}}$, $z_{0\text{рез}}$ — результирующие сопротивления схем соответствующих последовательностей относительно точки КЗ. Из (6.7) следует, что при выбранном способе учета э. д. с., обусловленных реакцией токов отдельных последовательностей, образование токов обратной и нулевой последовательностей можно связывать с появлением в месте КЗ напряжений обратной и нулевой последовательностей.

При продольной несимметрии, вызванной обрывами и изменениями сопротивлений фаз (см. гл. 8), основные уравнения для каждой последовательности имеют такой же вид, только вместо $\dot{U}_{\kappa 1}$, $\dot{U}_{\kappa 2}$, $\dot{U}_{\kappa 0}$ в них следует ввести разности фазных напряжений соответствующих последовательностей по концам местной несимметрии, а сопротивления $z_{1\text{рез}}$, $z_{2\text{рез}}$, $z_{0\text{рез}}$ должны представлять собой результирующие сопротивления схем соответствующих последовательностей относительно места рассматриваемой несимметрии.

6.3. Сопротивления элементов токам отдельных последовательностей

Все сопротивления, которыми характеризуются отдельные элементы в нормальном симметричном режиме, являются сопротивлениями прямой последовательности. Для элемента, магнитосвязанные цепи которого неподвижны друг относительно друга, сопротивления прямой и обратной последовательностей одинаковы, так как от перемены порядка чередования фаз симметричной трехфазной системы токов взаимоиндукция между фазами элемента не меняется. Таким образом, для трансформаторов, автотрансформаторов, ВЛ, КЛ и реакторов $r_1 = r_2$, $x_1 = x_2$.

Реактивное сопротивление обратной последовательности элементов с вращающимися полями (синхронные генераторы, компенсаторы, двигатели) зависит от конструкции машины (симметричности ротора). Токи обратной последовательности образуют магнитный поток, который перемещается относительно статора с синхронной скоростью в обратном направлении. При своем перемещении этот поток встречает различное сопротивление в расточке статора, поочередно совмещаясь то с продольной осью ротора, то с поперечной.

Если воздушный зазор по всей окружности расточки машины одинаков и ротор симметричен, то в своем перемещении поток обратной последовательности всюду встречает одинаковое сопротив-

ление, как и поток нормального чередования. Ввиду этого сопротивления обратной последовательности мало отличаются от сопротивлений прямой последовательности. При различном сопротивлении магнитному потоку по продольной и поперечной осям реактивное сопротивление находится между значениями его продольной и поперечной составляющих. В таком случае реактивное сопротивление обратной последовательности можно считать как среднее между продольным и поперечным сопротивлениями машины.

Для машин с успокоительными обмотками

$$x_2 = (x_d'' + x_q'')/2; \quad (6.8)$$

для явнополюсных машин без успокоительных обмоток

$$x_2 = \sqrt{x_d' x_q'}. \quad (6.9)$$

Значения реактивного сопротивления обратной последовательности приводятся в каталогах и справочниках как параметры машин. При отсутствии этих данных можно принимать для машин с успокоительными обмотками $x_2 = 1,22x_d''$, а для явнополюсных машин без успокоительных обмоток $x_2 = 1,45x_d'$. В приближенных практических расчетах обычно идут на дополнительное упрощение, полагая для турбогенераторов и машин с продольно-поперечными успокоительными обмотками $x_2 \approx x_d''$.

Для асинхронных двигателей сопротивление обратной последовательности можно считать также равным их сверхпереходному сопротивлению $x_2 = x_d'$, которое определяется выражением

$$x_{*2} \approx 1/I_{*п},$$

где $I_{*п}$ — каталожное значение кратности пускового тока двигателя по отношению к его номинальному току.

Реактивное сопротивление обратной последовательности обобщенной нагрузки зависит от характера приемников электрической энергии и относительной роли каждого из них в создании нагрузки. Для средней типовой промышленной нагрузки можно полагать, что основная ее часть состоит из асинхронных двигателей, реактивное сопротивление обратной последовательности которых практически такое же, как и в начальный момент внезапного нарушения режима, т. е. $x_2 = x_1 = 0,35$.

Сопротивление нулевой последовательности элементов резко отличается от сопротивлений прямой и обратной последовательностей, поскольку взаимная индукция при этом сказывается иначе. Кроме того, реактивное сопротивление нулевой последовательности зависит от схемы соединения фаз рассматриваемого элемента и схемы заземления нейтрали. Если пути для прохождения токов нулевой последовательности нет, то это равносильно сопротивлению в цепи, равному бесконечности.

В синхронных машинах с заземленной нейтралью протекают токи нулевой последовательности, которые создают одинаковые по значению и совпадающие по времени магнитные потоки. Посколь-

ку фазовые обмотки машины сдвинуты по окружности статора на 120° , магнитные потоки нулевой последовательности машины будут сдвинуты в пространстве друг относительно друга также на 120° . Поэтому можно считать, что результирующий магнитный поток нулевой последовательности в расточке машины равен нулю и реакции ротора не вызывает.

Реактивное сопротивление нулевой последовательности синхронных машин определяется рассеянием магнитного потока в пазах и лобовых частях, причем по значению оно меньше, чем при симметричном трехфазном потоке. Это уменьшение зависит от типа обмотки, из-за чего реактивное сопротивление синхронных машин колеблется в широких пределах:

$$x_0 = (0,15 \div 0,6) x_d''. \quad (6.10)$$

Если нейтраль генератора изолированная, то токи нулевой последовательности в нем не протекают ($x_0 = \infty$) и в эквивалентную схему нулевой последовательности такой генератор не вводится.

Основные нагрузочные ответвления, как правило, работают с изолированной нейтралью, так что пути для токов нулевой последовательности здесь нет. По этой причине можно считать, что реактивное сопротивление нулевой последовательности нагрузочных ответвлений равно бесконечности и вносить их в эквивалентную схему нулевой последовательности не требуется.

Реактивное сопротивление реакторов в основном определяется их самоиндукцией. Взаимоиндукция играет меньшую роль в создании общего реактивного сопротивления реактора из-за большого расстояния между катушками. С учетом этого реактивное сопротивление нулевой последовательности реактора можно полагать равным сопротивлению прямой последовательности ($x_0 = x_1$).

Реактивное сопротивление нулевой последовательности ВЛ зависит от их параметров. Основываясь на том, что токи нулевой последовательности возвращаются через землю, ВЛ трехфазного тока можно замкнуть эквивалентной схемой в виде трех двухпроводных линий «провод — земля» (рис. 6.5). Напряжение, приложенное к одному из концов транспонированной линии передачи, замкнутой накоротко на другом конце, теряется в ее полном сопротивлении. Пренебрегая активным сопротивлением и емкостной проводимостью линий, выражение для определения напряжения прямой последовательности фазы *A* запишем в виде

$$\begin{aligned} U_{A1} &= I_{A1j}x_L + I_{B1j}x_M + I_{C1j}x_M = \\ &= I_{A1j}(x_L + a^2x_M + ax_M) = I_{A1j}(x_L - x_M) = I_{A1j}x_L, \end{aligned} \quad (6.11)$$

где x_L , x_M — реактивные сопротивления самоиндукции фазы и взаимной индукции соответственно.

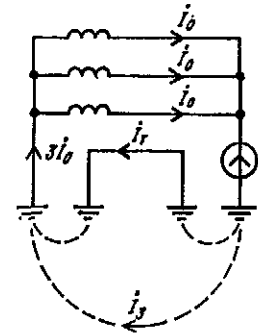


Рис. 6.5. Одноцепная ВЛ трехфазного тока с заземленным тросом

При транспонированной трехфазной линии взаимная индуктивность всех фаз одинакова, в результате чего

$$x_1 = x_L - x_M = x_2, \text{ или } x_L = x_1 + x_M. \quad (6.12)$$

Если к той же линии приложить напряжение нулевой последовательности, то выражение (6.11) примет вид

$$U_{A0} = \dot{I}_{A0j}(x_L + x_M + x_M) = \dot{I}_{A0j}x_0. \quad (6.13)$$

С учетом (6.12) имеем

$$x_0 = x_1 + 3x_M. \quad (6.14)$$

Индуктивные сопротивления x_L и x_M зависят от удельной проводимости земли и частоты тока. Кроме того, x_L зависит от радиуса провода, а x_M — от расстояния между проводами ВЛ.

Таким образом, если в симметричных системах прямой и обратной последовательностей взаимная индукция фазы, принятой за основную, с соседними фазами уменьшает индуктивное сопротивление линии, то в системе нулевой последовательности взаимная индукция приводит к увеличению магнитного потока фазы. Этим в основном и объясняется повышение сопротивления x_0 по сравнению с x_1 и x_2 .

При наличии хорошо проводящего заземленного троса на линии сопротивление x_0 уменьшается за счет взаимной индукции петли трос — провод, так как токи в тросе направлены навстречу токам в проводе (см. рис. 6.5). Стальной трос незначительно уменьшает x_0 в линии, что позволяет не считаться с его влиянием и рассматривать такую ВЛ как линию без троса.

В случае двух параллельных цепей и КЗ за пределами линии или на концах цепей сопротивление нулевой последовательности каждой цепи увеличивается в результате взаимной индукции с соседней цепью. Это сопротивление тем больше, чем больше число параллельных цепей ЛЭП, ибо при одинаковом направлении токов нулевой последовательности взаимная индукция параллельных цепей повышает их общее сопротивление.

Расчетные выражения для определения сопротивлений нулевой последовательности некоторых ВЛ следующие:

одноцепная ЛЭП без троса

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= 0,435 \lg(d_3/R_{cp}); \\ d_3 &= 2,085 \cdot 10^{-3} \sqrt{f\lambda \cdot 10^{-9}}; \\ R_{cp} &= \sqrt[3]{R_{эк.пр} d_{cp}^2}; \\ d_{cp} &= \sqrt[3]{d_{AB} d_{BC} d_{AC}}; \\ R_{эк.пр} &= kR_{пр}, \end{aligned} \right\} \quad (6.15)$$

где x_0 — сопротивление нулевой последовательности линии, Ом/км; d_3 — эквивалентная глубина возврата тока через землю (при отсутствии данных о проводимости земли обычно полагают $d_3 = 1000$ м), м; R_{cp} — средний геометрический радиус системы трех проводов, м;

f — частота тока, Гц; λ — удельная проводимость земли, $1/(\text{Ом} \cdot \text{см})$; d_{cp} — среднее геометрическое расстояние между проводами фаз A, B и C , м; d_{AB}, d_{BC}, d_{AC} — расстояния между проводами фаз A и B, B и C, A и C , м; $R_{эк.пр}$ — эквивалентный радиус провода, м; k — коэффициент (для ЛЭП с пераспечленными сталеалюминевыми проводами $k = 0,95$); $R_{пр}$ — действительный радиус провода, м; одноцепная ЛЭП с одним тросом

$$\left. \begin{aligned} x_0^{тр} &= x_0 - x_{0пр.тр}^2/x_{0тр}; \\ x_{0пр.тр} &= 0,435 \lg(d_3/d_{пр.тр}); \\ x_{0тр} &= 0,435 \lg(d_3/R_{эк.тр}); \\ d_{пр.тр} &= \sqrt[3]{d_{Aтр} d_{Bтр} d_{Cтр}}; \\ R_{эк.тр} &= k_{тр} R_{тр}, \end{aligned} \right\} \quad (6.16)$$

где $x_0^{тр}$ — сопротивление нулевой последовательности линии с тросом, Ом/км; $x_{0пр.тр}$ — сопротивление взаимной индукции между проводами линии и тросом, Ом/км; $x_{0тр}$ — сопротивление нулевой последовательности троса, Ом/км; $R_{эк.тр}$ — эквивалентный радиус троса, м; $k_{тр}$ — коэффициент (для троса из провода АС $k_{тр} = 0,9$); $R_{тр}$ — действительный радиус троса, м; $d_{пр.тр}$ — среднее геометрическое расстояние между фазными проводами и тросом, м; $d_{Aтр}, d_{Bтр}, d_{Cтр}$ — расстояние между тросом и проводами фаз A, B и C , м;

двухцепная ЛЭП без тросов

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= 0,435 \lg(d_3/R_{cp}); \\ x_{0I-II} &= 0,435 \lg(d_3/d_{I-II}); \\ d_{I-II} &= \sqrt[9]{d_{AA'} d_{AB'} d_{AC'} d_{BA'} d_{BB'} d_{BC'} d_{CA'} d_{CB'} d_{CC'}}, \end{aligned} \right\} \quad (6.17)$$

где x_0 — сопротивление нулевой последовательности каждой из двух параллельных линий, Ом/км; x_{0I-II} — сопротивление взаимной индукции нулевой последовательности между двумя параллельными линиями, Ом/км; d_{I-II} — среднее геометрическое расстояние между проводами фаз цепей I и II , м; $d_{AA'}, d_{AB'}, d_{AC'}, d_{BA'}, d_{BB'}, d_{BC'}, d_{CA'}, d_{CB'}, d_{CC'}$ — расстояние между проводами фаз A, B и C цепи I и проводами фаз A, B и C цепи II , м.

В приближенных практических расчетах средние значения соотношений между индуктивными сопротивлениями x_0 и x_1 для ВЛ можно полагать следующими:

Одноцепная ЛЭП без тросов	3,5
То же со стальными тросами	3
То же с хорошо проводящими тросами	2
Двухцепная ЛЭП без тросов	5,5
То же со стальными тросами	4,7
То же с хорошо проводящими тросами	3

Сопротивление нулевой последовательности КЛ зависит от типа кабеля, способа его прокладки, параметров оболочки кабеля и характера ее заземления, параметров заземлителей и т. п. В зависи-

мости от пути возвращения токов нулевой последовательности (только по оболочке кабеля или по оболочке и земле) сопротивление нулевой последовательности КЛ изменяется в пределах

$$x_0 = (3,5 \div 4,6) x_1. \quad (6.18)$$

При расчетах сетей с незаземленными или резонансно-заземленными нейтралью требуется знать также емкостное сопротивление прямой и нулевой последовательностей КЛ. Эти сопротивления указываются заводом-изготовителем либо их находят расчетным или экспериментальным путем.

Сопротивление нулевой последовательности трансформаторов зависит от их конструкции (однофазный, трехфазный трехстержневой, трехфазный четырехстержневой, трехфазный пятистержневой и т. д.) и схемы соединения обмоток (треугольник, звезда с заземленной нулевой точкой, звезда с незаземленной нулевой точкой). Сопротивление нулевой последовательности трансформаторов со стороны обмотки, соединенной в треугольник или в звезду с незаземленной нулевой точкой, равно бесконечности ($x_0 = \infty$).

Сопротивление нулевой последовательности трансформаторов со стороны обмотки, соединенной в звезду с заземленной нулевой точкой, зависит от схемы соединения других обмоток и наличия в их цепях контуров для прохождения токов нулевой последовательности. На рис. 6.6, а—в показаны основные варианты соединения обмоток двухобмоточного трансформатора, когда приложенное к обмотке I напряжение нулевой последовательности вызывает в ней или в обеих обмотках ток той же последовательности. Справа против каждого варианта соединения обмоток изображены схемы замещения трансформатора для токов нулевой последовательности (x_I и x_{II} — реактивные сопротивления рассеяния обмоток I и II; $x_{\mu 0}$ — реактивное сопротивление намагничивания нулевой последовательности трансформатора; активными сопротивлениями пренебрегаем).

При соединении обмоток по схеме Υ/Δ (рис. 6.6, а) э. д. с. нулевой последовательности трансформатора целиком расходуется на прохождение тока той же последовательности через реактивное сопротивление рассеяния обмотки, соединенной в треугольнике, так как этот ток (подобно третьей гармонике тока) не выходит за пределы данной обмотки. В схеме замещения это отражают закорачиванием ветви с x_{II} . Потенциал, равный нулю, на конце x_{II} схемы замещения не указывает на искусственный перенос заземления нейтрали, как это иногда ошибочно воспринимают; он только соответствует условию, что данной ветвью схемы замещения трансформатора заканчивается путь циркуляции токов нулевой последовательности. Поскольку сопротивление $x_{\mu 0}$ значительно превышает по значению сопротивление x_{II} , действие шунта $x_{\mu 0}$ не учитывают.

Таким образом, сопротивление x_0 при соединении обмоток по схеме Υ/Δ независимо от конструкции трансформатора равняется сопротивлению прямой последовательности x_1 :

$$x_0 \approx x_I + x_{II} = x_1. \quad (6.19)$$

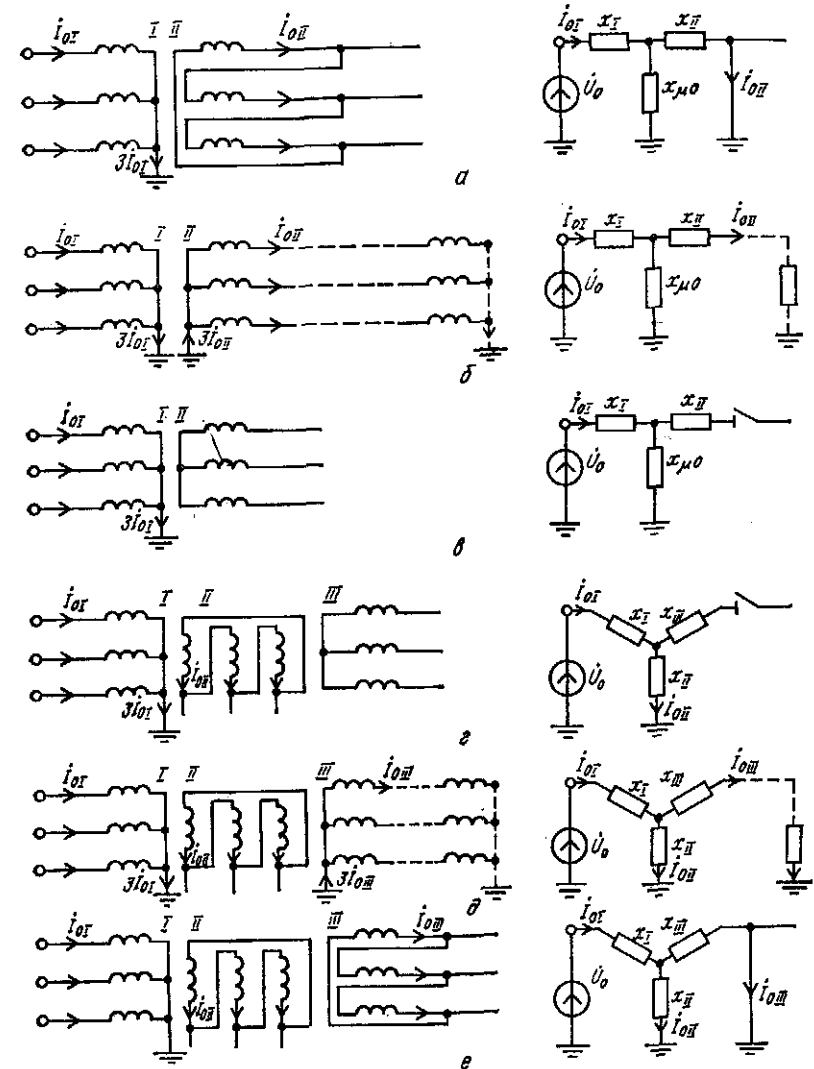


Рис. 6.6. Соединение обмоток трансформаторов и схемы их замещения для токов нулевой последовательности

При соединении обмоток по схеме Υ/Υ согласно схеме ее замещения (рис. 6.6, б) предполагается, что на стороне обмотки II обеспечен путь для тока нулевой последовательности, т. е. в цепи обмотки имеется, по меньшей мере, еще одна заземленная нейтраль (см. штриховую линию). Если же этого нет, то схема замещения будет такой же, как и при соединении обмоток по схеме Υ/Υ (рис. 6.6, в), что соответствует режиму холостого хода трансформатора, при котором

$$x_0 = x_I + x_{\mu 0}. \quad (6.20)$$

Здесь значение $x_{\mu 0}$ зависит от конструкции трансформатора. Для группы из трех однофазных трансформаторов, а также для трехфазных трансформаторов с четырьмя и пятью магнитопроводами при определении сопротивления нулевой последовательности током намагничивания можно пренебречь ($x_{\mu 0} = \infty$). Реактивное сопротивление намагничивания трехфазных трехстержневых трансформаторов зависит от их конструкции и в относительных единицах составляет $x_{\mu 0} = 0,3 \div 1$. Точное значение $x_{\mu 0}$ определяется экспериментально. Имея в виду, что x_{II} все же значительно меньше $x_{\mu 0}$, можно практически считать, что $x_{\mu 0} = \infty$.

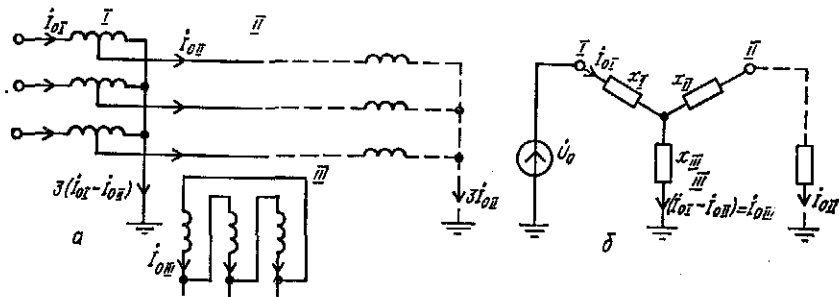


Рис. 6.7. Соединение обмоток автотрансформатора и его схема замещения для токов нулевой последовательности

У трехобмоточных трансформаторов одна из обмоток, как правило, соединяется в треугольник. Поэтому для них всегда можно считать $x_{\mu 0} = \infty$. Основные варианты соединения обмоток трехобмоточного трансформатора и соответствующие им схемы замещения нулевой последовательности (U_0 приложено со стороны обмотки I) показаны на рис. 6.6, *г—е*.

В варианте рис. 6.6, *г* ток нулевой последовательности в обмотке III отсутствует. Следовательно, в этом случае

$$x_0 = x_I + x_{II} = x_{I-II}. \quad (6.21)$$

В варианте рис. 6.6, *д* предполагается, что путь для тока нулевой последовательности на стороне обмотки III обеспечен. В этом случае в схему нулевой последовательности трансформатор должен быть введен своей схемой замещения.

Наконец, в варианте рис. 6.6, *е* ток нулевой последовательности обмотки I компенсируется токами, наведенными в обмотках II и III. В этом случае

$$x_0 = x_I + x_{II}x_{III}/(x_{II} + x_{III}). \quad (6.22)$$

Схема замещения автотрансформатора для токов нулевой последовательности (рис. 6.7) имеет тот же вид, что и для трехобмоточного трансформатора при соответствующем соединении его обмоток.

Ток в нейтрали автотрансформатора

$$I_N = 3(I_{0I} - I_{0II}), \quad (6.23)$$

где I_{0I} , I_{0II} — токи нулевой последовательности первичной и вторичной цепей, отнесенных к своей ступени напряжения.

6.4. Схемы замещения отдельных последовательностей

При расчете любого несимметричного режима или процесса методом симметричных составляющих одной из первоочередных задач является составление схем замещения, в общем случае для всех трех последовательностей (прямой, обратной и нулевой). Схемы замещения отдельных последовательностей включают в себя все элементы сети, по которым при данном виде несимметрии протекают токи соответствующих последовательностей. Параметры элементов схем замещения выражают в именованных или в относительных единицах, приведя их соответственно к выбранной за основную ступени напряжения или к выбранным базисным условиям.

Схема прямой последовательности идентична схеме, которую составляют для расчета любого симметричного трехфазного режима. В зависимости от используемого метода расчета и момента времени в нее вводят генераторы и нагрузки в виде соответствующих сопротивлений и э. д. с. Все остальные элементы отражают на схеме в виде постоянных сопротивлений для момента времени $t = 0$.

Поскольку пути циркуляции токов обратной последовательности те же, что и токов прямой последовательности, схема обратной последовательности по конфигурации аналогична схеме прямой последовательности. Различие между ними состоит прежде всего в том, что в схеме обратной последовательности э. д. с. всех генерирующих ветвей условно считают равными нулю. Кроме того, полагают, что сопротивления обратной последовательности синхронных машин и нагрузок практически постоянны и не зависят от вида и условий возникшей несимметрии, а также от продолжительности переходного процесса.

За начало схемы прямой или обратной последовательности выбирают точку, в которой объединены свободные концы всех генерирующих и нагрузочных ветвей. Это точка нулевого потенциала схемы соответствующей последовательности. Концом схемы прямой или обратной последовательности считают точку, где возникла рассматриваемая несимметрия. При продольной несимметрии каждая из схем имеет два конца; ими являются две точки, между которыми находится данная несимметрия. К концу или между концами схем отдельных последовательностей приложены напряжения соответствующих последовательностей, возникающие в месте несимметрии.

Токи нулевой последовательности, по существу, являются однофазными токами, разветвляющимися между тремя фазами и возвращающимися через землю и параллельные ей цепи. Поэтому

токи нулевой последовательности имеют сравнительно небольшую зону прохождения по сети, ограниченную, в частности, обмотками трансформаторов и автотрансформаторов, соединенными в треугольник. Схемы замещения нулевой последовательности по конфигурации сильно отличаются от схем замещения прямой и обратной последовательностей. Началом схемы нулевой последовательности H_0 является точка с нулевым потенциалом, а концом K_0 — точка несимметрии. При продольной несимметрии схема нулевой последовательности имеет два конца (границы места несимметрии). При этом, когда нейтраль системы не заземлена, начало схемы уже

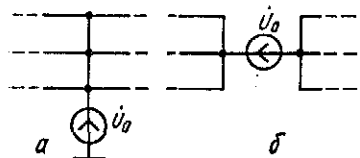


Рис. 6.8. Напряжение нулевой последовательности при поперечной (а) и продольной (б) несимметрии

теряет смысл, так как в общем случае точка нулевого потенциала может перемещаться в зависимости от характера продольной несимметрии, места ее появления и других факторов.

Ввиду того что токи нулевой последовательности проходят через землю и ток в нейтральных элементах (трансформаторов, генераторов, двигателей, нагрузок) равен утроенному

току нулевой последовательности фаз, схему замещения нулевой последовательности составляют для одной фазы; сопротивления, включенные в нейтраль этих элементов, вводят в схему замещения нулевой последовательности в виде утроенной величины.

Схемы замещения нулевой последовательности, имеющие «укороченный» вид по отношению к полной схеме сети, рекомендуются составлять, начиная от точки, где возникла эта несимметрия, считая, что в данной точке все фазы замкнуты между собой коротко и к ней приложено напряжение нулевой последовательности. В зависимости от вида несимметрии это напряжение прикладывается или относительно земли (*поперечная несимметрия*, рис. 6.8, а), или последовательно в рассечку фазных проводов (*продольная несимметрия*, рис. 6.8, б).

Когда напряжение нулевой последовательности приложено относительно земли, то при отсутствии емкостной проводимости для циркуляции токов нулевой последовательности необходима, по меньшей мере, одна заземленная нейтраль в той же электрически связанной цепи, где имеется это напряжение. При нескольких заземленных нейтральных в этой цепи образуется соответственно несколько параллельных контуров для тока нулевой последовательности.

При продольной несимметрии, т. е. когда напряжение нулевой последовательности введено последовательно в фазные провода, циркуляция токов нулевой последовательности возможна даже при отсутствии заземленных нейтралей, если при этом существует замкнутый контур через обходные пути той же электрически связанной цепи. При отсутствии таких путей протекание токов нулевой последовательности в рассматриваемых условиях возможно только в том

случае, когда в той же электрически связанной цепи имеются заземленные нейтраль с обеих сторон от места, где приложено напряжение нулевой последовательности.

На рис. 6.9, а показан пример исходной схемы для составления схемы нулевой последовательности в случае, когда напряжение нулевой последовательности возникает между проводами и землей (поперечная несимметрия). Стрелками на рис. 6.9, б указаны пути циркуляции токов нулевой последовательности при рассматриваемых условиях. Обмотки трансформаторов, автотрансформатора и прочие элементы схемы обозначены порядковыми номерами, кото-

рые сохранены в обозначениях элементов схемы нулевой последовательности (рис. 6.9, в).

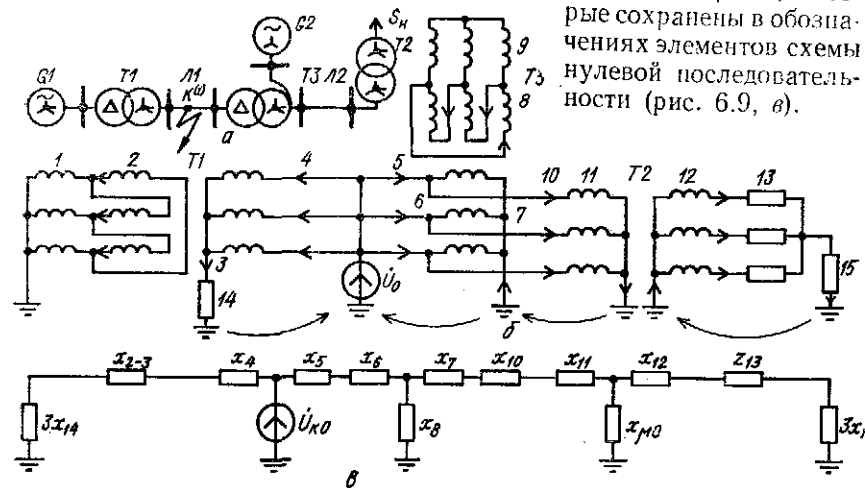


Рис. 6.9. Пример составления схемы нулевой последовательности при поперечной несимметрии: а — исходная схема; б — схема в трехфазном исполнении; в — схема замещения нулевой последовательности

Поскольку в цепи СН автотрансформатора имеется путь для токов нулевой последовательности, автотрансформатор обозначен своей полной схемой замещения. Циркуляция тока нулевой последовательности в обмотке 12 трансформатора Т2 обеспечена через заземленную нейтраль нагрузки. Этот трансформатор предполагается трехстержневым, поэтому учтено его сопротивление намагничивания нулевой последовательности. Для другого трансформатора и автотрансформатора данные об их конструкции практически не нужны, так как они имеют обмотки, соединенные треугольником.

Если предположить, что в той же точке напряжение нулевой последовательности приложено в рассечку проводов, то схема нулевой последовательности останется той же, но ее результирующее сопротивление будет совсем иным.

Так как взаимдукция нулевой последовательности между параллельными цепями ВЛ может сказываться весьма существенно, то ее нужно учитывать при составлении схемы нулевой последовательности путем введения соответствующих схем замещения.

6.5. Результирующие э. д. с. и сопротивления

Для расчета несимметричных режимов требуется знать эквивалентные значения э. д. с. и сопротивлений схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей относительно точки, где возникла та или иная несимметрия. Необходимые для этого преобразования схем выполняют в соответствии с вышеизложенными рекомендациями. При этом нужно особо иметь в виду принципиальное различие в преобразовании схем при поперечной и продольной несимметриях. Это различие можно проследить на конкретной схеме

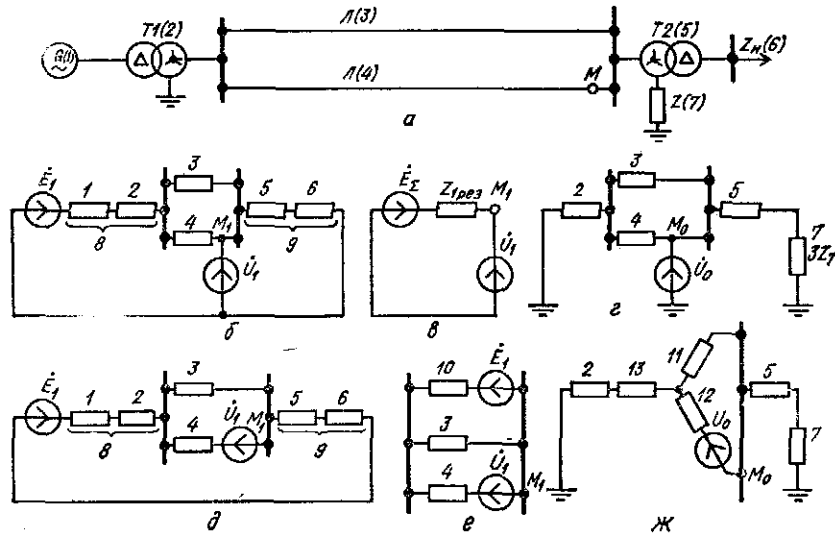


Рис. 6.10. Пример составления схем отдельных последовательностей и определения результирующих э. д. с. и сопротивлений при поперечной (б — г) и продольной (д — ж) несимметриях в точке M исходной схемы (а)

(рис. 6.10, а), все элементы которой пронумерованы и их номера сохранены для обозначения соответствующих элементов в схемах замещения отдельных последовательностей.

При поперечной несимметрии в точке M схема замещения прямой последовательности имеет вид, показанный на рис. 6.10, б. Последовательно соединенные в ней элементы 1 и 2, а также 5 и 6 обозначены соответственно номерами 8 и 9. Для определения результирующих э. д. с. и сопротивлений относительно точки M достаточно заменить ветвь 9 с $\dot{E} = 0$ и ветвь, получаемую сложением элемента 8 с параллельно соединенными элементами 3, 4 и имеющую э. д. с. \dot{E}_1 , одной эквивалентной (рис. 6.10, в). Схема обратной последовательности и ее преобразование аналогичны, за исключением того, что в ней отсутствуют э. д. с. источников. Схему нулевой последовательности (рис. 6.10, г) также легко преобразовать в эквивалентную путем последовательного и параллельного сложения ветвей.

Пусть теперь в точке M возникла продольная несимметрия. В этом случае напряжение прямой последовательности в точке должно быть введено в рассечку цепи элемента 4 (рис. 6.10, д). Для определения результирующих э. д. с. и сопротивлений схемы относительно точки M в данном случае необходимо вначале сложить последовательно элементы 8 и 9. Затем образовавшуюся ветвь 10 с э. д. с. \dot{E}_1 и ветвь 3 (рис. 6.10, е) следует заменить эквивалентной, что даст искомую результирующую э. д. с. относительно точки M , а для нахождения результирующего сопротивления относительно той же точки достаточно к сопротивлению полученной эквивалентной ветви прибавить сопротивление элемента 4. Схема обратной последовательности аналогична схеме на рис. 6.10, д, в ней отсутствует лишь э. д. с. источника. Ее результирующее сопротивление находится аналогично схеме прямой последовательности.

В схему нулевой последовательности (рис. 6.10, ж) двухцепная линия введена своей трехлучевой схемой замещения с элементами 11—13 с тем, чтобы учесть взаимную индукцию между цепями, находящимися теперь в разных условиях. Для определения результирующего сопротивления схемы здесь сопротивление элемента 11 нужно сложить параллельно с суммой сопротивлений элементов 2, 13, 5 и 7 (последний имеет утроенное значение) и к полученному результату прибавить сопротивление элемента 12.

Соотношения между значениями результирующих сопротивлений одноименной последовательности при поперечной и продольной несимметриях в одной и той же точке могут быть самыми различными в зависимости от характера схемы, места несимметрии и других факторов.

Контрольные вопросы

1. Каковы основные достоинства метода симметричных составляющих? Как определяется особая фаза?
2. В чем сущность основных положений метода симметричных составляющих?
3. В чем состоит расчет несимметричных режимов по методу симметричных составляющих?
4. Как раскладывается произвольная система несимметричных векторов на три симметричные системы?
5. Как по произвольно построенным симметричным системам (прямой, обратной и нулевой последовательностей) получить несимметричную систему?
6. Каковы сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей различных элементов короткозамкнутой цепи?
7. Почему для одного и того же элемента электрической цепи значения сопротивлений прямой z_1 , обратной z_2 и нулевой z_0 последовательностей в общем случае различны?
8. Как определяются сопротивления нулевой последовательности двух- и трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов?
9. Чем объясняется тот факт, что сопротивление на фазу для нулевой последовательности z_0 трехстержневого трансформатора не равно сопротивлению на фазу для прямой последовательности z_1 , но $z_1 = z_2$, где z_2 — сопротивление на фазу для обратной последовательности?

10. Как составляются расчетные схемы замещения различных последовательностей короткозамкнутой цепи при несимметричных КЗ?
11. Каковы особенности схемы замещения нулевой последовательности?
12. Как определяются результирующие сопротивления схем замещения разных последовательностей?

Темы рефератов

1. Применение метода симметричных составляющих при анализе и расчете несимметричных КЗ.
2. Сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей различных элементов короткозамкнутой цепи.
3. Составление схем замещения нулевой последовательности и их особенности.

Глава 7

ПОПЕРЕЧНАЯ НЕСИММЕТРИЯ

7.1. Общие сведения

В общем виде поперечная несимметрия в произвольной точке трехфазной системы может быть представлена присоединением в этой точке неодинаковых сопротивлений, как показано на рис. 7.1. Такой подход к рассматриваемой задаче позволяет получить ее решение в общем виде, из которого вытекают решения для всех частных случаев. Однако решение в общем виде (даже при учете взаимной индукции между фазами) приводит к весьма громоздким выражениям. Значительно проще и нагляднее решать задачу для каждого вида поперечной несимметрии, если использовать граничные условия, связанные с данным видом КЗ.

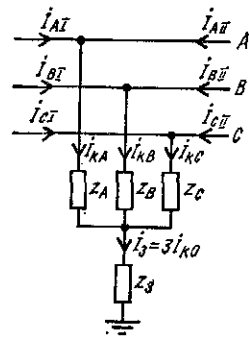


Рис. 7.1. Общее представление поперечной несимметрии в трехфазной системе

В приведенных ниже выкладках приняты следующие допущения: результирующие сопротивления схем соответствующих последовательностей относительно точки КЗ чисто реактивные; положительное направление токов (фазных и их симметричных составляющих) соответствует направлению к месту КЗ.

Для упрощения записи индекс вида КЗ сохранен только в граничных условиях и в окончательных результатах. Симметричные составляющие токов и напряжений записаны только для одной фазы, которую называют *особой*; для остальных фаз они определяются с использованием оператора поворота.

Приняв за особую фазу А, можно составить следующие уравнения э. д. с. и напряжений контура для соответствующих последовательностей:

тельностей:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{A1} &= \dot{E}_{A\Sigma} - jI_{A1}X_{1\text{рез}} \\ \dot{U}_{A2} &= 0 - jI_{A2}X_{2\text{рез}} \\ \dot{U}_{A0} &= 0 - jI_{A0}X_{0\text{рез}} \end{aligned} \right\} \quad (7.1)$$

Действительные токи и напряжения в месте КЗ можно найти по формулам, полученным на основании (6.4)

$$\left. \begin{aligned} I_A &= I_{A1} + I_{A2} + I_{A0} \\ I_B &= a^2 I_{A1} + a I_{A2} + I_{A0} \\ I_C &= a I_{A1} + a^2 I_{A2} + I_{A0} \end{aligned} \right\} \quad (7.2)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0} \\ \dot{U}_B &= a^2 \dot{U}_{A1} + a \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0} \\ \dot{U}_C &= a \dot{U}_{A1} + a^2 \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0} \end{aligned} \right\} \quad (7.3)$$

Заметим, что уравнениями (7.2) и (7.3) можно пользоваться при определении токов в любом элементе схемы и напряжений в любом ее узле. Для этого надо знать значения симметричных составляющих токов в данном элементе и симметричных составляющих напряжений в данном узле.

В девяти уравнениях (7.1) — (7.3) имеется 12 неизвестных ($I_{A1}, I_{A2}, I_{A0}, \dot{U}_{A1}, \dot{U}_{A2}, \dot{U}_{A0}, I_A, I_B, I_C, \dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$), поскольку э. д. с. $\dot{E}_{A\Sigma}$ и результирующие сопротивления схем всех последовательностей ($X_{1\text{рез}}, X_{2\text{рез}}, X_{0\text{рез}}$) известны. Чтобы решить систему этих уравнений, необходимо составить еще три уравнения, вытекающие из граничных условий соответствующего вида несимметричного КЗ.

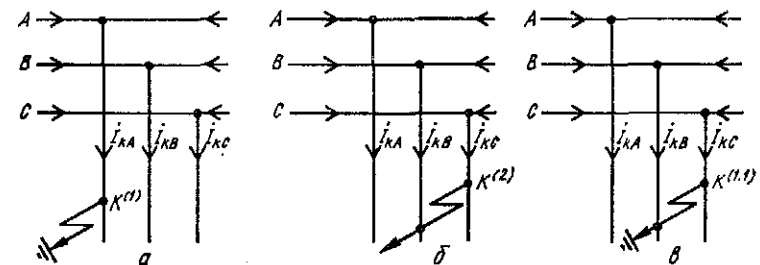


Рис. 7.2. Схемы ответвлений в точке однофазного (а), двухфазного (б) и двухфазного на землю (в) КЗ

Для внесения определенности в граничные условия предполагают, что КЗ происходит на ответвлении, сопротивление проводников которого равно нулю (рис. 7.2).

Расчет токов и напряжений при рассматриваемом несимметричном КЗ, по существу, сводится к вычислению их симметричных составляющих. Как только они найдены, фазные значения токов I_A, I_B, I_C и напряжений $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ определяются по (7.2) и (7.3).

Используя уравнения (7.1) — (7.3) и граничные условия (7.4), можно получить формулы для расчета трехфазного КЗ. При трехфазном КЗ напряжение всех фаз в месте КЗ равно нулю:

$$U_{кА}^{(3)} = 0; \quad U_{кВ}^{(3)} = 0; \quad U_{кС}^{(3)} = 0. \quad (7.4)$$

Подставив эти граничные условия для трехфазного КЗ в уравнения (7.3) и взяв сумму всех значений с одинаковыми коэффициентами при соответствующей последовательности, как это сделано при выводе (6.5), с учетом (7.1) получим,

$$\left. \begin{aligned} I_{A1}^{(3)} &= E_{A\Sigma} / (jx_{1\text{рез}}); \\ I_{A2}^{(3)} &= 0; \\ I_{A0}^{(3)} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (7.5)$$

Токи в поврежденных фазах в соответствии с (7.2)

$$I_{кА}^{(3)} = I_{A1}^{(3)}; \quad I_{кВ}^{(3)} = a^2 I_{A1}^{(3)}; \quad I_{кС}^{(3)} = a I_{A1}^{(3)}. \quad (7.6)$$

Коэффициент, связывающий значения тока аварийной фазы и тока прямой последовательности фазы *A*,

$$m^{(3)} = I_{кА}^{(3)} / I_{A1}^{(3)} = 1. \quad (7.7)$$

7.2. Однофазное короткое замыкание

Граничными условиями для однофазного КЗ (см. рис. 7.2, *a*) являются

$$U_{кА}^{(1)} = 0; \quad (7.8)$$

$$i_{кВ}^{(1)} = 0; \quad i_{кС}^{(1)} = 0. \quad (7.9)$$

По разности второго и третьего уравнений системы (7.2) с учетом (7.9)

$$I_{A1} = I_{A2}, \quad (7.10)$$

а по их сумме с учетом (7.9) и (7.10)

$$I_{A1} = I_{A2} = I_{A0}. \quad (7.11)$$

Учтя равенство (7.11) и условие (7.8), по сумме уравнений (7.1) легко получить формулу для определения тока прямой последовательности фазы *A*:

$$I_{A1}^{(1)} = E_{A\Sigma} / [j(x_{1\text{рез}} + x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}})]. \quad (7.12)$$

Ток в аварийной фазе

$$I_{кА}^{(1)} = I_{A1} + I_{A2} + I_{A0} = 3I_{A1}^{(1)} = 3E_{A\Sigma} / [j(x_{1\text{рез}} + x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}})]. \quad (7.13)$$

Коэффициент взаимосвязи токов

$$m^{(1)} = I_{кА}^{(1)} / I_{A1}^{(1)} = 3. \quad (7.14)$$

Для начального момента времени абсолютное значение тока однофазного КЗ

$$\begin{aligned} I_{к}^{(1)''} &= 3E_{A\Sigma}'' / [V\sqrt{3}(x_{1\text{рез}} + x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}})] = \\ &= \sqrt{3} E_{A\Sigma}'' / (x_{1\text{рез}} + x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}), \end{aligned} \quad (7.15)$$

где $E_{A\Sigma}''$ — сверхпереходная междуфазная результирующая э. д. с. При питании от ЭЭС

$$I_{к}^{(1)} = \sqrt{3} U_{\text{ср}} / (x_{1\text{рез}} + x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}), \quad (7.16)$$

где $U_{\text{ср}}$ — междуфазное среднее номинальное напряжение системы.

Напряжения симметричных составляющих на основании системы уравнений (7.1):

нулевой и обратной последовательностей с учетом (7.11)

$$\dot{U}_{A0} = -jI_{A1}x_{0\text{рез}}; \quad (7.17)$$

$$\dot{U}_{A2} = -jI_{A1}x_{2\text{рез}}; \quad (7.18)$$

прямой последовательности с учетом (7.8), (7.17) и (7.18)

$$\dot{U}_{A1} = -\dot{U}_{A2} - \dot{U}_{A0} = jI_{A1}(x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}). \quad (7.19)$$

Действительные напряжения в месте КЗ с учетом (7.8), второго и третьего уравнений системы (7.3) при подстановке значений \dot{U}_{A1} , \dot{U}_{A2} и \dot{U}_{A0} из (7.17) — (7.19)

$$U_{кВ}^{(1)} = a^2 jI_{A1}(x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}) - a jI_{A1}x_{2\text{рез}} - jI_{A1}x_{0\text{рез}}; \quad (7.20)$$

$$U_{кС}^{(1)} = a jI_{A1}(x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}) - a^2 jI_{A1}x_{2\text{рез}} - jI_{A1}x_{0\text{рез}}. \quad (7.21)$$

7.3. Двухфазное короткое замыкание

Короткое замыкание между фазами *B* и *C* (см. рис. 7.2, *б*) можно охарактеризовать следующими граничными условиями:

$$i_{кА}^{(2)} = 0; \quad (7.22)$$

$$i_{кВ}^{(2)} = -i_{кС}^{(2)}; \quad (7.23)$$

$$U_{кВ}^{(2)} = U_{кС}^{(2)}. \quad (7.24)$$

Так как сумма фазных токов равна нулю, то система является уравновешенной и, следовательно, $i_{к0}^{(2)} = 0$. При этом согласно (7.2) ток фазы *A* будет

$$I_A^{(2)} = I_{A1} + I_{A2} = 0,$$

откуда

$$I_{A1} = -I_{A2}. \quad (7.25)$$

Из условия (7.24) с учетом значений \dot{U}_B и \dot{U}_C из (7.3) следует, что

$$\dot{U}_{A1} = \dot{U}_{A2}. \quad (7.26)$$

Подставив значения \dot{U}_{A1} и \dot{U}_{A2} из (7.1) в (7.26), получим

$$\dot{E}_{A\Sigma} - jI_{A1}x_{1\text{рез}} = -jI_{A2}x_{2\text{рез}},$$

откуда с учетом (7.25) выражение для определения тока прямой последовательности при двухфазном КЗ имеет вид

$$I_{A1}^{(2)} = \dot{E}_{A\Sigma} / [j(x_{1\text{рез}} + x_{2\text{рез}})]. \quad (7.27)$$

Токи в поврежденных фазах B и C согласно (7.2) при условии (7.25) составляют

$$I_{KB}^{(2)} = a^2 I_{A1} + a I_{A2} = (a^2 - a) I_{A1} = -j\sqrt{3} I_{A1}; \quad (7.28)$$

$$I_{KC}^{(2)} = (a - a^2) I_{A1} = j\sqrt{3} I_{A1}. \quad (7.29)$$

Коэффициент взаимосвязи токов

$$m^{(2)} = I_{KB}^{(2)} / I_{A1}^{(2)} = I_{KC}^{(2)} / I_{A1}^{(2)} = \sqrt{3}. \quad (7.30)$$

Абсолютное значение полного тока при двухфазном КЗ

$$I_k^{(2)} = \sqrt{3} I_{A1}^{(2)} = \sqrt{3} E_{A\Sigma} / (x_{1\text{рез}} + x_{2\text{рез}}). \quad (7.31)$$

На основании (7.31) в момент появления КЗ имеем

$$I_k^{(2)*} = \sqrt{3} E_{A\Sigma}^* / [V\sqrt{3} (x_{1\text{рез}} + x_{2\text{рез}})] = E_{A\Sigma}^* / (x_{1\text{рез}} + x_{0\text{рез}}). \quad (7.32)$$

При питании от ЭЭС

$$I_k^{(2)} = U_{\text{ср}} / (x_{1\text{рез}} + x_{2\text{рез}}). \quad (7.33)$$

Если $\dot{U}_B^{(2)}$ и $\dot{U}_C^{(2)}$ выразить через симметричные составляющие напряжения фазы A согласно (7.3), то (7.24) примет вид

$$a^2 \dot{U}_{A1} + a \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0} - a \dot{U}_{A1} - a^2 \dot{U}_{A2} - \dot{U}_{A0} = (a^2 - a) (\dot{U}_{A1} - \dot{U}_{A2}) = 0, \quad (7.34)$$

При определении напряжения $\dot{U}_{A0}^{(2)}$ следует учитывать, что в системах с заземленной нейтралью ($x_{0\text{рез}}$ имеет конечное значение) напряжение $\dot{U}_{A0}^{(2)}$ при $I_{A0}^{(2)} = 0$ на основании (7.1) равно нулю, а в системах с изолированной нейтралью ($x_{0\text{рез}} = \infty$) напряжение $\dot{U}_{A0}^{(2)} = -\infty$ и оно из уравнений напряжений исключается.

Фазные напряжения в месте КЗ по (7.3) с учетом (7.24) и (7.34) составляют

$$\dot{U}_{KA}^{(2)} = \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} = 2\dot{U}_{A1} = 2I_{A1} j x_{2\text{рез}}; \quad (7.35)$$

$$\dot{U}_{KB}^{(2)} = \dot{U}_{KC}^{(2)} = a^2 \dot{U}_{A1} + a \dot{U}_{A2} = -\dot{U}_{A1} = -\dot{U}_{KA} / 2. \quad (7.36)$$

7.4. Двухфазное короткое замыкание на землю

Двухфазное КЗ на землю (см. рис. 7.2, в) характеризуется граничными условиями

$$I_{KA}^{(1,1)} = 0; \quad (7.37)$$

$$\dot{U}_{KB}^{(1,1)} = 0; \quad \dot{U}_{KC}^{(1,1)} = 0. \quad (7.38)$$

Учитывая (7.37), получаем $I_A^{(1,1)} = I_{A1} + I_{A2} + I_{A0} = 0$, откуда ток прямой последовательности

$$I_{A1} = -(I_{A2} + I_{A0}). \quad (7.39)$$

По условиям (7.38) и разности второго и третьего уравнений системы (7.3) имеем

$$\dot{U}_{A1} = \dot{U}_{A2}. \quad (7.40)$$

По тем же условиям (7.38) и сумме второго и третьего уравнений (7.3) находим

$$\dot{U}_{A1} = \dot{U}_{A2} = \dot{U}_{A0}. \quad (7.41)$$

Используя равенство (7.41) и уравнения (7.1), получаем

$$I_{A0} = -\dot{U}_{A1} / (j x_{0\text{рез}}); \quad (7.42)$$

$$I_{A2} = -\dot{U}_{A1} / (j x_{2\text{рез}}). \quad (7.43)$$

С учетом (7.42) и (7.43) по (7.39) имеем

$$I_{A1} = \dot{U}_{A1} (1/(j x_{2\text{рез}}) + 1/(j x_{0\text{рез}})), \quad (7.44)$$

откуда

$$\dot{U}_{A1} = I_{A1} j x_{2\text{рез}} x_{0\text{рез}} / (x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}). \quad (7.45)$$

Приравняв значения \dot{U}_{A1} по (7.1) и (7.45), можно записать

$$I_{A1}^{(1,1)} = \dot{E}_{A\Sigma} / [j x_{1\text{рез}} + j x_{2\text{рез}} x_{0\text{рез}} / (x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}})]. \quad (7.46)$$

Выразим токи обратной и нулевой последовательностей через ток прямой последовательности. Для этого напряжение \dot{U}_{A1} по (7.45) подставим в (7.42) и (7.43); тогда

$$I_{A0} = -I_{A1} x_{2\text{рез}} / (x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}); \quad (7.47)$$

$$I_{A2} = -I_{A1} x_{0\text{рез}} / (x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}), \quad (7.48)$$

а токи в поврежденных фазах с учетом (7.37) и (7.2) будут

$$I_{KB}^{(1,1)} = I_{A1}^{(1,1)} [a^2 - a x_{0\text{рез}} / (x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}) - x_{2\text{рез}} / (x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}})]; \quad (7.49)$$

$$I_{KC}^{(1,1)} = I_{A1}^{(1,1)} [a - a^2 x_{0\text{рез}} / (x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}) - x_{2\text{рез}} / (x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}})]. \quad (7.50)$$

Определив модуль комплексов (7.49) и (7.50), получим следующие значения токов аварийных фаз:

$$I_{KB}^{(1,1)} = I_{KC}^{(1,1)} = \sqrt{3} I_{A1}^{(1,1)} \sqrt{x_{2\text{рез}}^2 + x_{2\text{рез}} x_{0\text{рез}} + x_{0\text{рез}}^2 / (x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}})}. \quad (7.51)$$

Отсюда коэффициент взаимосвязи токов

$$m^{(1,1)} = I_{KB}^{(1,1)} / I_{A1}^{(1,1)} = I_{KC}^{(1,1)} / I_{A1}^{(1,1)} = \sqrt{3} \sqrt{x_{2\text{рез}}^2 + x_{2\text{рез}} x_{0\text{рез}} + x_{0\text{рез}}^2 / (x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}})}. \quad (7.52)$$

В зависимости от соотношения между $x_{2\text{рез}}$ и $x_{0\text{рез}}$ имеем

$$1,5 \leq m^{(1,1)} \leq \sqrt{3}.$$

$$i_a = i_{кВ} + i_{кС} = 3i_{к0}.$$

Нижний предел $m_{(1,1)}$ наступает при $x_{2\text{рез}} = x_{0\text{рез}}$, а верхний — при $x_{2\text{рез}}/x_{0\text{рез}}$, равном 0 или ∞ .

Действительные напряжения в месте КЗ с учетом (7.38) и (7.41)

$$\left. \begin{aligned} U_{кА}^{(1,1)} &= U_{A1} + U_{A2} + U_{A0} = 3U_{A1}; \\ U_{кВ}^{(1,1)} &= U_{кС}^{(1,1)} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (7.53)$$

7.5. Учет переходного сопротивления в месте короткого замыкания

При расчетах КЗ в распределительных сетях особое значение имеет учет переходных сопротивлений и контактных соединений в месте КЗ. Обычно в этом месте образуется некоторое переходное сопротивление, состоящее из сопротивления возникшей электрической дуги и сопротивлений прочих элементов пути тока от одной фазы к другой или от фазы на землю. Электрическая дуга возникает либо с самого начала происшедшего повреждения, как, например, при перекрытии или пробое изоляции, либо через некоторое время, когда перегорит элемент, вызвавший КЗ. При КЗ между фазами переходное сопротивление определяется главным образом сопротивлением электрической дуги.

В ряде случаев переходные сопротивления столь малы, что практически ими можно пренебречь. Естественно, при прочих равных условиях ток при таком КЗ больше, чем при наличии переходного сопротивления. Поэтому, когда требуется найти возможные наибольшие значения токов, исходя из наиболее тяжелых условий, считая, что в месте КЗ никаких переходных сопротивлений нет.

Рассмотрим учет переходного сопротивления при различных видах несимметричных КЗ. Предполагаем, что переходное сопротивление в основном определяется сопротивлением электрической дуги, которое в первом приближении можно считать активным сопротивлением r_d .

Пусть КЗ между фазами *B* и *C* произошло через сопротивление дуги r_d . Его можно представить как глухое двухфазное КЗ на ответвлении, фазы которого имеют одинаковые сопротивления $r_d/2$ (рис. 7.3, *a*). Таким приемом несимметричный участок трехфазной цепи приведен к симметричному, что облегчает применение метода симметричных составляющих. Введение сопротивления $r_d/2$ в фазу *A* не меняет условий рассматриваемого КЗ, поскольку на данном участке ток в этой фазе отсутствует.

Считая остальную часть схемы чисто индуктивной, по аналогии с (7.27) ток прямой последовательности в месте КЗ запишем в виде

$$i_{A1}^{(2)} = \dot{E}_{A\Sigma} / [r_d/2 + jx_{1\text{рез}} + (r_d/2 + jx_{2\text{рез}})] = \dot{E}_{A\Sigma} / [r_d + j(x_{1\text{рез}} + x_{2\text{рез}})]. \quad (7.54)$$

Напряжение обратной последовательности за сопротивлением дуги r_d с учетом (7.25) (точка $K^{(2)}$) определяется выражением

$$U_{A2}^{(2)} = (r_d + jx_{2\text{рез}}) i_{A1}^{(2)}, \quad (7.55)$$

а напряжение прямой последовательности в этой же точке — выражением (7.26).

Допустим, что фаза *A* замкнулась на землю через сопротивление дуги r_d (рис. 7.3, *б*). Чтобы сохранить симметрию данного участка трехфазной цепи, считаем, что такие же сопротивления имеются и в

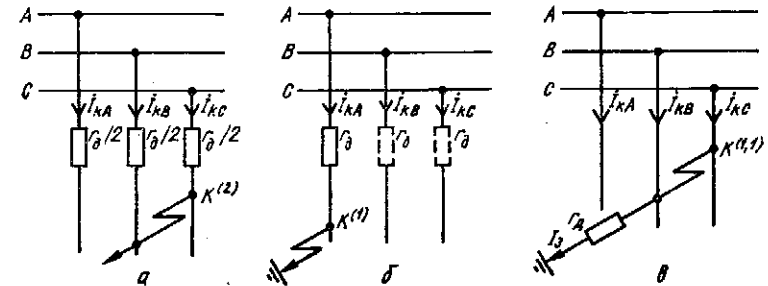


Рис. 7.3. Схемы несимметричных КЗ через дугу для двухфазного (*a*), однофазного (*б*) и двухфазного на землю (*в*) замыканий

двух других фаз. Это справедливо, так как по граничным условиям для данного вида повреждения токи $i_{кВ}^{(1)} - i_{кС}^{(1)} = 0$.

В новых условиях результирующее сопротивление каждой последовательности увеличилось на r_d . Следовательно, по аналогии с (7.12) ток прямой последовательности в месте КЗ

$$\begin{aligned} i_{A1}^{(1)} &= \dot{E}_{A\Sigma} / [(r_d + jx_{1\text{рез}}) + (r_d + jx_{2\text{рез}}) + (r_d + jx_{0\text{рез}})] = \\ &= \dot{E}_{A\Sigma} / [3r_d + j(x_{1\text{рез}} + x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}})]. \end{aligned} \quad (7.56)$$

Напряжение прямой последовательности за сопротивлением (точка $K^{(1)}$) с учетом (7.19)

$$U_{A1}^{(1)} = [3r_d + j(x_{0\text{рез}} + x_{2\text{рез}})] i_{A1}^{(1)}. \quad (7.57)$$

При КЗ между фазами *B* и *C* с одновременным замыканием точки КЗ на землю через сопротивление дуги r_d (рис. 7.3, *в*) последнее войдет только в схему нулевой последовательности своим утроенным значением. Поэтому ток прямой последовательности в месте КЗ по аналогии с (7.46)

$$i_{A1}^{(1,1)} = \dot{E}_{A\Sigma} / [jx_{1\text{рез}} + jx_{2\text{рез}}] (3r_d + jx_{0\text{рез}}). \quad (7.58)$$

Соответственно напряжение прямой последовательности за сопротивлением r_d (точка $K^{(1,1)}$) с учетом (7.45)

$$U_{A1}^{(1,1)} = i_{A1}^{(1,1)} jx_{2\text{рез}} (3r_d + jx_{0\text{рез}}). \quad (7.59)$$

Токи нулевой и обратной последовательностей в месте КЗ определяются соответственно по (7.47) и (7.48), где вместо $x_{0\text{рез}}$ должно быть $(3r_d + jx_{0\text{рез}})$.

Поскольку фазы B и C замкнуты между собой накоротко, независимо от значения r_d равенство (7.41) сохраняется, т. е. напряжение обратной последовательности за сопротивлением r_d следует определять по (7.59). Что касается напряжения нулевой последовательности в точке $K^{(1,1)}$, то оно равно падению напряжения, создаваемого током $I_{\Delta 0}^{(1,1)}$ на сопротивлении $x_{0\text{рез}}$.

7.6. Правило эквивалентности прямой последовательности

Обращаясь к полученным выше выражениям симметричных составляющих токов и напряжений в месте несимметричного КЗ, сведенным в табл. 7.1, видим, что токи обратной и нулевой последовательностей и напряжения всех последовательностей пропорциональны току прямой последовательности в месте КЗ. Следовательно, задача расчета любого несимметричного КЗ прежде всего состоит в нахождении тока прямой последовательности в месте рассматриваемого вида КЗ.

Структура выражений (7.13), (7.27) и (7.46) позволяет в общем виде записать ток прямой последовательности фазы A при любом несимметричном КЗ через параметры цепи:

$$I_{KA}^{(n)} = E_{A\Sigma} / (j(x_{1\text{рез}} + x_{\Delta}^{(n)})), \quad (7.60)$$

где (n) обозначает вид КЗ; $x_{\Delta}^{(n)}$ — дополнительное сопротивление в зависимости от вида КЗ (см. табл. 7.1).

С учетом того, что фазные токи в месте КЗ пропорциональны току прямой последовательности, модуль фазного тока в месте несимметричного КЗ в общем виде определяется выражением

$$I_K^{(n)} = m^{(n)} I_{K1}^{(n)}, \quad (7.61)$$

где $m^{(n)}$ — коэффициент, который можно найти по данным табл. 7.1.

Обобщенная запись (7.60) дает возможность сформулировать правило эквивалентности прямой последовательности: *ток прямой последовательности любого несимметричного КЗ может быть определен как ток при трехфазном КЗ в точке, удаленной от действительной точки КЗ на дополнительное сопротивление $x_{\Delta}^{(n)}$. Это сопротивление не зависит от параметров схемы прямой последовательности и для каждого вида КЗ вычисляется по результирующим сопротивлениям обратной и нулевой последовательностей относительно рассматриваемой точки схемы.*

Для напряжения U_{K1} (см. табл. 7.1) справедливо

$$U_{K1}^{(n)} = jx_{\Delta}^{(n)} I_{K1}^{(n)}. \quad (7.62)$$

Таблица 7.1. Выражения для определения симметричных составляющих, фазных токов и напряжений различных видов несимметричных КЗ

Расчетная величина	Вид несимметричного КЗ	
	двухфазное	однофазное
Токи последовательностей:		
прямой I_{K1}	$E_{\Sigma} / [j(x_{1\text{рез}} + x_{2\text{рез}})]$	$E_{\Sigma} / [j(x_{1\text{рез}} + x_{2\text{рез}}x_{0\text{рез}}/(x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}))] + E_{\Sigma} / [j(x_{1\text{рез}} + x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}})]$
обратной I_{K2}	$-I_{K1}$	I_{K1}
нулевой I_{K0}	0	I_{K1}
Токи фаз:		$3I_{K1}$
I_{KA}	0	0
I_{KB}	$a^2 I_{K1} - a I_{K1}$	$I_{K1}(a^2 - (ax_{0\text{рез}} + x_{2\text{рез}})/(x_{0\text{рез}} + x_{2\text{рез}}))$
I_{KC}	$a I_{K1} - a^2 I_{K1}$	$I_{K1}(a - (a^2x_{0\text{рез}} + x_{2\text{рез}})/(x_{0\text{рез}} + x_{2\text{рез}}))$
Напряжения последовательностей:		
прямой U_{K1}	$jx_{2\text{рез}} I_{K1}$	$jx_{2\text{рез}}x_{0\text{рез}}/(x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}) I_{K1}$
обратной U_{K2}	$jx_{2\text{рез}} I_{K1}$	$-jx_{2\text{рез}} I_{K1}$
нулевой U_{K0}	0	$-jx_{0\text{рез}} I_{K1}$

Расчетная величина	Вид несимметричного КЗ		
	двухфазное	двухфазное на землю	однофазное
Напряжения фаз:			
\dot{U}_{KA}	$2I_{K1}/x_{2рез}$	$3I_{K1}/x_{0рез}x_{2рез}/(x_{0рез} + x_{2рез})$	0
\dot{U}_{KB}	$-I_{K1}/x_{2рез}$	0	$I_{K1}/[x_{2рез}(a^2 - a) + x_{0рез}(a^2 - 1)]$
\dot{U}_{KC}	$-I_{K1}/x_{2рез}$	0	$I_{K1}/[x_{2рез}(a - a^2) + x_{0рез}(a - 1)]$
Дополнительное сопротивление	$x_{2рез}$	$x_{0рез}x_{2рез}/(x_{0рез} + x_{2рез})$	$x_{0рез} + x_{2рез}$
Коэффициент m	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}\sqrt{1 - x_{0рез}x_{2рез}/(x_{0рез} + x_{2рез})^2}$	3
Ток в земле I_3	0	$-3I_{K1}x_{2рез}/(x_{0рез} + x_{2рез})$	$3I_{K1}$

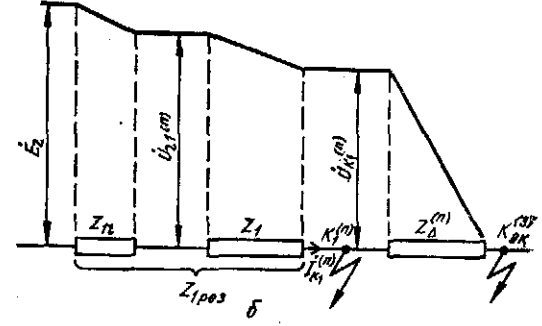
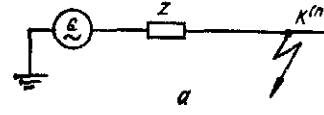


Рис. 7.4. Несимметричное (а) и эквивалентное трехфазное (б) КЗ при определении токов и напряжений прямой последовательности

Рис. 7.4 раскрывает смысл эквивалентного трехфазного КЗ, при котором могут быть найдены ток и напряжение прямой последовательности в месте заданного несимметричного КЗ.

Ток прямой последовательности в месте КЗ, а также токи других последовательностей зависят от сопротивлений элементов всех последовательностей рассматриваемой схемы (включая сопротивление дуги). Так, если нейтраль трансформатора, на выводах которого имеется одно- или двухфазное КЗ на землю, заземлить через какое-либо сопротивление, то это скажется на токах всех последовательностей, хотя токи прямой и обратной последовательностей через это сопротивление не протекают.

Установленная идентичность между токами прямой последовательности несимметричного КЗ и токами при некотором эквивалентном трехфазном КЗ подтверждает то, что все полученные ранее выражения тока трехфазного КЗ можно распространить на случай несимметричных КЗ.

7.7. Комплексные схемы замещения

Полученные выше соотношения между симметричными составляющими напряжений в месте КЗ позволяют для каждого вида несимметричного КЗ соединить вместе схемы отдельных последовательностей и образовать тем самым комплексную схему замещения соответствующего вида КЗ. Такая схема замещения хорошо иллюстрирует правило эквивалентности прямой последовательности.

На рис. 7.5 показаны комплексные схемы замещения короткозамкнутой цепи, которые характеризуются сопротивлениями $Z_{1рез}$, $Z_{2рез}$, $Z_{0рез}$ и соответствуют фазе А. Нетрудно убедиться в том, что при этом соблюдаются соотношения между симметричными составляющими напряжений и токов в месте КЗ.

При трехфазном КЗ схемы замещения обратной и нулевой последовательностей отсутствуют, симметричные составляющие напряжения в месте КЗ равны нулю, так что в комплексную схему замещения входит только эквивалентная схема прямой последовательности (рис. 7.5, а).

При двухфазном КЗ не обтекается током эквивалентная схема нулевой последовательности, симметричные составляющие напря-

жения прямой и обратной последовательностей в месте КЗ одинаковы. Это позволяет объединить последовательности (рис. 7.5, а) и получить комплексную схему замещения при данном виде КЗ. В этой схеме ток обратной последовательности имеет направление от конца к началу схемы обратной последовательности.

При однофазном КЗ все три эквивалентные схемы обтекаются одинаковым током, напряжение прямой последовательности в месте КЗ согласно (7.19) равно суммарному напряжению в схемах обратной и нулевой последовательностей. Это дает возможность представить комплексную схему однофазного КЗ как

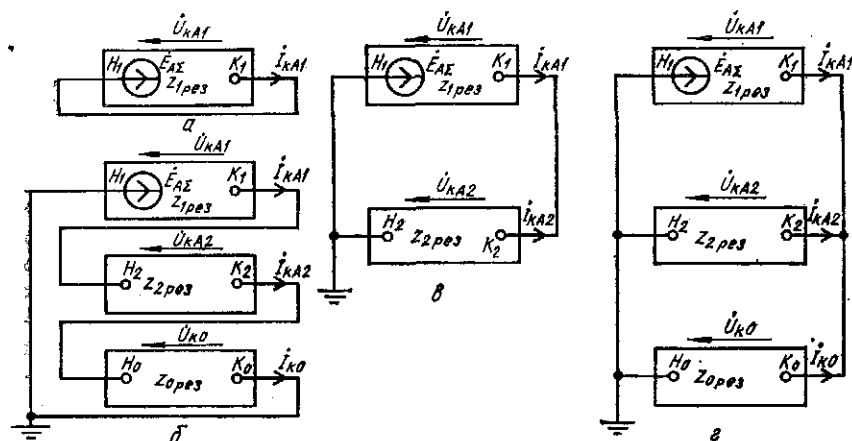


Рис. 7.5. Комплексные схемы замещения трехфазного (а), однофазного (б), двухфазного (в) и двухфазного на землю (г) КЗ

последовательную цепь всех трех эквивалентных схем (рис. 7.5, б). Напряжения обратной и нулевой последовательностей определяются относительно точек нулевого потенциала схем одноименных последовательностей, т. е. соответственно по отношению к точкам H_2 и H_0 , которые являются началами схем этих последовательностей.

Комплексная схема замещения в случае двухфазного КЗ на землю показана на рис. 7.5, г. При этом виде КЗ симметричные составляющие напряжения в месте КЗ равны между собой, что позволяет объединить концы всех эквивалентных схем. В схемах обратной и нулевой последовательностей токи имеют направление от конца к началу. Это соответствует полученным выше соотношениям между симметричными составляющими токов эквивалентных схем.

Комплексные схемы замещения особенно удобны при использовании расчетных моделей и установок, так как при этом можно измерить токи и напряжения отдельных последовательностей на любом участке и в любой точке рассматриваемой системы.

Поскольку для каждого вида КЗ соотношения между симметричными составляющими токов в месте КЗ, равно как и соотноше-

ния между токами и симметричными составляющими напряжения, известны, зная $I_{KA1}^{(n)}$ по (7.60), легко найти симметричные составляющие токов и напряжений в месте КЗ, а по (7.2) и (7.3) определить их действительные значения.

Если требуется рассчитать значения токов поврежденных фаз в месте КЗ, то их можно вычислить по коэффициенту $m^{(n)}$ согласно (7.61).

7.8. Сравнение токов при различных видах несимметричного короткого замыкания

Правило эквивалентности прямой последовательности и установленные значения $x_{\Delta}^{(n)}$ и $m^{(n)}$ (см. табл. 7.1) позволяют достаточно просто сравнить различные виды КЗ. Ограничимся таким сравнением для условий, когда короткозамкнутая цепь чисто индуктивная.

Полагая, что КЗ разных видов происходят поочередно в одной и той же точке системы и при одних и тех же исходных условиях, на основании данных табл. 7.1 можно записать следующие неравенства:

$$x_{\Delta}^{(1)} > x_{\Delta}^{(2)} > x_{\Delta}^{(1,1)} > x_{\Delta}^{(3)} = 0; \quad (7.63)$$

$$I_{K1}^{(1)} < I_{K1}^{(2)} < I_{K1}^{(1,1)} < I_K^{(3)}; \quad (7.64)$$

$$U_{K1}^{(1)} > U_{K1}^{(2)} > U_{K1}^{(1,1)} > U_K^{(3)} = 0. \quad (7.65)$$

Выясним пределы, в которых могут находиться значения токов при несимметричных КЗ по сравнению со значениями токов трехфазного КЗ, возникающего в той же точке системы. Знание этих пределов представляет практический интерес, так как позволяет по известному значению тока трехфазного КЗ оценить в первом приближении возможные наибольшие и наименьшие значения тока при несимметричных КЗ. Устанавливаемые предельные соотношения действительны для токов только в месте КЗ и их нельзя распространять на токи остальных ветвей рассматриваемой схемы.

На основании (7.60) и (7.61) отношение тока в месте несимметричного КЗ к току трехфазного КЗ при тех же условиях можно записать так:

$$K_{(n-3)} = I_K^{(n)}/I_K^{(3)} = m^{(n)}E_{\Sigma}^{(n)}/(E_{\Sigma}^{(3)}(1 + x_{\Delta}^{(n)}/x_{1pes})), \quad (7.66)$$

где индекс у результирующей э. д. с. соответствует виду КЗ.

Последнее выражение записано для произвольного момента времени. В зависимости от того, каким реактивным сопротивлением представлен генератор в схеме прямой последовательности, и должна быть принята соответствующая э. д. с. Для приближенной оценки пределов изменения $K_{(n-3)}$ можно пренебречь различием $E_{\Sigma}^{(n)}$ и $E_{\Sigma}^{(3)}$. При этом выражение (7.66) упрощается и принимает вид

$$K_{(n-3)} \approx m^{(n)}/(1 + x_{\Delta}^{(n)}/x_{1pes}). \quad (7.67)$$

Рассмотрим, какие предельные значения может принимать отношение $K_{(1-3)}$ при различных видах КЗ.

Двухфазные КЗ. Согласно данным табл. 7.1

$$K_{(2-3)} = \sqrt{3}/(1 + x_{2\text{рез}}/x_{1\text{рез}}). \quad (7.68)$$

При КЗ вблизи зажимов генератора $x_{\text{вн}} \approx 0$. При этом в начальный момент КЗ ($t = 0$) $x_{1г} = x_d$, $x_{2г} \approx x_d$. Следовательно,

$$x_{1\text{рез}} \approx x_{2\text{рез}}; \quad K_{(2-3)} = \sqrt{3}/2. \quad (7.69)$$

В установившемся режиме ($t = \infty$), при котором $x_{1г} = x_d$, $x_{2г} \ll x_d$, $x_{1\text{рез}} \gg x_{2\text{рез}}$, можно полагать $x_{2\text{рез}} \approx 0$. Тогда $K_{(2-3)} = \sqrt{3}$. Следовательно, отношение $K_{(2-3)}$ находится примерно в следующих пределах:

$$\sqrt{3}/2 \leq K_{(2-3)} < \sqrt{3}. \quad (7.70)$$

При КЗ в удаленной точке по отношению к зажимам генератора $x_{\text{вн}}$ велико. Это может быть, например, у СЭС промышленного предприятия средней мощности, не имеющего собственной ТЭЦ. В этом случае

$$x_{2\text{рез}}/x_{1\text{рез}} = (x_{2г} + x_{\text{вн}})/(x_{1г} + x_{\text{вн}}) \approx 1 \quad (7.71)$$

независимо от момента КЗ, а $K_{(2-3)} = \sqrt{3}/2$. Это означает, что между токами двух- и трехфазного КЗ в течение всего переходного процесса сохраняется приблизительно постоянное соотношение:

$$I_{\text{к}}^{(2)} \approx (\sqrt{3}/2) I_{\text{к}}^{(3)} \approx 0,87 I_{\text{к}}^{(3)}. \quad (7.72)$$

Однофазное КЗ. Согласно данным табл. 7.1 и выражению (7.67) отношение токов

$$K_{(1-3)} = 3/(1 + (x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}})/x_{1\text{рез}}). \quad (7.73)$$

Индуктивное сопротивление $x_{0\text{рез}}$ изменяется в очень широких пределах (практически от 0 до ∞). Его значение может изменяться преднамеренно путем изменения числа заземленных нейтралей трансформаторов в сетях напряжением 110 кВ и выше. При КЗ вблизи зажимов генератора ($x_{\text{вн}} \approx 0$), если $x_{0\text{рез}} = 0$, рассматривается установившийся режим КЗ, когда $x_{1\text{рез}} \gg x_{2\text{рез}}$ и можно считать, что $x_{2\text{рез}} \approx 0$. В этом случае предельное значение $K_{(1-3)} = 3$. Если же $x_{0\text{рез}} \approx \infty$, то $K_{(1-3)} = 0$. Следовательно, отношение $K_{(1-3)}$ находится в пределах

$$0 \leq K_{(1-3)} < 3. \quad (7.74)$$

При КЗ в удаленной точке системы, где $x_{2\text{рез}} \approx x_{1\text{рез}}$, предельные условия, соответствующие $x_{0\text{рез}} = 0$ и $x_{0\text{рез}} = \infty$, будут следующими:

$$0 \leq K_{(1-3)} < 1,5. \quad (7.75)$$

Изменение $K_{(1-3)}$ в зависимости от отношения $x_{0\text{рез}}/x_{1\text{рез}}$ при КЗ в удаленной точке показано на рис. 7.6.

Двухфазное КЗ на землю. Согласно табл. 7.1 и зависимости (7.67)

$$K_{(1,1-3)} = m^{(1,1)}/(1 + x_{2\text{рез}}x_{0\text{рез}}/((x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}})x_{1\text{рез}})), \quad (7.76)$$

где $m^{(1,1)} = 1,5$ при $x_{2\text{рез}} = x_{0\text{рез}}$ (см. п. 7.4) и $m^{(1,1)} = \sqrt{3}$ при $x_{2\text{рез}}/x_{0\text{рез}}$, равном 0 или ∞ . Если $x_{0\text{рез}} = 0$, то $K_{(1,1-3)} = 3$, а если $x_{0\text{рез}} = \infty$, то комплексная схема замещения (см. рис. 7.5, з) превращается в комплексную схему замещения при двухфазном КЗ (см. рис. 7.5, д), в результате чего

$$K_{(1,1-3)} = \sqrt{3}/(1 + x_{2\text{рез}}/x_{1\text{рез}}). \quad (7.77)$$

При КЗ в удаленной точке, где $x_{2\text{рез}} \approx x_{1\text{рез}}$,

$$K_{(1,1-3)} = \sqrt{3}/2. \quad (7.78)$$

Поэтому $K_{(1,1-3)}$ изменяется в пределах

$$\sqrt{3}/2 \leq K_{(1,1-3)} \leq \sqrt{3}, \quad (7.79)$$

т. е. в таких же пределах, как и при двухфазном КЗ.

Изменение $K_{(1,1-3)}$ в зависимости от отношения $x_{0\text{рез}}/x_{1\text{рез}}$ при КЗ в удаленной точке изображено на рис. 7.6, из которого следует, что при $x_{0\text{рез}}/x_{1\text{рез}} = 0,2 \div 1$ ток однофазного КЗ немного больше тока двухфазного КЗ на землю, тогда как при всех остальных значениях $x_{0\text{рез}}/x_{1\text{рез}}$ имеет место обратное соотношение.

Практический интерес представляет также сравнение значений токов в земле при одно- и двухфазном КЗ на землю. Используя (7.11), (7.13), (7.46) и (7.47), находим, что отношение $k_3 = I_3^{(1)}/I_3^{(1,1)} = I_{\text{к0}}^{(1)}/I_{\text{к0}}^{(1,1)}$ можно записать в виде

$$k_3 = (x_{1\text{рез}}x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}x_{1\text{рез}} + x_{2\text{рез}}x_{0\text{рез}})/(x_{1\text{рез}}x_{2\text{рез}} + x_{2\text{рез}}^2 + x_{2\text{рез}}x_{0\text{рез}}), \quad (7.80)$$

откуда следует, что в зависимости от соотношения между $x_{2\text{рез}}$ и $x_{1\text{рез}}x_{0\text{рез}}$ может быть $k_3 \leq 1$. При $x_{2\text{рез}} = x_{1\text{рез}}$ выражение (7.80) принимает вид

$$k_3 = (1 + 2x_{0\text{рез}}/x_{1\text{рез}})/(2 + x_{0\text{рез}}/x_{1\text{рез}}). \quad (7.81)$$

Изменение k_3 в зависимости от отношения $x_{0\text{рез}}/x_{1\text{рез}}$ иллюстрирует соответствующая кривая рис. 7.6. Как следует из рисунка, лишь при $x_{0\text{рез}} = x_{1\text{рез}}$ токи в земле для сравниваемых видов КЗ одинаковы. При $x_{0\text{рез}} > x_{1\text{рез}}$ ток в земле больше в случае однофазного КЗ, а при $x_{0\text{рез}} < x_{1\text{рез}}$ больше ток в случае двухфазного КЗ на землю. Соотношения (7.80) и (7.81) действительны для токов нулевой последовательности любой ветви схемы, так как они пропорциональны токам в месте КЗ.

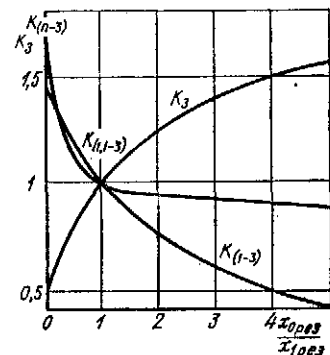


Рис. 7.6. Кривые, характеризующие изменения $K_{(1-3)}$, $K_{(1,1-3)}$ и K_3 в зависимости от отношения $x_{0\text{рез}}/x_{1\text{рез}}$

7.9. Векторные диаграммы токов и напряжений

В соответствии с соотношениями, полученными при рассмотрении одно-, двух- и двухфазного на землю КЗ на рис. 7.7—7.9 построены векторные диаграммы токов и напряжений.

На рис. 7.7 изображены векторные диаграммы токов и напряжений в месте однофазного КЗ. Анализируя соотношения для однофазного КЗ, построение начинают, например, с вектора I_{A1} . Пользуясь (7.11), строят векторы I_{A2} и I_{A0} , а остальные фазные составляющие — на основании определения прямой, обратной и

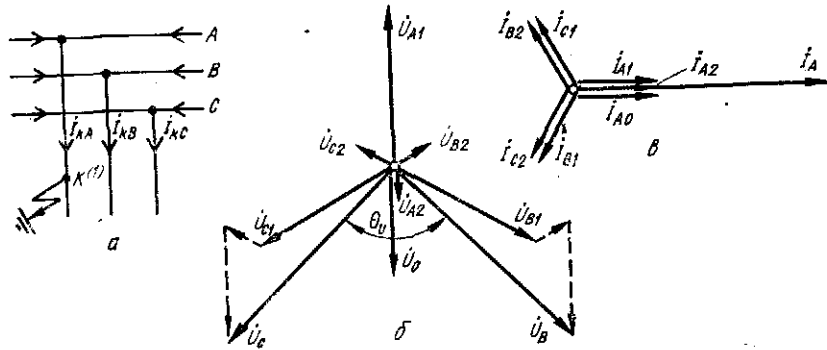


Рис. 7.7. Векторные диаграммы токов и напряжений в месте однофазного КЗ

нулевой последовательностей. Фазные токи находят как геометрическую сумму симметричных составляющих соответствующих фаз, правильность построения которых подтверждается формулами.

Аналогично выполняют построение векторной диаграммы напряжений в месте однофазного КЗ и векторных диаграмм токов и напряжений для остальных видов несимметричного КЗ (см. рис. 7.8, 7.9). При построении векторных диаграмм следует помнить, что токи чисто индуктивные, так как активные сопротивления приняты равными нулю. Угол θ_U между напряжениями неповрежденных фаз при однофазном КЗ зависит от соотношения между $x_{2рез}$ и $x_{0рез}$. Он изменяется в широких пределах: $60^\circ \leq \theta_U < 180^\circ$. Нижний предел соответствует условию $x_{0рез} = \infty$, к верхнему пределу θ_U стремится при $x_{0рез} \rightarrow 0$. Лишь при $x_{2рез} = x_{0рез}$ угол $\theta_U = 120^\circ$.

Для векторной диаграммы токов в месте двухфазного КЗ на землю угол θ_I между токами поврежденных фаз может изменяться в пределах $60^\circ < \theta_I < 180^\circ$, стремясь к нижнему пределу при $x_{0рез} \rightarrow 0$ и к верхнему — при $x_{0рез} \rightarrow \infty$, что соответствует условиям двухфазного КЗ без соединения с землей.

Проследим, как деформируются векторные диаграммы токов и напряжений при разных видах КЗ по мере удаления от места КЗ и при переходе через трансформатор. При переходе через трехфазный трансформатор (трехфазную группу однофазных трансформаторов) в нормальном режиме токи и напряжения в общем случае

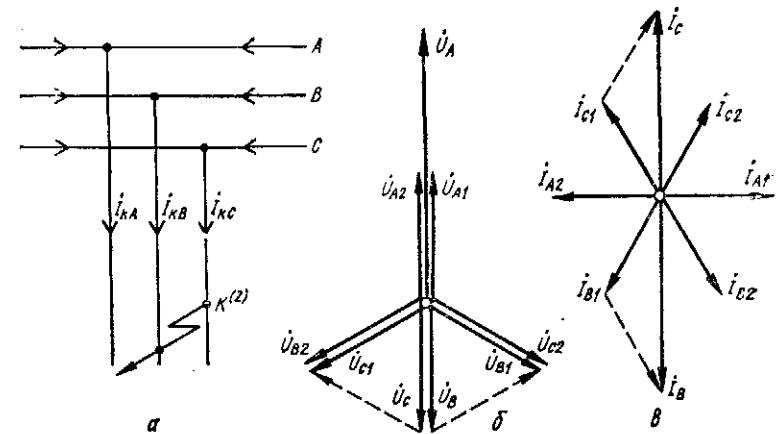


Рис. 7.8. Векторные диаграммы токов и напряжений в месте двухфазного КЗ

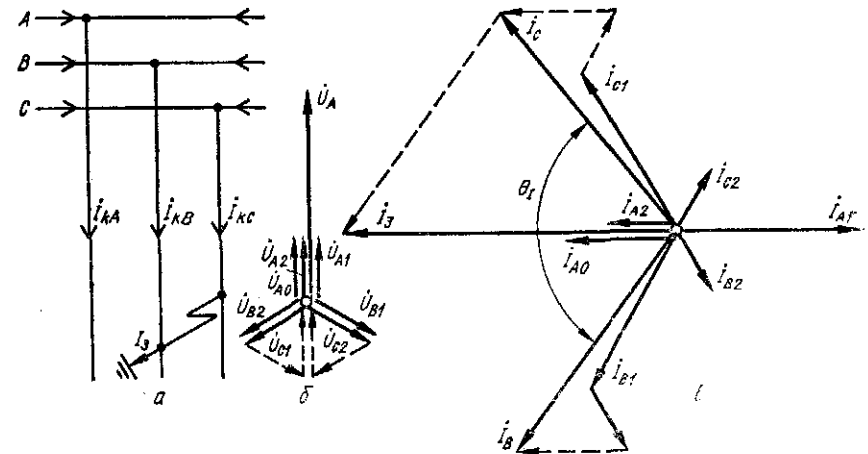


Рис. 7.9. Векторные диаграммы токов и напряжений в месте двухфазного КЗ на землю

изменяются по значению и фазе, зависящей от группы соединения обмоток трансформатора. В частных случаях возможна трансформация только по значению или по фазе, например соответственно для трансформаторов с соединением обмоток по схеме $Y/Y-12$ и для трансформаторов с соединением обмоток по схеме Y/Δ при коэффициенте трансформации $K = 1$.

Обратимся к рис. 7.10, где показано соединение обмоток трансформатора по схеме $Y/\Delta-11$. Если числа витков фазных обмоток соответственно равны w_Y и w_Δ , то линейный коэффициент трансформации

$$K = \sqrt{3} w_Y / w_\Delta. \quad (7.82)$$

При заданных фазных токах I_A, I_B, I_C в соответствии с принятыми на рис. 7.10 положительными направлениями токи в линейных проводах за треугольником

$$\left. \begin{aligned} I_a &= I_{a\Delta} - I_{b\Delta} = (I_A - I_B) \omega_Y / \omega_\Delta = (I_A - I_B) K / \sqrt{3}; \\ I_b &= I_{b\Delta} - I_{c\Delta} = (I_B - I_C) \omega_Y / \omega_\Delta = (I_B - I_C) K / \sqrt{3}; \\ I_c &= I_{c\Delta} - I_{a\Delta} = (I_C - I_A) \omega_Y / \omega_\Delta = (I_C - I_A) K / \sqrt{3}. \end{aligned} \right\} (7.83)$$

Выражения (7.83) можно видоизменить, записав токи через их симметричные составляющие. Так, ток

$$I_a = (I_{A1} + I_{A2} + I_{A0} - a^2 I_{A1} - a I_{A2} - I_{A0}) K / \sqrt{3}, \quad (7.84)$$

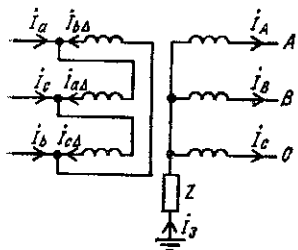


Рис. 7.10. Соединение обмоток трансформатора по схеме $\star/\Delta-11$

откуда следует, что линейные токи за треугольником не содержат составляющих нулевой последовательности.

Аналогично могут быть найдены напряжения за рассматриваемым трансформатором. Если U_A, U_B, U_C — фазные напряжения со стороны звезды, включающие в себя падения напряжения в самом трансформаторе, то искомые фазные напряжения со стороны треугольника

$$\left. \begin{aligned} U_a &= (U_A - U_B) / (K \sqrt{3}); \\ U_b &= (U_B - U_C) / (K \sqrt{3}); \\ U_c &= (U_C - U_A) / (K \sqrt{3}) \end{aligned} \right\} (7.85)$$

или при их выражении через симметричные составляющие, например фазы a ,

$$U_a = (U_{A1} e^{j30^\circ} + U_{A2} e^{-j30^\circ}) / K. \quad (7.86)$$

Из (7.85) и (7.86) следует, что напряжения на стороне треугольника не зависят от напряжения нулевой последовательности на стороне звезды. Если нейтраль системы на стороне треугольника смещена на $U_{0\Delta}$, то для определения фазных напряжений относительно земли к значениям по (7.85) или (7.86) нужно прибавить $U_{0\Delta}$.

Структура выражений (7.86) и (7.84) показывает, что при переходе со стороны звезды на сторону треугольника трансформатора, обмотки которого соединены по схеме $\star/\Delta-11$, векторы прямой последовательности поворачиваются на 30° в направлении вращения векторов, а векторы обратной последовательности — на 30° в противоположном направлении (рис. 7.11).

При переходе через трансформатор в обратном направлении угловые смещения симметричных составляющих меняют свой знак на противоположный.

Наиболее простые соотношения получаются для трансформатора с соединением обмоток по группе 12, так как в этом случае

угловые смещения токов и напряжений вообще отсутствуют. При этом, когда имеется соединение по схеме \star/\star , должны быть учтены трансформируемые составляющие нулевой последовательности.

При нечетной группе соединения обмоток, когда знание истинной взаимной ориентировки векторных диаграмм на обеих сторонах трансформатора не требуется, для простоты можно считать,

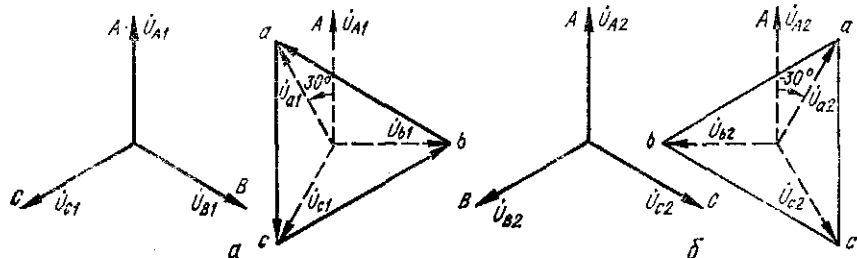


Рис. 7.11. Сдвиг векторов напряжений прямой и обратной последовательностей для трансформатора с соединением обмоток по схеме $\star/\Delta-11$

что его обмотки соединены по группе 3 (или 9). При этом векторы прямой и обратной последовательностей повернуты на 90° в противоположные стороны (рис. 7.12). Очевидно, векторы прямой последовательности можно оставить без смещения, но векторы обратной последовательности надо сдвинуть на 180° . Отсюда вытекает следующее правило: при переходе через трансформатор с соединением об-

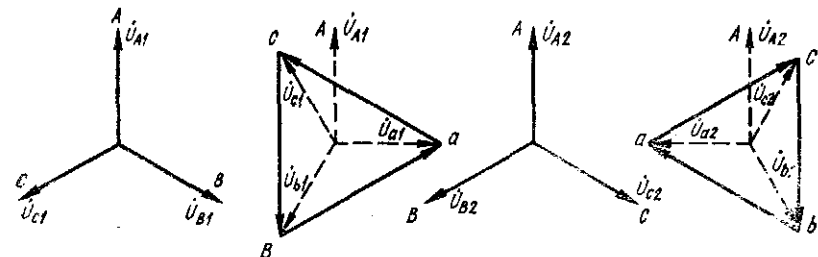


Рис. 7.12. Сдвиг векторов напряжений прямой и обратной последовательностей для трансформатора с соединением обмоток по схеме $\star/\Delta-3$

моток по схеме \star/Δ или Δ/\star достаточно только у векторов обратной последовательности изменить знак на противоположный.

Нужно иметь в виду, что отказ от действительной группы соединения обмоток трансформаторов приводит к несопадению обозначений линейных проводов за трансформатором с маркировкой, соответствующей действительной группе соединений.

Если токи и напряжения выражены в относительных единицах, то при их трансформации должны учитываться лишь угловые сдвиги, обусловленные соответствующей группой соединения обмоток трансформатора.

Используя векторные диаграммы для места КЗ, можно построить векторные диаграммы токов и напряжений в произвольной

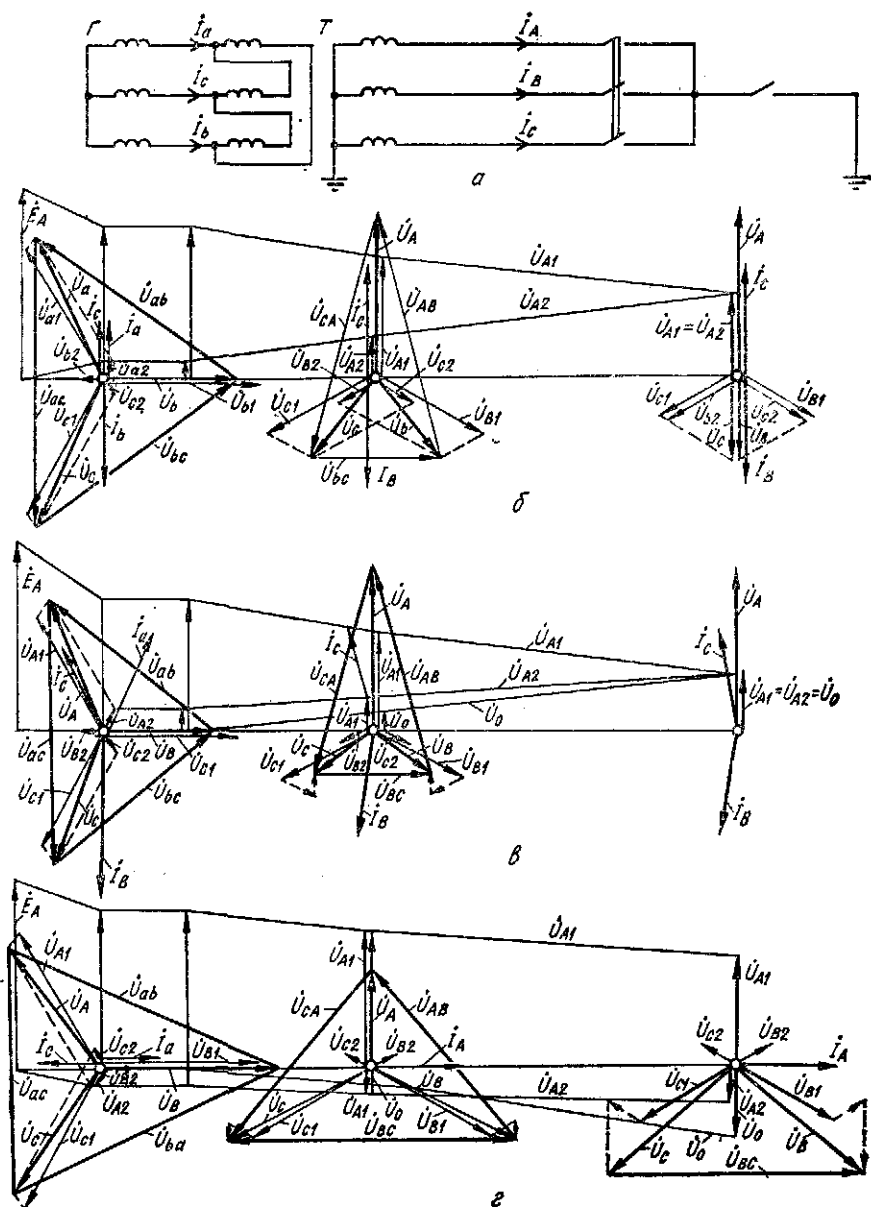


Рис. 7.13. Принципиальная схема (а), эпюры относительных напряжений отдельных последовательностей, а также векторные диаграммы токов и напряжений при двухфазном (б), двухфазном на землю (в) и однофазном (г) КЗ

точке рассматриваемой схемы. На рис. 7.13, б—г в качестве примера показаны векторные диаграммы токов и напряжений при разных видах КЗ в точках, удаленных от места КЗ на различные расстояния. В конце ВЛ (рис. 7.13, а) присоединены однополюсные выключатели, с помощью которых может быть осуществлен любой вид КЗ. Для упрощения примем, что цепь КЗ состоит из чисто индуктивных сопротивлений.

Эпюры напряжений отдельных последовательностей вдоль элементов рассматриваемой схемы для каждого несимметричного КЗ изображены на рис. 7.13, б—г. По мере приближения к генератору напряжение прямой последовательности возрастает, а напряжения обратной и нулевой последовательностей уменьшаются по абсолютному значению. При указанном на рис. 7.13, а соединении обмоток трансформатора напряжение нулевой последовательности за трансформатором отсутствует. Как следует из соотношения между \dot{U}_{A2} и \dot{U}_{A0} , в месте однофазного КЗ $X_{0рез} > X_{2рез}$.

Векторные диаграммы напряжений, построенные по соответствующим значениям симметричных составляющих, показаны для места КЗ в начале линии и на зажимах генератора. Принято, что обмотки трансформатора соединены по схеме $\nabla/\Delta-11$. Чтобы можно было сравнивать диаграммы на обеих сторонах трансформатора, считается, что токи и напряжения выражены в относительных единицах или приведены к одной ступени напряжения.

Наибольшее искажение векторной диаграммы напряжений всегда получается в месте КЗ. Для точек, расположенных ближе к генератору, это искажение становится все меньше. Полностью симметричной сохраняется система векторов э. д. с. Поскольку трансформатор имеет нечетную группу соединения обмоток, однофазное КЗ на стороне соединения в звезду воспринимается генератором как двухфазное КЗ.

При построении векторных диаграмм и напряжений для других участков сети следует иметь в виду три обстоятельства:

- 1) напряжение прямой последовательности имеет наименьшее значение в месте КЗ и повышается при приближении к источнику, а напряжения обратной и нулевой последовательностей, наоборот, имеют наибольшие по модулю значения в месте КЗ и уменьшаются при приближении к источнику;
- 2) при переходе через трансформатор системы векторов прямой и обратной последовательностей поворачиваются соответственно по ходу и против хода часовой стрелки относительно их положения в месте КЗ, причем угол поворота зависит от группы соединения обмоток трансформатора;
- 3) обмотки трансформаторов, соединенные в треугольник, ограничивают область прохождения токов нулевой последовательности в сети; в комплексных схемах замещения они являются началом схемы нулевой последовательности.

7.10. Применение метода расчетных кривых для расчета несимметричных коротких замыканий

Все рассмотренные выше практические методы расчета переходного процесса при трехфазном КЗ согласно правилу эквивалентности прямой последовательности могут быть применены для расчета переходного процесса при любом несимметричном КЗ.

Порядок пользования расчетными кривыми для определения токов несимметричного КЗ вытекает из основного правила: *несимметричное КЗ рассчитывается как симметричное трехфазное с отнесением места КЗ к дополнительному сопротивлению $x_{\Delta}^{(n)}$ для данного вида КЗ* (табл. 7.1).

Для расчета несимметричных КЗ вначале составляют схемы замещения с учетом всех последовательностей (прямой, обратной и нулевой), используя рекомендации п. 6.4. Определяют параметры входящих в схемы элементов и указывают их значения на схемах замещения. Затем составляют эквивалентные схемы замещения и находят результирующие сопротивления отдельных последовательностей $x_{1рез}$, $x_{2рез}$, $x_{0рез}$ относительно точки КЗ, а также результирующую э. д. с. прямой последовательности E_{Σ} относительно той же точки. По значениям $x_{1рез}$, $x_{2рез}$ и $x_{0рез}$ вычисляют эквивалентное сопротивление

$$x_{рез}^{(n)} = x_{1рез} + x_{\Delta}^{(n)} \quad (7.87)$$

комплексной схемы замещения для данного вида несимметричного КЗ.

Чтобы воспользоваться расчетными кривыми (см. рис. 5.5, 5.6) для приближенного определения тока прямой последовательности в произвольный момент переходного процесса любого несимметричного КЗ, предварительно нужно найти расчетное реактивное сопротивление $x_{*расч}^{(n)}$ для данного вида КЗ. С учетом индивидуального изменения токов расчетное сопротивление выделяемой генерирующей j -й ветви при любом несимметричном КЗ по аналогии с (5.11) определяют по формуле

$$x_{*расчj}^{(n)} = x_{рез}^{(n)} S_{номj} / (c_j U_{\delta}^2), \quad (7.88)$$

или

$$x_{*расчj}^{(n)} = x_{рез}^{(n)} S_{номj} / (c_j S_{\delta}), \quad (7.89)$$

где $x_{рез}^{(n)}$ ($x_{*рез}^{(n)}$) — эквивалентное сопротивление для данного вида несимметричного КЗ, определяемое на основании (7.87), Ом (отн. ед.); $S_{номj}$ — суммарная номинальная мощность генератора выделяемого j -го луча; c_j — коэффициент токораспределения для j -го луча, определяемый в схеме прямой последовательности, т. е. тот же коэффициент распределения, что и при трехфазном КЗ в рассматриваемой точке.

При расчете по общему изменению, очевидно, $c = 1$, а под $S_{номj}$ следует понимать суммарную номинальную мощность всех генераторов в схеме.

Имея в виду приближенность данного метода расчета, можно для упрощения принять $x_{2рез} \approx x_{1рез}$, т. е. считать результирующее реактивное сопротивление обратной последовательности равным результирующему реактивному сопротивлению, определяемому для трехфазного КЗ в той же точке.

По найденному расчетному сопротивлению при данном виде КЗ, используя соответствующие расчетные кривые, находят для заданного момента времени t относительное значение тока прямой последовательности, а затем по формулам, приведенным в табл. 7.1, определяют токи обратной и нулевой последовательностей, а также напряжения всех последовательностей в месте КЗ. Распределяют токи и напряжения отдельных последовательностей по сети, идя от точки КЗ. После этого рассчитывают значения полных токов и напряжений фаз в месте КЗ и в интересующих точках сети, учитывая при этом схемы и группы соединений обмоток силовых трансформаторов сети.

Значения периодической составляющей тока в месте КЗ вычисляют по формуле

$$I_{kl}^{(n)} = m^{(n)} I_{*kl}^{(n)} I_{ном\Sigma}, \quad (7.90)$$

а при расчете с учетом индивидуального изменения — по формуле

$$I_{kl}^{(n)} = m^{(n)} [I_{*klI}^{(n)} I_{номI} + I_{*klII}^{(n)} I_{номII} + \dots], \quad (7.91)$$

где $m^{(n)}$ — коэффициент, значения которого для каждого вида КЗ приведены в табл. 7.1; $I_{ном\Sigma}$ — суммарный номинальный ток генераторов, приведенный к напряжению той ступени, где рассматривается КЗ; $I_{*klI}^{(n)}$, $I_{*klII}^{(n)}$, ... — относительные значения токов прямой последовательности, найденные по расчетным кривым для выделенных ветвей I, II и т. д.; $I_{номI}$, $I_{номII}$, ... — номинальные токи тех же ветвей, приведенные к напряжению ступени, где рассматривается КЗ, кА.

Источник (система) неограниченной мощности при расчете несимметричных КЗ учитывается так же, как и при расчете трехфазного КЗ. Его взаимное сопротивление определяется выражением

$$x_{*c} = (x_{1рез} + x_{*\Delta}^{(n)}) / c_c, \quad (7.92)$$

где c_c — коэффициент распределения для луча, через который в заданной схеме осуществляется связь с источником (если такой источник связан с точкой КЗ несколькими лучами, то под c_c следует понимать сумму соответствующих коэффициентов распределения).

Ток прямой последовательности, создаваемый таким источником, рассчитывают по формуле

$$I_e = I_{\delta} / x_{*c}, \quad (7.93)$$

если сопротивление x_{*c} источника выражено в относительных единицах, или по формуле

$$I_e = U_{\delta} / (\sqrt{3} x_c), \quad (7.94)$$

если это сопротивление задано в именованных единицах. Затем найденный ток прямой последовательности следует прибавить к току той же последовательности, создаваемому другими генераторами.

При введении дополнительного реактивного сопротивления $x_A^{(n)}$ условия работы отдельных генераторов (или станций) при несимметричных КЗ отличаются меньше, чем при трехфазном КЗ в той же точке. Поэтому при расчете несимметричных КЗ индивидуальное затухание периодической составляющей тока КЗ зачастую можно не учитывать или учитывать для меньшего числа выделяемых ветвей.

7.11. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью

При замыкании на землю в сети с изолированной нейтралью путь для тока нулевой последовательности, текущего в землю, проходит через емкостное сопротивление каждой фазы относительно земли. Поскольку емкостные сопротивления элементов электрической системы значительно превышают их индуктивные и активные сопротивления, последними можно пренебречь. Это означает, что ток замыкания можно считать независимым от места замыкания, а напряжение источника — неизменным по амплитуде. При таких допущениях токи нулевой, прямой и обратной последовательностей в месте замыкания на землю определяются выражением

$$I_{k0} = I_{k2} = I_{k1} = jU_{\phi} / x_{0\text{рез.с}}, \quad (7.95)$$

где U_{ϕ} — среднее значение фазного напряжения ступени трансформации, на которой произошло замыкание на землю; $x_{0\text{рез.с}}$ — суммарное емкостное сопротивление нулевой последовательности элементов сети (ВЛ и КЛ), электрически связанных с точкой замыкания.

Емкостное сопротивление нулевой последовательности трехжильных КЛ с круглыми жилами на 1 км длины можно рассчитать по приближенной формуле (Ом · км)

$$x_{0с} = 96,5 / (1,85 + 2r / (B + b)) \cdot 10^3, \quad (7.96)$$

где r — радиус жилы; B и b — толщины фазной и поясной изоляции соответственно (величины r , B , b должны быть выражены в одинаковых единицах).

Для КЛ с секторными жилами, имеющими ту же поверхность проводника и ту же толщину изоляции, что и КЛ с круглыми жилами, емкостные сопротивления $x_{0с}$ несколько меньше. Это снижение $x_{0с}$ можно учесть коэффициентом n , значения которого при $(B + b) / (2r) = 0,3; 0,5; 0,7; 1; 1,5$ и 2 соответственно равны $0,7; 0,82; 0,87; 0,9; 0,94$ и $0,96$.

Емкостное сопротивление нулевой последовательности ВЛ без

грозозащитных тросов на 1 км длины можно найти по формуле (Ом · км)

$$x_{0с} = 3,96 \cdot 10^6 \lg(S_{\text{ср}} / \sqrt{R_{\text{пр}} d_{\text{ср}}^2}), \quad (7.97)$$

где $S_{\text{ср}} \approx 2(h_A + h_B + h_C) / 3$ — среднее расстояние от проводов фаз A , B и C до их зеркальных отражений относительно поверхности земли (h_A , h_B , h_C — высоты подвески проводов фаз с учетом их провеса); $R_{\text{пр}}$ — радиус провода; $d_{\text{ср}}$ — среднее геометрическое расстояние между проводами фаз A , B и C .

Таблица 7.2. Средние значения емкостного тока замыкания на землю одной фазы ЛЭП при частоте 50 Гц

Характеристика ЛЭП	Емкостный ток (А/км) при номинальном напряжении сети, кВ	
	6	10
КЛ, имеющая один кабель с площадью сечения, мм ² :		
16	0,4 (0,35)	0,55
25	0,5 (0,4)	0,65
35	0,58 (0,45)	0,72
50	0,68 (0,5)	0,8
70	0,8 (0,58)	0,92
95	0,9 (0,68)	1,04
120	1 (0,75)	1,16
150	1,18 (0,85)	1,3
185	1,25 (0,95)	1,47
240	1,45 (1,1)	1,7
Одноцепная ВЛ без троса	0,013	0,0256
с тросом	—	0,032
Двухцепная ВЛ без троса	0,017	0,035

Примечание. В скобках указаны значения емкостного тока для кабелей на 10 кВ, проложенных в сети напряжением 6 кВ.

Симметричные составляющие напряжений в месте замыкания на землю определяются выражениями

$$\left. \begin{aligned} U_{k1} &= U_{k0} = U_{\phi}; \\ U_{k2} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (7.98)$$

Значение полного тока в месте замыкания на землю составляет

$$I_k = 3I_{k0} = 3jU_{\phi} / x_{0\text{рез.с}}. \quad (7.99)$$

Ориентировочные значения емкостного тока замыкания на землю для разных ЛЭП приведены в табл. 7.2.

Для грубой оценки порядка значения тока замыкания на землю при отсутствии данных о параметрах КЛ сети и конструкции ВЛ по известной длине электрически связанных ЛЭП $l_{\text{кл}}$ (км) и $l_{\text{вл}}$ (км) можно воспользоваться выражением

$$I_k = U_{\text{л}} (l_{\text{кл}} / 10 + l_{\text{вл}} / 350), \quad (7.100)$$

где $U_{\text{л}}$ — среднее значение линейного напряжения ступени трансформации, на которой произошло замыкание на землю, кВ.

Опыт эксплуатации СЭС показывает, что при замыканиях на землю через дугу и малых значениях I_k дуга гаснет практически без повторных зажиганий и сопровождающих их всплесков перенапряжений. С увеличением тока I_k наблюдаются неоднократные повторные зажигания дуги и перенапряжения, что увеличивает вероятность перехода однофазного замыкания на землю в междуфазное КЗ. Поэтому в соответствии с Правилами устройства электроустановок в сетях с изолированной нейтралью при определенных значениях I_k должна выполняться компенсация емкостных токов замыкания на землю путем включения в нейтраль индуктивного сопротивления x_L (дугогасящего аппарата).

7.12. Примеры расчетов

Пример 7.1. На рис. 7.14, а изображена схема понижающей подстанции с автотрансформатором Т, который связывает системы М (330 кВ), N (110 кВ) и питает обобщенную нагрузку. Определить симметричные составляющие и полные токи поврежденной фазы в точке К однофазного КЗ на шинах 110 кВ, если параметры автотрансформатора: $S_{тр} = 200$ МВ · А, $K_{тр} = 330/110/11$, $u_{кв-с} = 10\%$, $u_{кв-н} = 34\%$, $u_{кв-н} = 22,5\%$; параметры системы М: $E_{фМ} = 340/\sqrt{3}$ кВ, $x_{1М} = x_{2М} = 50$ Ом, $x_{0М} = 98$ Ом; параметры системы N: $E_{фN} = 115/\sqrt{3}$ кВ, $x_{1N} = x_{2N} = 11$ Ом, $x_{0N} = 17$ Ом; параметры нагрузки: $x_{*н} = 0,35$, $E_{*н} = 0,85$, $S_n = 80$ МВ · А.

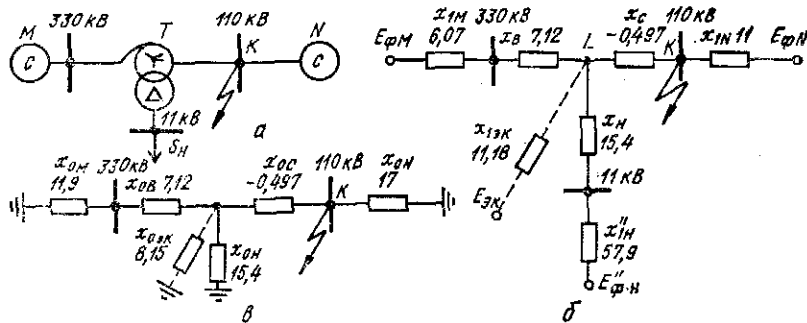


Рис. 7.14. К примеру 7.1

Решение. Расчет выполняем в именованных единицах, принимая за основную — ступень напряжением 110 кВ. Схема замещения автотрансформатора представляет собой трехлучевую звезду, в которой

$$u_{кв} = 0,5 (u_{кв-с} + u_{кв-н} - u_{кв-н}) = 0,5 (10 + 34 - 22,5) = 10,75\%;$$

$$u_{кв} = 0,5 (u_{кв-с} + u_{кв-н} - u_{кв-н}) = 0,5 (10 + 22,5 - 34) = -0,75\%;$$

$$u_{кн} = 0,5 (u_{кв-н} + u_{кв-н} - u_{кв-с}) = 0,5 (34 + 22,5 - 10) = 23,25\%.$$

Сопротивления лучей звезды в именованных единицах, приведенные к основной ступени,

$$x_B = u_{кв} U_{ном}^2 / (100 S_{ном}) = 10,75 / 100 \cdot 115^2 / (100 \cdot 200) = 7,12 \text{ Ом};$$

$$x_C = u_{кв} U_{ном}^2 / (100 S_{ном}) = -0,75 \cdot 115^2 / (100 \cdot 200) = -0,497 \text{ Ом};$$

$$x_H = u_{кн} U_{ном}^2 / (100 S_{ном}) = 23,25 \cdot 115^2 / (100 \cdot 200) = 15,4 \text{ Ом}.$$

Если из трех имеющихся выводов обмоток автотрансформатора общим считать вывод со стороны нейтрали, то симметричные составляющие токов в лучах звезды будут представлять собой токи, приведенные к расчетной ступени напряжения, или в относительных единицах — токи, притекающие к фазным выводам обмоток ВН, СН и НН автотрансформатора.

Симметричные составляющие токов в общей обмотке автотрансформатора в этой схеме отсутствуют. Эти токи определяются по закону Кирхгофа как геометрическая разность действительных, а не приведенных к одной ступени напряжения токов, притекающих к выводам обмоток ВН и СН из сетей этих напряжений, т. е. $i_{общ} = i_{ВН} - i_{СН}$.

Нейтраль автотрансформаторов всегда заземляют наглухо. Ток в нейтрали равен утроенной разности действительных токов нулевой последовательности (из сетей ВН и СН), притекающих к этим выводам автотрансформатора:

$$i_3 = 3i_{общ} = 3(i_{ВН} - i_{СН}).$$

У автотрансформаторов имеется третья обмотка (НН), соединенная в треугольник; поэтому сопротивления нулевой последовательности в схеме замещения, которая аналогична схеме прямой (обратной) последовательности, равны соответствующим сопротивлениям прямой последовательности:

$$x_{0В} \approx x_B; \quad x_{0С} \approx x_C; \quad x_{0Н} \approx x_H.$$

Рассчитываем э. д. с. и сопротивления нагрузки:

$$E''_{ф.н} = E''_{*н} U_{н.ф} U_C / U_H = 0,85 \cdot 11 / \sqrt{3} \cdot 115 / 11 = 56,5 \text{ кВ};$$

$$x''_{1н} = x''_{2н} = x''_{*н} U_C^2 / S_n = 0,35 \cdot 115^2 / 80 = 57,9 \text{ Ом}.$$

Параметры системы М (330 кВ) приводим к напряжению 110 кВ:

$$E_M = (E_{фМ} / \sqrt{3}) (U_C / U_B) = 340 \cdot 115 / (\sqrt{3} \cdot 330) = 68,3 \text{ кВ};$$

$$x_{1М} = x_{1М(330)} U_C^2 / U_B^2 = 50 \cdot 115^2 / 330^2 = 6,07 \text{ Ом};$$

$$x_{0М} = x_{0М(330)} U_C^2 / U_B^2 = 98 \cdot 115^2 / 330^2 = 11,9 \text{ Ом}.$$

Схема замещения прямой и обратной последовательности — на рис. 7.14, б, а нулевой последовательности — на рис. 7.14, в. Для схемы обратной последовательности $E_M = E_N = E_H = 0$.

Приводим схемы к элементарному виду, объединяя ветвь нагрузки S_n и системы М в эквивалентную:

$$E_{эк} = [E_{фМ} (x''_{1н} + x_H) + E''_{ф.н} (x_{1М} + x_B)] / (x''_{1н} + x_H + x_{1М} + x_B) = \\ = 68,3 (57,9 + 15,4) + 56,5 (6,07 + 7,12) / (57,9 + 15,4 + 6,07 + 7,12) = 66,6 \text{ кВ};$$

$$x_{1эк} = x_{2эк} = (x''_{1н} + x_H) (x_{1М} + x_B) / (x''_{1н} + x_H + x_{1М} + x_B) = \\ = (57,9 + 15,4) (6,07 + 7,12) / (57,9 + 15,4 + 6,07 + 7,12) = 11,18 \text{ Ом}.$$

Вычисляем результирующие э. д. с. и сопротивление $x_{1рез}$ относительно точки К:

$$E_{ф2} = [E_{эк} x_{1Н} + E_{фН} (x_{1эк} + x_C)] / (x_{1Н} + x_{1эк} + x_C) = \\ = [66,6 \cdot 11 + 66,4 (11,18 - 0,497)] / (11 - 0,497 + 11,18) = 66,5 \text{ кВ};$$

$$x_{1рез} = x_{2рез} = (x_{1эк} + x_C) x_{1Н} / (x_{1эк} + x_C + x_{1Н}) = \\ = [(11,18 - 0,497) \cdot 11] / (11,18 + 11 - 0,497) = 5,41 \text{ Ом}.$$

В схеме нулевой последовательности объединяем ветвь системы M и сопротивление x_{0H} :

$$x_{0эк} = (x_{0M} + x_{0B}) x_{0H} / (x_{0M} + x_{0B} + x_{0H}) = \\ = [(11,9 + 7,12) \cdot 15,4] / (11,9 + 7,12 + 15,4) = 8,51 \text{ Ом.}$$

Результирующее сопротивление относительно точки K

$$x_{0рез} = (x_{0эк} + x_{0C}) x_{0N} / (x_{0эк} + x_{0C} + x_{0N}) = \\ = [(8,51 + 0,497) \cdot 17] / (8,51 + 17 + 0,497) = 5,44 \text{ Ом.}$$

Принимаем $\dot{E}_{\Phi\Sigma} = jE_{\Phi\Sigma}$ и, используя равенства

$$i_{KA1}^{(n)} = \dot{E}_{\Phi\Sigma} / (z_{1рез} + z_{\Delta}^{(n)}); \\ \dot{U}_{KA1}^{(n)} = i_{KA1}^{(n)} z_{\Delta}^{(n)}; \quad \dot{U}_{KA2}^{(n)} = -i_{KA2}^{(n)} z_{2рез}; \quad \dot{U}_{K0}^{(n)} = -i_{K0}^{(n)} z_{0рез},$$

вычисляем симметричные составляющие и полные токи в точке однофазного КЗ на шинах напряжением 110 кВ. Для упрощения записи верхний индекс (два штриха) опускаем:

$$i_{KA1}^{(1)} = jE_{\Phi\Sigma} / [j(x_{1рез} + x_{2рез} + x_{0рез})] = j66,5 / [j(5,41 + 5,41 + 5,44)] = 4,09 \text{ кА}$$

$$i_{KA1}^{(1)} = i_{KA2}^{(1)} = i_{K0}^{(1)} = 4,09 \text{ кА};$$

$$i_{KA}^{(1)} = 3i_{KA1}^{(1)} = 3 \cdot 4,09 = 12,27 \text{ кА};$$

$$\dot{U}_{KA1}^{(1)} = i_{KA1}^{(1)} (x_{2рез} + x_{0рез}) = j4,09 (5,41 + 5,44) = j44,4 \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{KA2}^{(1)} = -i_{KA2}^{(1)} jx_{2рез} = -j4,09 \cdot 5,41 = -j22,15 \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{K0}^{(1)} = -i_{K0}^{(1)} jx_{0рез} = -j4,09 \cdot 5,44 = -j22,25 \text{ кВ.}$$

Пример 7.2. При однофазном КЗ у шин электрической системы и отключенном выключателе (рис. 7.15, а) определить сверхпереходные токи нулевой последовательности в обеих цепях ЛЭП. Параметры системы: $E_c = 340 \text{ кВ}$, $x_{1c} = x_{2c} = 17 \text{ Ом}$, $x_{0c} = 21 \text{ Ом}$; параметры трансформаторов: $S_{ном} = 250 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $K_{тр} = 15,75/347$, $u_k = 11 \%$; параметры генераторов: $S_{ном} = 235,5 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_{ном} = 15,75 \text{ кВ}$, $x_d'' = 0,19$, $x_{2г} = 0,23$, $\cos \varphi = 0,85$; параметры ЛЭП: $l = 215 \text{ км}$, $x_0 = 0,308 \text{ Ом/км}$.

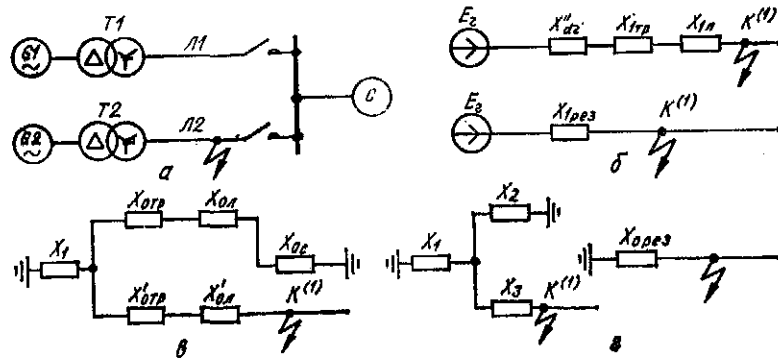


Рис. 7.15. К примеру 7.2

Решение. Составляем схему замещения прямой последовательности. Расчет выполняем в именованных единицах, приведенных к напряжению 330 кВ. Определяем параметры схемы замещения:

$$E_r = \sqrt{(U_{ном} \cos \varphi)^2 + (U_{ном} \sin \varphi + I_{ном} x_d'')^2} = \\ = \sqrt{(1 \cdot 0,85)^2 + (1 \cdot 0,53 + 1 \cdot 0,19)^2} \cdot 347 / \sqrt{3} = 223 \text{ кВ};$$

сопротивления генератора и трансформатора

$$x_{дг}'' = x_d'' U_{ном}^2 / S_{ном} = 0,19 \cdot 347^2 / 235,5 = 97,5 \text{ Ом};$$

$$x_{1тр} = x_{2тр} = x_{0тр} = u_k U_{ном}^2 / (100 S_{ном}) = 11 \cdot 347^2 / (100 \cdot 250) = 53 \text{ Ом};$$

сопротивления одной цепи ЛЭП

$$x_{1л} = x_0 l = 0,308 \cdot 215 = 66,3 \text{ Ом};$$

$$x_{0л} = 3,5 x_{1л} = 3,5 \cdot 66,3 = 288 \text{ Ом.}$$

Рассчитываем результирующее сопротивление схемы замещения прямой последовательности согласно рис. 7.15, б:

$$x_{1рез} = x_{дг}'' + x_{1тр} + x_{1л} = 97,5 + 53 + 66,3 = 216,8 \text{ Ом.}$$

Полагаем, что результирующее сопротивление для токов обратной последовательности

$$x_{2рез} = x_{1рез} = 216,8 \text{ Ом.}$$

Составляем схему замещения нулевой последовательности (рис. 7.15, в), учитывая, что токи нулевой последовательности будут протекать через землю, и приводим ее к элементарному виду (рис. 7.15, г), где

$$x_2 = x_{0c} + x_{0л} + x_{0тр} = 21 + 288 + 53 = 362 \text{ Ом.}$$

Объединяем две параллельные ветви и находим результирующее сопротивление

$$x_{0рез} = x_1 \parallel x_2 + x_3 = x_1 x_2 / (x_1 + x_2) + x_{0л} + x_{0тр} = \\ = 97,5 \cdot 362 / (97,5 + 362) + 288 + 53 = 418 \text{ Ом.}$$

Ток в месте однофазного КЗ в ЛЭП

$$i_{KA}^{(1)} = E_r / (x_{1рез} + x_{2рез} + x_{0рез}) = 223 \cdot 10^3 / (2 \cdot 216,8 + 418) = 262 \text{ А.}$$

Ток нулевой последовательности в неповрежденной ЛЭП

$$i_{0л}^{(1)} = x_{эк} i_{KA}^{(1)} / x_2 = 76,8 \cdot 262 / 362 = 56 \text{ А,}$$

где

$$i_{K0}^{(1)} = i_{KA}^{(1)} = 262 \text{ А.}$$

Пример 7.3. На рис. 7.16, а изображена схема исходной двухцепной ВЛ на железобетонных опорах с проводом $1 \times \text{АС-185}$ и двумя общими точками. Индуктивные сопротивления ВЛ для прямой (обратной) последовательности при работе одной или обеих цепей $x_{10} = 0,382 \text{ Ом/км}$, для нулевой последовательности одной цепи при отключенной и незаземленной другой цепи $x_{00} = 1,43 \text{ Ом/км}$, для нулевой последовательности каждой (одной) цепи при параллельной работе обеих цепей и внешнем КЗ на землю $x_{00}' = 2,414 \text{ Ом/км}$. Определить сверхпереходные токи нулевой последовательности при однофазном КЗ в точке K , находящейся на расстоянии 50 км от шины N . Параметры системы M : $E_{\Phi M} = 66,5 \text{ кВ}$, $x_{1M} = x_{2M} = 12 \text{ Ом}$, $x_{0M} = 16 \text{ Ом}$; параметры системы N : $E_{\Phi N} = 66,5 \text{ кВ}$, $x_{1N} = x_{2N} = 18 \text{ Ом}$, $x_{0N} = 24 \text{ Ом}$.

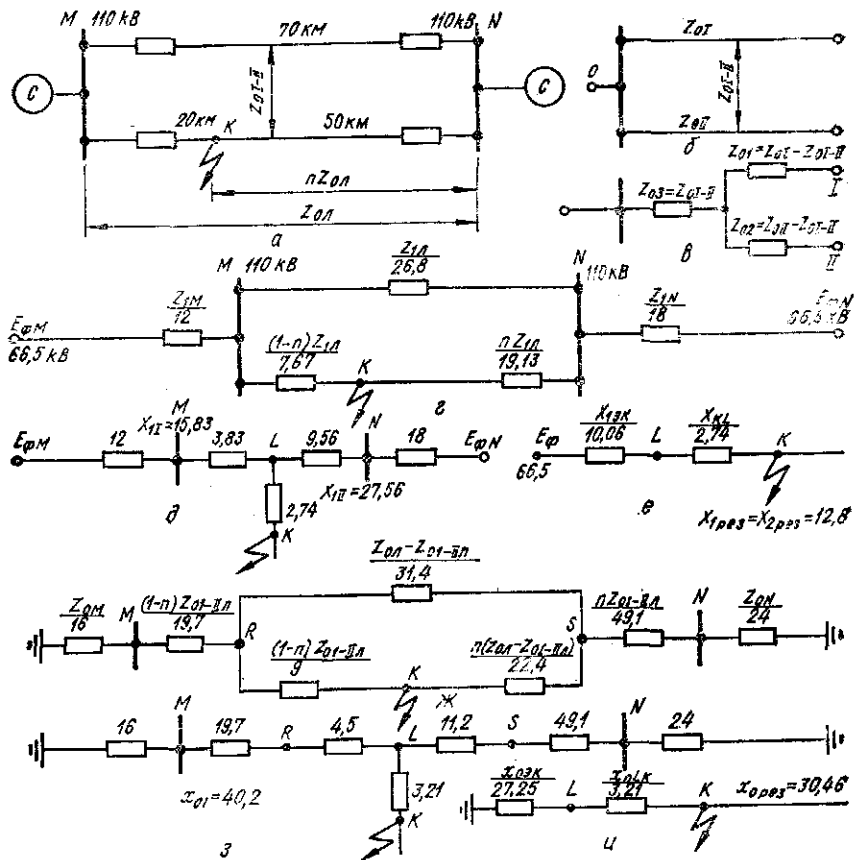


Рис. 7.16. К примеру 7.3

Решение. Расчет выполняем в именованных единицах без учета активных сопротивлений ЛЭП, хотя на рис. 7.16, б — г показаны комплексы полных сопротивлений. Находим сопротивление взаимной индукции параллельных цепей ВЛ

$$x_{01-11} = x_{00} - x_{00} = 2,414 - 1,43 = 0,984 \text{ Ом/км.}$$

Две параллельные линии с общей точкой O на одном конце (см. рис. 7.16, б) с собственными сопротивлениями Z_{01} и Z_{011} каждой линии и сопротивлением взаимной индукции Z_{01-11} между ними можно заменить расчетной эквивалентной схемой нулевой последовательности (см. рис. 7.16, в). Составляем схемы замещения прямой (обратной) и нулевой последовательностей (рис. 7.16, г и ж соответственно) и рассчитываем их параметры:

$$n = l_{NN}/l_{MK} = 50/70 = 0,714;$$

$$x_{1л} = x_{2л} = x_{10} l_{MN} = 0,382 \cdot 70 = 26,8 \text{ Ом;}$$

$$x_{0л} = x_{00} l_{MN} = 1,43 \cdot 70 = 100,2 \text{ Ом;}$$

$$x_{01-11л} = x_{001-11} l_{MN} = 0,984 \cdot 70 = 68,8 \text{ Ом;}$$

$$x_{0л} - x_{01-11л} = 100,2 - 68,8 = 31,4 \text{ Ом;}$$

$$nx_{1л} = 0,714 \cdot 26,8 = 19,13 \text{ Ом;}$$

$$1 - n = 1 - 0,714 = 0,286;$$

$$(1 - n) x_{1л} = 0,286 \cdot 26,8 = 7,67 \text{ Ом;}$$

$$nx_{01-11л} = 0,714 \cdot 68,8 = 49,1 \text{ Ом;}$$

$$(1 - n) x_{01-11л} = 0,286 \cdot 68,8 = 19,7 \text{ Ом;}$$

$$n(x_{0л} - x_{01-11л}) = 0,714 \cdot 31,4 = 22,4 \text{ Ом;}$$

$$(1 - n)(x_{0л} - x_{01-11л}) = 0,286 \cdot 31,4 = 9 \text{ Ом.}$$

Приводим схемы замещения к элементарному виду, для чего треугольник MNK преобразовываем в эквивалентную звезду (рис. 7.16, б):

$$x_{ML} = x_{MN}x_{MK}/(x_{MN} + x_{MK} + x_{KN}) = 26,8 \cdot 7,67/(26,8 + 7,67 + 19,13) = 3,83 \text{ Ом;}$$

$$x_{NL} = x_{NM}x_{NK}/(x_{MN} + x_{MK} + x_{KN}) = 26,8 \cdot 19,13/(26,8 + 7,67 + 19,13) = 9,56 \text{ Ом;}$$

$$x_{KL} = x_{KM}x_{KN}/(x_{KM} + x_{NM} + x_{KN}) = 7,67 \cdot 19,13/(26,8 + 7,67 + 19,13) = 2,74 \text{ Ом.}$$

Объединяем левую и правую ветви до точки L в одну эквивалентную (рис. 7.16, в):

$$x_{1эк} = x_I x_{II}/(x_I + x_{II}) = (12 + 3,83)(18 + 9,56)/(12 + 3,83 + 18 + 9,56) = 10,06 \text{ Ом.}$$

Определяем результирующее сопротивление до точки КЗ:

$$x_{1рез} = x_{2рез} = x_{1эк} + x_{LK} = 10,06 + 2,74 = 12,8 \text{ Ом.}$$

Треугольник KRS в схеме нулевой последовательности (рис. 7.16, ж) преобразовываем в эквивалентную звезду (рис. 7.16, з):

$$x_{RL} = x_{RS}x_{RK}/(x_{RS} + x_{RK} + x_{KS}) = 31,4 \cdot 9/(31,4 + 9 + 22,4) = 4,5 \text{ Ом;}$$

$$x_{LS} = x_{SR}x_{SK}/(x_{RS} + x_{RK} + x_{KS}) = 31,4 \cdot 22,4/(31,4 + 9 + 22,4) = 11,2 \text{ Ом;}$$

$$x_{LK} = x_{KR}x_{KS}/(x_{RS} + x_{RK} + x_{KS}) = 9 \cdot 22,4/(31,4 + 9 + 22,4) = 3,21 \text{ Ом.}$$

Объединяем левую и правую ветви до точки L в одну эквивалентную (рис. 7.16, и):

$$x_{0эк} = x_{0I}x_{0II}/(x_{0I} + x_{0II}) = 40,2 \cdot 84,3/(40,2 + 84,3) = 27,25 \text{ Ом.}$$

Находим результирующее сопротивление до точки КЗ:

$$x_{0рез} = x_{0эк} + x_{LK} = 27,25 + 3,21 = 30,46 \text{ Ом.}$$

Рассчитываем токи всех последовательностей в месте КЗ на землю:

$$i_{KA1}^{(1)} = i_{KA2}^{(1)} = i_{K0}^{(1)} = jE_{\Phi}/[j(2x_{1рез} + x_{0рез})] = 66,5/(2 \cdot 12,8 + 30,46) = 1,187 \text{ кА.}$$

Определяем ток КЗ на землю:

$$i_{KA}^{(1)} = 3i_{KA1}^{(1)} = 3 \cdot 1,187 = 3,561 \text{ кА.}$$

Пример 7.4. В сетях напряжением 110 кВ и выше с заземленной нейтралью для проверки выключателей на отключающую способность расчетным можно считать значение тока однофазного КЗ. Определить ток однофазного КЗ на шине напряжением 550 кВ для схемы СЭС, показанной на рис. 7.17, а. Параметры

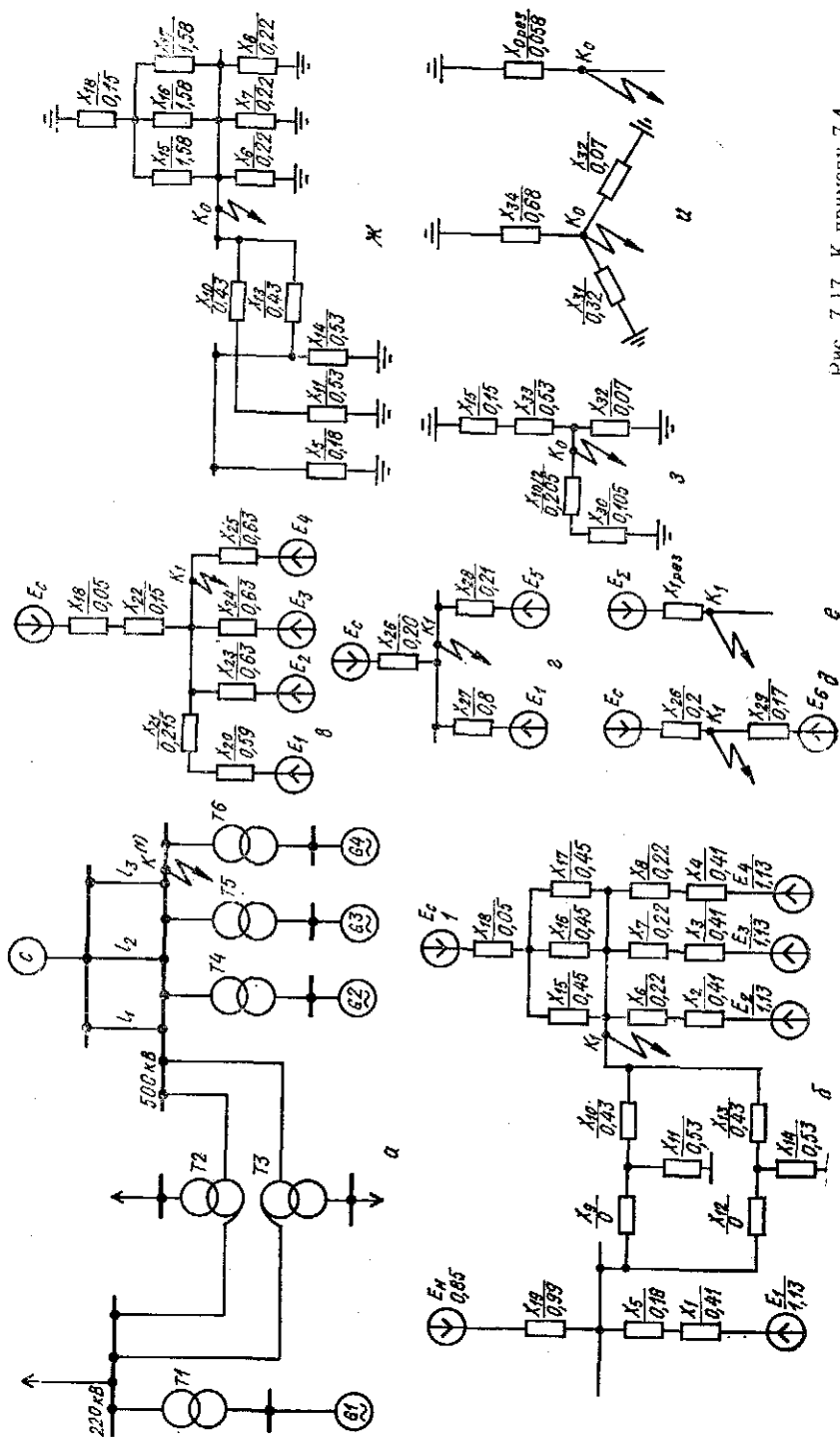


Рис. 7.17. К примеру 7.4

системы: $S_{к.с}^* = 20\,000\text{ МВ} \cdot \text{А}$, $l_1 = l_2 = l_3 = 400\text{ км}$, $x_0 = 0,28\text{ Ом/км}$; параметры генераторов: $P_{ном} = 500\text{ МВт}$, $U_{ном} = 20\text{ кВ}$, $x_d'' = 0,243$, $\cos \varphi = 0,85$; параметры трансформатора $T1$: $S_{ном} = 630\text{ МВ} \cdot \text{А}$, $K_{тр} = 500/20$, $u_k = 11\%$; параметры трансформаторов $T4 - T6$: $S_{ном} = 630\text{ МВ} \cdot \text{А}$, $K_{тр} = 220/20$, $u_k = 14\%$; параметры автотрансформаторов $T2$ и $T3$: $S_{ном} = 250\text{ МВ} \cdot \text{А}$, $K_{тр} = 500/230$, $u_{кВ-Н} = 24\%$, $u_{кВ-С} = 10,5\%$, $u_{кС-Н} = 13\%$; параметры нагрузки: $P_H = 300\text{ МВт}$, $\cos \varphi = 0,85$.

Решение. Составляем схему замещения СЭС (рис. 7.17, б) и определяем ее параметры. Расчет выполняем в относительных единицах, принимая за базисные мощность $S_6 = 1000\text{ МВ} \cdot \text{А}$ и напряжение $U_6 = 500\text{ кВ}$, при которых базисный ток на ступени КЗ

$$I_6 = S_6 / (\sqrt{3} U_6) = 1000 / (\sqrt{3} \cdot 500) = 1,15\text{ кА}.$$

Используя формулы приведения, вычисляем параметры элементов схемы замещения при базисных условиях:

для генераторов

$$x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = x_d'' S_6 / S_{ном} = 0,243 \cdot 1000 \cdot 0,85 / 500 = 0,41;$$

$$E_1 = E_2 = E_3 = E_4 = U + I x_d'' \sin \varphi = 1 + 0,243 \cdot 0,527 = 1,13;$$

для системы в целом

$$x_{18} = S_6 / S_{к.с}^* = 1000 / 20\,000 = 0,05; \quad E_c^* = 1;$$

для обобщенной нагрузки

$$E_H^* = 0,85; \quad x_H'' = 0,35, \text{ при этом } x_{19} = x_H'' S_6 / S_H = 0,35 \cdot 1000 \cdot 0,85 / 300 = 0,99;$$

для двухобмоточных трансформаторов

$$x_5 = u_k S_6 / (100 S_{ном}) = 11 \cdot 1000 / (100 \cdot 630) = 0,175;$$

$$x_6 = x_7 = x_8 = u_k S_6 / (100 S_{ном}) = 14 \cdot 1000 / (100 \cdot 630) = 0,22;$$

для автотрансформаторов

$$x_{10} = x_{13} = 1/200 (24 + 10,5 - 13) \cdot 1000 / 250 = 0,43;$$

$$x_9 = x_{12} = 1/200 (10,5 + 13 - 24) \cdot 1000 / 250 = -0,01 \approx 0;$$

$$x_{11} = x_{14} = 1/200 (24 + 13 - 10,5) \cdot 1000 / 250 = 0,53;$$

для ЛЭП

$$x_{15} = x_{16} = x_{17} = x_0 l S_6 / U_6^2 = 0,28 \cdot 400 \cdot 1000 / 500^2 = 0,45.$$

При расчете токов КЗ на шинах напряжением 500 кВ подпиткой со стороны нагрузки пренебрегаем. Преобразуем схему замещения прямой последовательности (рис. 7.17, б) последовательно в эквивалентные схемы на рис. 7.17, а — д. При этом

$$x_{20} = x_5 + x_1 = 0,18 + 0,41 = 0,59;$$

$$x_{21} = x_{10} / 2 = 0,43 / 2 = 0,215;$$

$$x_{22} = x_{15} / 3 = 0,45 / 3 = 0,15;$$

$$x_{23} = x_{24} = x_{25} = x_6 + x_2 = 0,22 + 0,41 = 0,63;$$

$$x_{26} = x_{18} + x_{22} = 0,05 + 0,15 = 0,2;$$

$$x_{27} = x_{20} + x_{21} = 0,59 + 0,215 = 0,8;$$

$$x_{28} = x_{23} / 3 = 0,63 / 3 = 0,21;$$

$$x_{29} = x_{27} x_{28} / (x_{27} + x_{28}) = 0,8 \cdot 0,21 / (0,8 + 0,21) = 0,17,$$

а результирующие сопротивления прямой последовательности и э. д. с. (рис. 7.17, е)

$$x_{1рез} = x_{20}x_{29}/(x_{28} + x_{29}) = 0,2 \cdot 0,17/(0,2 + 0,17) = 0,09;$$

$$E_{\Sigma} = (1/0,2 + 1,13/0,17)/(1/0,2 + 1/0,17) = 1,07.$$

Схема замещения обратной последовательности подобна схеме замещения прямой последовательности (не имеет источников э. д. с.). При этом $x_{1рез} = x_{2рез}$.

Составляем схему замещения нулевой последовательности (рис. 7.17, ж), учитывая, что

$$x_{отр} = x_{1тр}; \quad x_{0л} = 3,5x_{1л}; \quad x_{0с} = 3x_{1с}.$$

Для определения $x_{0рез}$ схему замещения нулевой последовательности преобразовываем последовательно в эквивалентные схемы на рис. 7.17, в, и с сопротивлениями

$$x_{30} = x_5 \parallel x_{11} \parallel x_{14} = 0,18 \parallel 0,265 \parallel 0,44 = 0,105;$$

$$x_{31} = x_{30} + x_{10}/2 = 0,105 + 0,43/2 = 0,32;$$

$$x_{32} = x_6/3 = 0,22/3 = 0,07;$$

$$x_{33} = x_{15}/3 = 1,58/3 = 0,53;$$

$$x_{34} = x_{33} + x_{18} = 0,53 + 0,15 = 0,68;$$

$$x_{35} = x_{31} \parallel x_{32} = 0,32 \parallel 0,07 = 0,06;$$

$$x_{0рез} = x_{35} \parallel x_{34} = 0,68 \cdot 0,06/(0,68 + 0,06) = 0,058.$$

Находим дополнительное сопротивление для однофазного КЗ:

$$\Delta x^{(1)} = x_{2рез} + x_{0рез} = 0,09 + 0,058 = 0,148.$$

Определяем ток прямой последовательности:

$$I_k^{(1)} = E_{\Sigma}/(x_{1рез} + x_{2рез} + x_{0рез}) I_6 = \\ = 1,05/(0,09 + 0,09 + 0,058) \cdot 1,15 = 5,03 \text{ кА}.$$

Рассчитываем полный ток КЗ:

$$I_k = 3 \cdot 5,03 = 15,09 \text{ кА}.$$

Пример 7.5. Пользуясь расчетными кривыми, определить токи при трех-, двух-, однофазном и двухфазном на землю КЗ в точке М системы (рис. 7.18, а). Все расчеты выполнить в относительных единицах. ЛЭП напряжением 115 кВ — одноцепные, мощность системы С неограниченная. Параметры элементов СЭС указаны в табл. 7.3.

Таблица 7.3. Параметры элементов СЭС

Место установки элементов	Генераторы					Трансформаторы		Реакторы		
	P, МВт	U, кВ	x _{1Г}	x _{2Г}	cos φ	S, МВ·А	и, %	I _{ном} , кА	U _{ном} , кВ	x, %
Станция 1 (К)	100	10,5	0,2	0,25	0,85	120	10,5	—	—	—
— 2 (Т)	25	10,5	0,13	0,15	0,8	15	10,5	1,5	10	10
Подстанция А	—	—	—	—	—	60	10,5	—	—	—
— В	—	—	—	—	—	31,5	10,5	1,5	10	10
— D	—	—	—	—	—	60	10,5	—	—	—
— С	—	—	—	—	—	60	10,5	—	—	—

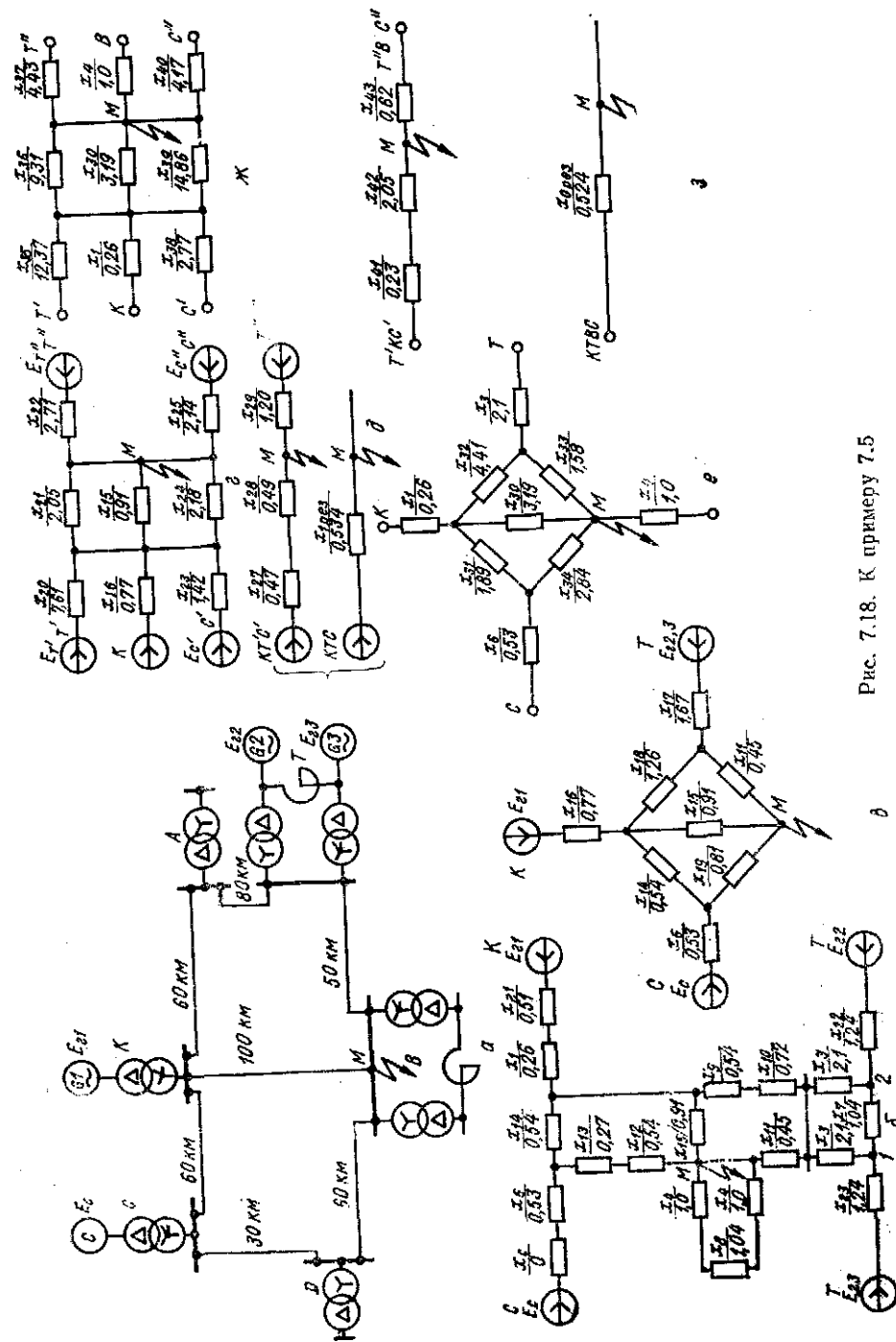


Рис. 7.18. К примеру 7.5

Решение. Выбираем в качестве базисной мощность $S_6 = 300$ МВ · А и приводим к ней параметры элементов СЭС. Для схемы замещения прямой последовательности (рис. 7.18, б) имеем:

сопротивление генератора $G1$

$$x_{r1} = x_{1r} S_6 / S_r = 0,20 \cdot 300 \cdot 0,85 / 100 = 0,51;$$

сопротивления генераторов $G2$ и $G3$

$$x_{r2} = x_{r3} = x_{1r} S_6 / S_r = 0,13 \cdot 300 \cdot 0,80 / 25 = 1,24;$$

сопротивления трансформаторов

$$x_1 = (u/100) S_6 / S_{TP1} = (10,5/100) \cdot 300 / 120 = 0,26;$$

$$x_2 = (u/100) S_6 / S_{TP2} = (10,5/100) \cdot 300 / 60 = 0,53;$$

$$x_3 = (u/100) S_6 / S_{TP3} = (10,5/100) \cdot 300 / 15 = 2,1;$$

$$x_4 = (u/100) S_6 / S_{TP4} = (10,5/100) \cdot 300 / 31,5 = 1;$$

$$x_5 = (u/100) S_6 / S_{TP5} = (10,5/100) \cdot 300 / 60 = 0,53;$$

$$x_6 = (u/100) S_6 / S_{TP6} = (10,5/100) \cdot 300 / 60 = 0,53;$$

сопротивления реакторов

$$x_7 = (x/100) S_6 / (\sqrt{3} I_{ном} U_{ном}) K^2 = \\ = (10/100) \cdot 300 / (\sqrt{3} \cdot 1,5 \cdot 10) (10/10,5)^2 = 1,04;$$

$$x_8 = (x/100) S_6 / (\sqrt{3} I_{ном} U_{ном}) K^2 = \\ = (10/100) \cdot 300 / (\sqrt{3} \cdot 1,5 \cdot 10) (10/10,5)^2 = 1,04;$$

сопротивления ЛЭП (полагаем, что $x_0 = 0,4$ Ом/км)

$$K - A \quad x_9 = x_0 l S_6 / U_{ном}^2 = 0,4 \cdot 60 \cdot 300 / 115^2 = 0,54;$$

$$A - T \quad x_{10} = x_0 l S_6 / U_{ном}^2 = 0,4 \cdot 80 \cdot 300 / 115^2 = 0,72;$$

$$T - B \quad x_{11} = x_0 l S_6 / U_{ном}^2 = 0,4 \cdot 50 \cdot 300 / 115^2 = 0,45;$$

$$B - D \quad x_{12} = x_0 l S_6 / U_{ном}^2 = 0,4 \cdot 60 \cdot 300 / 115^2 = 0,54;$$

$$D - C \quad x_{13} = x_0 l S_6 / U_{ном}^2 = 0,4 \cdot 30 \cdot 300 / 115^2 = 0,27;$$

$$C - K \quad x_{14} = x_0 l S_6 / U_{ном}^2 = 0,4 \cdot 60 \cdot 300 / 115^2 = 0,54;$$

$$K - B \quad x_{15} = x_0 l S_6 / U_{ном}^2 = 0,4 \cdot 100 \cdot 300 / 115^2 = 0,91.$$

Находим токи КЗ на шинах повышенного напряжения подстанции B (точка M). При этом в схеме замещения прямой и обратной последовательностей трансформаторы подстанций A , B и D не входят, поскольку током КЗ указанных последовательностей они не обтекаются.

Выполняем последовательное преобразование схемы замещения в схемы, показанные на рис. 7.18, в — д, где

$$x_{16} = x_{r1} + x_1 = 0,51 + 0,26 = 0,77,$$

а точки 1 и 2 (см. рис. 7.18, б) — точки равных потенциалов, и рассчитываем сопротивления

$$x_{17} = (x_3 + x_{r2})/2 = (2,1 + 1,24)/2 = 1,67;$$

$$x_{18} = x_9 + x_{10} = 0,54 + 0,72 = 1,26;$$

$$x_{19} = x_{12} + x_{13} = 0,54 + 0,27 = 0,81;$$

$$x_{20} = x_{17} + x_{18} + x_{17} x_{18} / x_{17} = 1,67 + 1,26 + 1,67 \cdot 1,26 / 0,45 = 7,61;$$

$$x_{21} = x_{11} + x_{18} + x_{11} x_{18} / x_{17} = 0,45 + 1,26 + 0,45 \cdot 1,26 / 1,67 = 2,05;$$

$$x_{22} = x_{11} + x_{17} + x_{11} x_{17} / x_{18} = 0,45 + 1,67 + 0,45 \cdot 1,67 / 1,26 = 2,71;$$

$$x_{23} = x_6 + x_{14} + x_6 x_{14} / x_{19} = 0,53 + 0,54 + 0,53 \cdot 0,54 / 0,81 = 1,42;$$

$$x_{24} = x_{14} + x_{19} + x_{14} x_{19} / x_6 = 0,54 + 0,81 + 0,54 \cdot 0,81 / 0,53 = 2,18;$$

$$x_{25} = x_6 + x_{19} + x_6 x_{19} / x_{14} = 0,53 + 0,81 + 0,53 \cdot 0,81 / 0,54 = 2,14;$$

$$x_{27} = x_{20} x_{16} x_{23} / (x_{20} x_{16} + x_{16} x_{23} + x_{20} x_{23}) = \\ = 7,61 \cdot 0,77 \cdot 1,42 / (7,61 \cdot 0,77 + 0,77 \cdot 1,42 + 7,61 \cdot 1,42) = 0,47;$$

$$x_{28} = x_{21} x_{15} x_{24} / (x_{21} x_{15} + x_{15} x_{24} + x_{21} x_{24}) = \\ = 2,05 \cdot 0,91 \cdot 2,18 / (2,05 \cdot 0,91 + 0,91 \cdot 2,18 + 2,18 \cdot 2,05) = 0,49;$$

$$x_{29} = x_{22} x_{25} / (x_{22} + x_{25}) = 2,71 \cdot 2,14 / (2,71 + 2,14) = 1,2;$$

$$x_{1рез} = x_{29} (x_{27} + x_{28}) / (x_{29} + x_{27} + x_{28}) = 0,534.$$

Определяем коэффициенты токораспределения в генераторных лучах:

$$c_{T' C'} = (x_{27} + x_{28}) / (x_{27} + x_{28} + x_{29}) = (0,47 + 0,49) / (0,47 + 0,49 + 1,2) = 0,444;$$

$$c_{T' C'} = x_{29} / (x_{27} + x_{28} + x_{29}) = 1,2 / (0,47 + 0,49 + 1,2) = 0,556;$$

$$c_{C''} = c_{T' C'} x_{22} / (x_{25} + x_{22}) = 0,444 \cdot 2,71 / (2,14 + 2,71) = 0,248;$$

$$c_{T''} = c_{T' C'} x_{25} / (x_{25} + x_{22}) = 0,444 \cdot 2,14 / (2,14 + 2,71) = 0,196;$$

$$c_K = c_{K T' C'} x_{27} / x_{16} = 0,556 \cdot 0,47 / 0,77 = 0,339;$$

$$c_T = c_{K T' C'} x_{27} / x_{20} = 0,556 \cdot 0,47 / 7,61 = 0,034;$$

$$c_C = c_{K T' C'} x_{27} / x_{23} = 0,556 \cdot 0,47 / 1,42 = 0,183;$$

$$c_T = c_T + c_{T''} = 0,034 + 0,196 = 0,23;$$

$$c_C = c_C + c_{C''} = 0,183 + 0,248 = 0,431 \approx 0,43;$$

$$c_K = 0,339 \approx 0,34.$$

Поскольку КЗ произошло в удаленной точке, результирующее сопротивление схемы обратной последовательности можно считать равным результирующему сопротивлению схеме прямой последовательности, т. е. $x_{2рез} = x_{1рез} = 0,534$.

Составим схему замещения нулевой последовательности (рис. 7.18, в), в которую входят: трансформаторы подстанции C и станции K , по одному трансформатору станции T и подстанции B , а также все ЛЭП. Трансформаторы представлены в указанной схеме реактивным сопротивлением $x_0 = x_1$, так как обе их обмотки обтекаются током, ЛЭП — реактивным сопротивлением $x_0 = 3,5 x_1$.

Для преобразования схемы нулевой последовательности в схемы, изображенные на рис. 7.18, в — з, определяем сопротивления

$$x_{30} = 3,5 x_{15} = 3,5 \cdot 0,91 = 3,19;$$

$$x_{31} = 3,5 x_{14} = 3,5 \cdot 0,54 = 1,89;$$

$$x_{32} = 3,5 x_{18} = 3,5 \cdot 1,26 = 4,41;$$

$$x_{33} = 3,5 x_{11} = 3,5 \cdot 0,45 = 1,58;$$

$$x_{34} = 3,5 x_{19} = 3,5 \cdot 0,81 = 2,84;$$

$$x_{35} = x_{32} + x_3 + x_{32} x_3 / x_{33} = 4,41 + 2,1 + 4,41 \cdot 2,1 / 1,58 = 12,37;$$

$$x_{36} = x_{32} + x_{33} + x_{32} x_{33} / x_3 = 4,41 + 1,58 + 4,41 \cdot 1,58 / 2,1 = 9,31;$$

$$x_{37} = x_{33} + x_3 + x_{33} x_3 / x_{32} = 1,58 + 2,1 + 1,58 \cdot 2,1 / 4,41 = 4,43;$$

$$x_{38} = x_{31} + x_6 + x_{31} x_6 / x_{34} = 1,89 + 0,53 + 1,89 \cdot 0,53 / 2,84 = 2,77;$$

$$x_{39} = x_{31} + x_{34} + x_{31}x_{34}/x_6 = 1,89 + 2,84 + 1,89 \cdot 2,84/0,53 = 14,86;$$

$$x_{40} = x_{34} + x_6 + x_{34}x_6/x_{31} = 2,84 + 0,53 + 2,84 \cdot 0,53/1,89 = 4,17;$$

$$x_{41} = x_{35}x_{138}/(x_{35}x_{11} + x_{11}x_{38} + x_{38}x_{35}) =$$

$$= 12,37 \cdot 0,26 \cdot 2,77/(12,37 \cdot 0,26 + 0,26 \cdot 2,77 + 2,77 \cdot 12,37) = 0,23;$$

$$x_{42} = x_{36}x_{30}x_{39}/(x_{36}x_{30} + x_{30}x_{39} + x_{36}x_{39}) =$$

$$= 9,31 \cdot 3,19 \cdot 14,86/(9,31 \cdot 3,19 + 3,19 \cdot 14,86 + 14,86 \cdot 9,31) = 2,05;$$

$$x_{43} = x_{37}x_4x_{40}/(x_{37}x_4 + x_4x_{40} + x_{37}x_{40}) =$$

$$= 4,43 \cdot 1 \cdot 4,17/(4,43 \cdot 1 + 1 \cdot 4,17 + 4,17 \cdot 4,43) = 0,68;$$

$$x_{0\text{рез}} = (x_{41} + x_{42})x_{43}/(x_{41} + x_{42} + x_{43}) = (0,23 + 2,05) \cdot 0,68/(0,23 + 2,05 + 0,68) = 0,524.$$

Находим реактивные сопротивления комплексных схем:
при трехфазном КЗ

$$x_{\text{рез}}^{(3)} = x_{1\text{рез}} = 0,534;$$

при двухфазном КЗ

$$x_{\text{рез}}^{(2)} = x_{1\text{рез}} + x_{2\text{рез}} = 0,534 + 0,534 = 1,068;$$

при двухфазном КЗ на землю

$$x_{\text{рез}}^{(1,1)} = x_{1\text{рез}} + x_{0\text{рез}}x_{2\text{рез}}/(x_{0\text{рез}} + x_{2\text{рез}}) =$$

$$= 0,534 + 0,524 \cdot 0,534/(0,524 + 0,534) = 0,798;$$

при однофазном КЗ

$$x_{\text{рез}}^{(1)} = x_{1\text{рез}} + x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}} = 0,534 + 0,534 + 0,524 = 1,592.$$

Пользуясь формулой $x_{\text{расч}} = x_{\text{рез}}^{(3)}/c (S_{\text{ном}}/S_6)$, рассчитываем реактивные сопротивления лучей станций *K*, *T* и системы *C* при трехфазном КЗ:

$$x_{\text{расч}K}^{(3)} = 0,534/0,34 \cdot 117/300 = 0,62;$$

$$x_{\text{расч}T}^{(3)} = 0,534/0,23 \cdot 62,5/300 = 0,48;$$

$$x_{\text{расч}C}^{(3)} = 0,534/0,43 \cdot 300/300 = 1,24.$$

Определяем реактивные сопротивления тех же лучей при двухфазном КЗ

$$x_{\text{расч}K}^{(2)} = 1,068/0,34 \cdot 117,5/300 = 1,24;$$

$$x_{\text{расч}T}^{(2)} = 1,068/0,23 \cdot 62,5/300 = 0,96;$$

$$x_{\text{расч}C}^{(2)} = 1,068/0,43 \cdot 300/300 = 2,46;$$

двухфазном КЗ на землю

$$x_{\text{расч}K}^{(1,1)} = 0,798/0,34 \cdot 117,5/300 = 0,93;$$

$$x_{\text{расч}T}^{(1,1)} = 0,798/0,23 \cdot 62,5/300 = 0,8;$$

$$x_{\text{расч}C}^{(1,1)} = 0,798/0,43 \cdot 300/300 = 1,85$$

и однофазном КЗ

$$x_{\text{расч}K}^{(1)} = 1,592/0,34 \cdot 117,5/300 = 1,35;$$

$$x_{\text{расч}T}^{(1)} = 1,592/0,23 \cdot 62,5/300 = 1,44;$$

$$x_{\text{расч}C}^{(1)} = 1,592/0,43 \cdot 300/300 = 3,7.$$

По формуле $I_{\text{ном}} = S_{\text{ном,рез}}/(\sqrt{3}U_{\text{ном}})$ находим (в килоамперах) номинальные токи лучей, отнесенные к напряжению в месте КЗ:

$$I_{\text{ном}K} = 117,5/(\sqrt{3} \cdot 115) = 0,592;$$

$$I_{\text{ном}T} = 62,5/(\sqrt{3} \cdot 115) = 0,314;$$

$$I_{\text{ном}C} = 300/(\sqrt{3} \cdot 115) = 1,510.$$

По расчетным кривым для $t = 0; 0,2$ с и ∞ определяем относительные токи прямой последовательности. Токи в луче *K* находим по расчетным кривым для гидрогенераторов с АРВ, в луче *T* — по таким же кривым для турбогенераторов с АРВ. Мощность системы *C* неограничена, поэтому $E_c = U_c$ и $x_c = 0$.

Рассчитываем э. д. с. системы в относительных единицах:

$$E_c = (U_c/U_6) U_6/U_0 = 1;$$

ток в относительных единицах для луча *C* при всех t

$$I_c = E_c/x_{\text{расч}C} = 1/1,24 = 0,81;$$

действительные токи лучей *K* и *T*

$$I^{(n)} = I_{*1} m^{(n)} I_{\text{ном}},$$

где $m^{(3)} = 1; m^{(2)} = \sqrt{3}; m^{(1)} = 3; m^{(1,1)} = \sqrt{3}/(x_{2\text{рез}} +$

$$+ x_{0\text{рез}}) \sqrt{x_{2\text{рез}}^2 + x_{2\text{рез}}x_{0\text{рез}} + x_{0\text{рез}}^2} =$$

$$= \sqrt{3}/(0,534 + 0,524) \sqrt{0,534^2 + 0,534 \cdot 0,524 + 0,524^2} = 1,5;$$

ударный ток КЗ

$$I_y = k_y \sqrt{2} I^{(n)}.$$

Последующие результаты расчета токов КЗ сводим в табл. 7.4.

Таблица 7.4. Результаты расчета токов КЗ в точке *M*

Вид КЗ	Лучи	$I_{\text{л}}$, кА	$x_{\text{расч}}^{(n)}$	Относительные токи прямой последовательности			$m^{(n)}$	Действительные токи лучей, кА		
				I_{*1}	$I_{*1}^{t=0,2c}$	$I_{*1}^{t=\infty}$		I^*	$I_{0,2}$	I_{∞}
$K^{(3)}$	<i>K</i>	0,592	0,62	1,70	1,50	1,87	1	1,01	0,89	1,11
	<i>T</i>	0,314	0,48	2,10	1,85	1,90		0,66	0,58	0,60
	<i>C</i>	1,510	1,24	0,81	0,81	0,81		1,22	1,22	1,22
Суммарный ток								2,89	2,69	2,93
$K^{(2)}$	<i>K</i>	0,592	1,24	0,84	0,78	0,97	$\sqrt{3}$	0,86	0,80	0,99
	<i>T</i>	0,314	0,96	1,05	0,95	1,18		0,57	0,52	0,64
	<i>C</i>	1,510	2,46	0,41	0,41	0,41		1,08	1,08	1,08
Суммарный ток								2,51	2,40	2,71
$K^{(1)}$	<i>K</i>	0,592	1,35	0,59	0,56	0,62	3	1,05	1,00	1,10
	<i>T</i>	0,314	1,44	0,76	0,64	0,76		0,72	0,60	0,72
	<i>C</i>	1,510	3,70	0,27	0,27	0,27		1,23	1,23	1,23
Суммарный ток								3,00	2,83	3,05
$K^{(1,1)}$	<i>K</i>	0,592	0,93	1,20	1,10	1,39	1,5	1,07	0,98	1,23
	<i>T</i>	0,314	0,80	1,25	1,15	1,36		0,59	0,54	0,64
	<i>C</i>	1,510	1,85	0,54	0,54	0,54		1,22	1,22	1,22
Суммарный ток								2,88	2,74	3,09

Контрольные вопросы

1. Что такое поперечная несимметрия?
2. Каковы граничные условия для всех видов КЗ?
3. Какое различие между схемами прямой, обратной и нулевой последовательностей?
4. Как определить токи и напряжения при однофазном КЗ?
5. Какой вид имеют векторные диаграммы токов и напряжений при однофазном КЗ?
6. Как определить токи и напряжения при двухфазном КЗ?
7. Какой вид имеют векторные диаграммы токов и напряжений при двухфазном КЗ?
8. Как определить токи и напряжения при двухфазном КЗ на землю?
9. Какой вид имеют векторные диаграммы токов и напряжений при двухфазном КЗ на землю?
10. Что такое коэффициент взаимосвязи токов? Каково его значение для определения различных видов КЗ?
11. В чем заключается правило эквивалентности прямой последовательности?
12. Что представляют собой комплексные схемы замещения?
13. Какой вид имеют соотношения между дополнительными реактивными сопротивлениями (токами, напряжениями) при различных видах КЗ?
14. В каких практических случаях возникают наибольшие (наименьшие) значения кратности токов несимметричных КЗ?
15. Как деформируются векторные диаграммы токов и напряжений при разных видах КЗ по мере удаления от места КЗ и при переходе через трансформатор?
16. Как определяются токи несимметричных КЗ по расчетным кривым?

Темы рефератов

1. Расчет несимметричных КЗ (одно-, двухфазного и двухфазного на землю) с помощью симметричных составляющих.
2. Схемы замещения нулевой последовательности параллельных ЛЭП.
3. Основные расчетные соотношения при КЗ в одной точке и векторные диаграммы токов и напряжений.
4. Комплексные схемы замещения для всех видов несимметричных КЗ. Примеры построения схем.
5. Токи и напряжения с двух сторон трансформатора, включенного по схеме γ/Δ -11; расчетные соотношения и векторные диаграммы.

Глава 8

ПРОДОЛЬНАЯ НЕСИММЕТРИЯ И СЛОЖНЫЕ ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ

8.1. Общие сведения

Конечной целью анализа нарушений продольной несимметрии и сложных видов повреждений является расчет значений токов и напряжений в ветвях повреждений и в заданных точках СЭС. Расчет этот необходим для выбора элементов СЭС, релейной защиты, а также анализа работы устройств системной автоматики.

Для формализации анализа продольную несимметрию представляют как включение в каждую фазу электрической системы неодинаковых сопротивлений. При этом исходят из следующих условий, рассматривая только основную гармонику режима:

включение сопротивления в фазу при неизменной э. д. с. источника питания тождественно шунтированию таких же сопротивлений в других фазах;

шунтирование сопротивления в фазе тождественно включению такого же сопротивления, но с противоположным знаком;

разрыв фазы тождествен включению в месте разрыва источника напряжения, равного падению напряжения на концах разорванной фазы.

Как и для поперечной несимметрии, при расчете продольной несимметрии эффективным является применение метода симметричных составляющих, в соответствии с которым расчетные соотношения можно выразить через симметричные составляющие тока и напряжения фазы A , принятой за основную:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_{LA} &= \Delta \dot{U}_{LA1} + \Delta \dot{U}_{LA2} + \Delta \dot{U}_{LA0}; \\ \Delta \dot{U}_{LB} &= a^2 \Delta \dot{U}_{LA1} + a \Delta \dot{U}_{LA2} + \Delta \dot{U}_{LA0}; \\ \Delta \dot{U}_{LG} &= a \Delta \dot{U}_{LA1} + a^2 \Delta \dot{U}_{LA2} + \Delta \dot{U}_{LA0} \end{aligned} \right\} \quad (8.1)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{LA} &= \dot{I}_{LA1} + \dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{LA0}; \\ \dot{I}_{LB} &= a^2 \dot{I}_{LA1} + a \dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{LA0}; \\ \dot{I}_{LC} &= a \dot{I}_{LA1} + a^2 \dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{LA0}, \end{aligned} \right\} \quad (8.2)$$

где \dot{I}_{LA} , \dot{I}_{LB} , \dot{I}_{LC} и $\Delta \dot{U}_{LA}$, $\Delta \dot{U}_{LB}$, $\Delta \dot{U}_{LC}$ — токи и падения напряжения для несимметричной системы фазных величин A , B , C ; \dot{I}_{LA1} , \dot{I}_{LA2} , \dot{I}_{LA0} и $\Delta \dot{U}_{LA1}$, $\Delta \dot{U}_{LA2}$, $\Delta \dot{U}_{LA0}$ — симметричные составляющие токов и падений напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Токи определенных последовательностей вызывают падения напряжения соответствующих последовательностей. Эта взаимосвязь их описывается системой независимых уравнений

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_{LA1} &= E_{A\Sigma} - z_{1\text{рез}} \dot{I}_{LA1}; \\ \Delta \dot{U}_{LA2} &= -z_{2\text{рез}} \dot{I}_{LA2}; \\ \Delta \dot{U}_{LA0} &= -z_{0\text{рез}} \dot{I}_{LA0}, \end{aligned} \right\} \quad (8.3)$$

где $E_{A\Sigma}$ — суммарная э. д. с. источников питания, действующая только в схеме прямой последовательности; $z_{1\text{рез}}$, $z_{2\text{рез}}$, $z_{0\text{рез}}$ — результирующие сопротивления отдельных последовательностей относительно места нарушения продольной симметрии.

Таким образом, как и при поперечной несимметрии, методика получения расчетных соотношений основывается на решении системы уравнений (8.1) — (8.3) с учетом граничных условий, характеризующих несимметрию. Цель решения состоит в записи

уравнений связи несимметричных фазных величин с их симметричными составляющими.

Реальная схема электрической сети с однократной продольной несимметрией (разрыв одной либо двух фаз, включение неодинаковых сопротивлений) приводится к схемам замещения без разрыва. Это достигается введением в месте повреждения источника продольного напряжения, имеющего значение, равное падению напряжения в месте продольной несимметрии. Полученная схема замещения пригодна для анализа с использованием аналитических методов теории электрических цепей.

Для выделенной основной фазы, как и в случае поперечной несимметрии, составляют схемы замещения отдельных последовательностей. На основе их анализа находят расчетные соотношения для синтеза комплексной схемы замещения конкретного вида продольной несимметрии. По комплексной схеме замещения основной фазы определяют токи и напряжения в любой точке электрической сети.

В электрической системе могут возникать одновременно поперечная и продольная несимметрии в разных комбинациях, которые приводят к сложным видам повреждений. Причинами появления таких повреждений в СЭС могут быть наложения как аварийных режимов, так и аварийного режима с процессом его отключения (например, неодновременное отключение несимметричного КЗ выключателями в сети с двусторонним питанием, появление несимметричных КЗ в нескольких точках электрической сети, обрыв фазы с замыканием на землю одного из концов оборванного провода и т. п.).

В случае повреждений сложных видов последовательность вычислительных операций повторяется по каждой точке нарушения продольной симметрии. С помощью симметричных составляющих каждая такая точка характеризуется тремя симметричными составляющими тока и тремя симметричными составляющими напряжения. Поэтому при двукратной несимметрии необходимо определить 12 неизвестных симметричных составляющих, для нахождения которых следует записать столько же независимых уравнений. Исходя из граничных условий, для каждого места нарушения симметрии трехфазной системы можно получить по три уравнения связи симметричных составляющих тока и напряжения.

Однократная продольная несимметрия в трехфазной системе может быть следствием неодновременной пофазной коммутации, разрыва фаз, пофазного различия нагрузки и т. п. Так, продольная несимметрия возникает при неодновременном размыкании контактов коммутационного аппарата (неодновременно появляется дуга отключаемого тока между контактами разных фаз), перегорании предохранителей в одной или двух фазах, несинхронном включении синхронных машин, аварийном отключении фаз ЛЭП.

8.2. Разрыв одной фазы трехфазной цепи

При разрыве одной фазы трехфазной цепи (рис. 8.1) возникает несимметричный режим, характеризующийся следующими граничными условиями:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{LA} &= 0; \\ \Delta \dot{U}_{LB} &= 0; \\ \Delta \dot{U}_{LC} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (8.4)$$

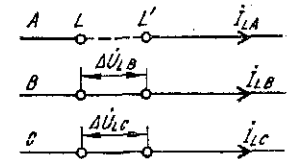


Рис. 8.1. Трехфазная цепь с разрывом фазы А в месте $L - L'$

Для анализа рассматриваемого аварийного режима в разрыв фазы вводят источник продольного напряжения $\Delta \dot{U}_{LA}$ (рис. 8.2, а) и составляют схемы замещения отдельных последовательностей (рис. 8.2, б—г).

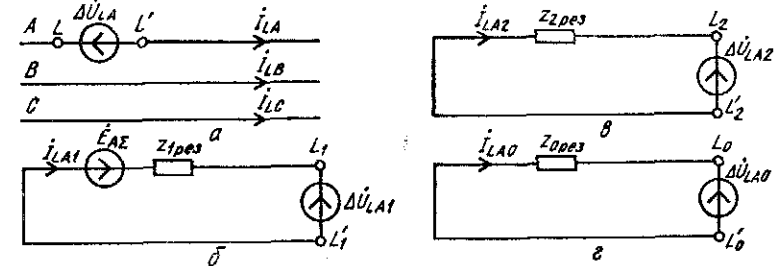


Рис. 8.2. Исходная схема для анализа нарушения продольной симметрии при разрыве фазы А в месте $L - L'$ (а) и схемы замещения прямой (б), обратной (в) и нулевой (г) последовательностей

Из сравнения падений напряжений для неповрежденных фаз, выраженных через симметричные составляющие, следует

$$a^2 \Delta \dot{U}_{LA1} + a \Delta \dot{U}_{LA2} + \Delta \dot{U}_{LA0} = a \Delta \dot{U}_{LA1} + a^2 \Delta \dot{U}_{LA2} + \Delta \dot{U}_{LA0} \Rightarrow \Delta \dot{U}_{LA1} = \Delta \dot{U}_{LA2};$$

$$\Delta \dot{U}_{LB} = (a^2 + a) \Delta \dot{U}_{LA1} + \Delta \dot{U}_{LA0} = -\Delta \dot{U}_{LA1} + \Delta \dot{U}_{LA0} = 0 \Rightarrow \Delta \dot{U}_{LA1} = \Delta \dot{U}_{LA0}.$$

Таким образом, на основе симметричных составляющих граничные условия (8.4) могут быть записаны в виде

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \Delta \dot{U}_{LA2} = \Delta \dot{U}_{LA0} = \Delta \dot{U}_{LA}/3; \quad (8.5)$$

$$\dot{I}_{LA1} = -(\dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{LA0}). \quad (8.6)$$

По этим уравнениям может быть синтезирована комплексная схема замещения

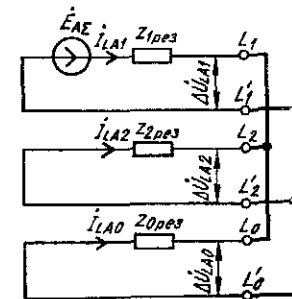


Рис. 8.3. Комплексная схема замещения нарушения продольной симметрии при разрыве фазы А

рассматриваемого нарушения продольной симметрии (рис. 8.3). По ней составляют расчетные выражения для определения тока прямой последовательности

$$I_{LA1} = \dot{E}_{A\Sigma} / (z_{1\text{pez}} + z_{LL1}) \quad (8.7)$$

и падения напряжения прямой последовательности в месте разрыва

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = I_{LA1} z_{LL1}, \quad (8.8)$$

где $z_{LL1} = z_{2\text{pez}} z_{0\text{pez}} / (z_{2\text{pez}} + z_{0\text{pez}})$ — дополнительное сопротивление, вносимое в схему замещения прямой последовательности относительно зажимов $L_1 - L'$ ветвями схем замещения обратной и нулевой последовательностей (см. рис. 8.3).

С учетом (8.5), а также второго и третьего уравнений (8.3) токи обратной и нулевой последовательностей, протекающие в других ветвях комплексной схемы замещения (см. рис. 8.3), определяются выражениями

$$I_{LA2} = -I_{LA1} z_{0\text{pez}} / (z_{2\text{pez}} + z_{0\text{pez}}) = -I_{LA1} z_{LL1} / z_{2\text{pez}}; \quad (8.9)$$

$$I_{LA0} = -I_{LA1} z_{2\text{pez}} / (z_{2\text{pez}} + z_{0\text{pez}}) = -I_{LA1} z_{LL1} / z_{0\text{pez}}. \quad (8.10)$$

Токи обратной и нулевой последовательностей могут быть выражены через показатели комплексной схемы замещения следующим образом:

$$I_{LA2} = -\dot{E}_{A\Sigma} z_{LL1} / (z_{2\text{pez}} (z_{1\text{pez}} + z_{LL1})); \quad (8.11)$$

$$I_{LA0} = -\dot{E}_{A\Sigma} z_{LL1} / (z_{0\text{pez}} (z_{1\text{pez}} + z_{LL1})). \quad (8.12)$$

В соответствии с (8.5) и (8.3) напряжение источника продольного напряжения, включаемого в месте повреждения, определяется выражением

$$\Delta \dot{U}_{LA} = 3\dot{E}_{A\Sigma} z_{LL1} / (z_{1\text{pez}} + z_{LL1}). \quad (8.13)$$

Полученные расчетные соотношения (8.5) — (8.13) представляют собой уравнения связи симметричных составляющих параметров режима особой фазы. Токи и напряжения других фаз выражаются через оператор фазы с использованием уравнений (8.1) и (8.2). Напряжения в любой точке сети определяются по расчетным выражениям токов (8.7), (8.11) и (8.12) с использованием преобразований комплексной схемы замещения (см. рис. 8.3) относительно рассматриваемой точки сети для вычисления сопротивлений связи данной точки с источником питания.

8.3. Разрыв двух фаз трехфазной цепи

Разрыв двух фаз трехфазной цепи (рис. 8.4, а) характеризуется следующими граничными условиями:

$$\left. \begin{aligned} I_{LB} &= 0; \\ I_{LC} &= 0; \\ \Delta \dot{U}_{LA} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (8.14)$$

По аналогии с разрывом одной фазы включаем в местах разрыва фаз B и C источники продольного напряжения $\Delta \dot{U}_{LB}$ и $\Delta \dot{U}_{LC}$ (рис. 8.4, б). Полученная таким образом расчетная схема позволяет составить комплексную схему замещения (рис. 8.5). Приняв в качестве основной неповрежденную фазу A , граничные условия (8.14), выраженные через симметричные составляющие, можно записать в следующем виде:

$$I_{LB} = a^2 I_{LA1} + a I_{LA2} + I_{LA0}; \quad (8.15)$$

$$I_{LC} = a I_{LA1} + a^2 I_{LA2} + I_{LA0}. \quad (8.16)$$

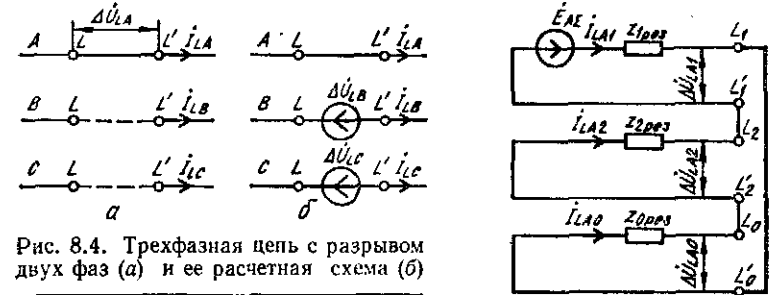


Рис. 8.4. Трехфазная цепь с разрывом двух фаз (а) и ее расчетная схема (б)

Рис. 8.5. Комплексная схема замещения нарушения продольной симметрии при разрыве фаз B и C

Из разности полученных уравнений следует, что

$$I_{LA1} = I_{LA2}. \quad (8.17)$$

После подстановки тождества (8.17) в уравнения (8.15), (8.16) и соответствующих преобразований получим равенство

$$I_{LA1} = I_{LA2} = I_{LA0} = I_{LA} / 3. \quad (8.18)$$

Разложение граничного условия $\Delta \dot{U}_{LA} = 0$ на симметричные составляющие позволяет записать равенство

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = -(\Delta \dot{U}_{LA2} + \Delta \dot{U}_{LA0}), \quad (8.19)$$

которое вместе с равенством (8.18) характеризует граничные условия данного вида повреждения на основе симметричных составляющих, отнесенных к фазе A .

Синтезированная по (8.18) и (8.19) комплексная схема замещения фазы A изображена на рис. 8.5. По ней определяем симметричные составляющие токов

$$I_{LA1} = I_{LA2} = I_{LA0} = \dot{E}_{A\Sigma} / (z_{1\text{pez}} + z_{2\text{pez}} + z_{0\text{pez}}). \quad (8.20)$$

Падения напряжения обратной и нулевой последовательностей находим из уравнения (8.3). При этом напряжение прямой последовательности определяется выражением

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \dot{E}_{A\Sigma} (z_{2\text{pez}} + z_{0\text{pez}}) / (z_{1\text{pez}} + z_{2\text{pez}} + z_{0\text{pez}}). \quad (8.21)$$

По симметричным составляющим параметров режима фазы *A* на основании уравнений (8.1) — (8.3) можно рассчитать токи и напряжения как в месте повреждения, так и в любой точке цепи. В последнем случае необходимо преобразовать комплексную схему замещения (см. рис. 8.5) относительно рассматриваемой точки. На рис. 8.5 схема замещения представлена относительно места повреждения.

8.4. Включение в фазы неодинаковых сопротивлений

В СЭС продольная несимметрия может возникать при включении сопротивлений в одну или в две фазы (рис. 8.6).

Включение сопротивления *z* в одну фазу трехфазной цепи характеризуется следующими граничными условиями:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_{LA} &= I_{LA} z; \\ \Delta \dot{U}_{LB} &= 0; \\ \Delta \dot{U}_{LC} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (8.22)$$

При рассмотрении этого несимметричного режима используем тот же прием, что и в п. 8.2, введя в фазу вместо сопротивления *z* источник продольного напряжения $\Delta \dot{U}_{LA}$ (рис. 8.6, *a*). При $z \rightarrow \infty$ граничные условия (8.22) вырождаются в частный случай граничных условий разрыва фазы (8.4), так как

$$I_{LA} = \Delta \dot{U}_{LA} / z |_{z \rightarrow \infty} = 0. \quad (8.23)$$

Анализ несимметричного режима при $z \neq \infty$ становится более общим.

При разложении граничных условий (8.22) на симметричные составляющие, отнесенные к особой фазе *A*, остается действительным ранее полученное тождество (8.5) и, кроме того,

$$\Delta \dot{U}_{LA} = (I_{LA1} + I_{LA2} + I_{LA0}) z. \quad (8.24)$$

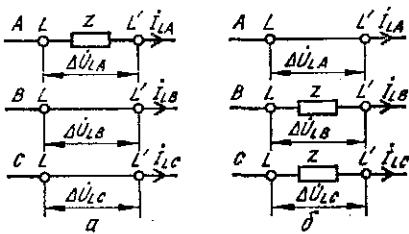
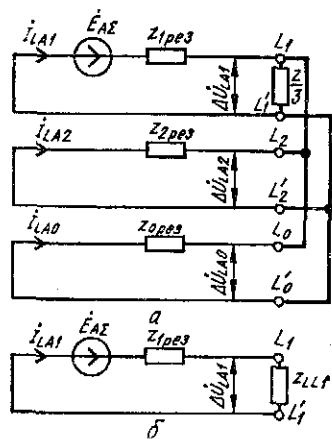


Рис. 8.6. Нарушение продольной симметрии при включении сопротивлений в одну (*a*) и две (*b*) фазы

Рис. 8.7. Комплексная схема замещения основной фазы *A* (*a*) и ее эквивалентное преобразование (*b*) для случая нарушения продольной симметрии при включении сопротивления *z* в фазу *A*



Из совместного преобразования (8.3), (8.5) и (8.24) получаем выражения для синтезирования комплексной схемы замещения (рис. 8.7, *a*):

$$I_{LA1} = (\dot{E}_{A\Sigma} - \Delta \dot{U}_{LA1}) z_{1pez}; \quad (8.25)$$

$$I_{LA1} = \Delta \dot{U}_{LA1} (3/z + 1/z_{2pez} + 1/z_{0pez}). \quad (8.26)$$

Для определения тока прямой последовательности преобразуем комплексную схему замещения к виду, показанному на рис. 8.7, *b*, где на основании (8.26) дополнительное сопротивление, включаемое в месте несимметрии,

$$z_{LL1} = 1/(3/z + 1/z_{2pez} + 1/z_{0pez}). \quad (8.27)$$

Из выражения (8.27) при $z \rightarrow \infty$ следует выражение (8.8), относящееся к случаю разрыва фазы.

Симметричные составляющие тока и напряжения, выраженные через сопротивление z_{LL1} , могут быть найдены соответственно по (8.7), (8.11), (8.12) и (8.3), (8.5). Зная симметричные составляющие особой фазы *A*, можно определить параметры всех фаз трехфазной системы в месте ее повреждения, как и в ранее рассмотренных случаях.

Включение в две фазы трехфазной системы сопротивлений *z* характеризуется следующими граничными условиями (см. рис. 8.6, *b*):

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_{LA} &= 0; \\ \Delta \dot{U}_{LB} &= I_{LB} z; \\ \Delta \dot{U}_{LC} &= I_{LC} z. \end{aligned} \right\} \quad (8.28)$$

Выполнив переход к симметричным составляющим основной фазы *A*, уравнения системы (8.28) можно записать в следующем виде:

$$\Delta \dot{U}_{LA1} + \Delta \dot{U}_{LA2} + \Delta \dot{U}_{LA0} = 0; \quad (8.29)$$

$$a^2 \Delta \dot{U}_{LA1} + a \Delta \dot{U}_{LA2} + \Delta \dot{U}_{LA0} = (a^2 I_{LA1} + a I_{LA2} + I_{LA0}) z; \quad (8.30)$$

$$a \Delta \dot{U}_{LA1} + a^2 \Delta \dot{U}_{LA2} + \Delta \dot{U}_{LA0} = (a I_{LA1} + a^2 I_{LA2} + I_{LA0}) z. \quad (8.31)$$

Их решение относительно падений напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей дает

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_{LA1} &= (2I_{LA1} - I_{LA2} - I_{LA0}) z/3; \\ \Delta \dot{U}_{LA2} &= (-I_{LA1} + 2I_{LA2} - I_{LA0}) z/3; \\ \Delta \dot{U}_{LA0} &= (-I_{LA1} - I_{LA2} + 2I_{LA0}) z/3. \end{aligned} \right\} \quad (8.32)$$

Таким образом, симметричные составляющие фазных величин фазы *A* могут быть представлены системами уравнений (8.3) и (8.32).

После преобразований относительно симметричных составляющих тока фазы *A* уравнения (8.3) и (8.32) принимают следующий

вид:

$$\left. \begin{aligned} I_{LA1}(2 + 3z_{1\text{pec}}/z) - I_{LA2} - I_{LA0} &= 3\dot{E}_{A\Sigma}/z; \\ -I_{LA1} + I_{LA2}(2 + 3z_{2\text{pec}}/z) - I_{LA0} &= 0; \\ -I_{LA1} - I_{LA2} + I_{LA0}(2 + 3z_{0\text{pec}}/z) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (8.33)$$

Решив систему уравнений (8.33), получим выражения для определения токов прямой, обратной и нулевой последовательностей:

$$\left. \begin{aligned} I_{LA1} &= \dot{E}_{A\Sigma}/(z_{1\text{pec}} + z_{LL1}); \\ I_{LA2} &= \dot{E}_{A\Sigma}(z - z_{LL1})/(z_{1\text{pec}} + z_{LL1})(z + z_{2\text{pec}}); \\ I_{LA0} &= \dot{E}_{A\Sigma}(z - z_{LL1})/(z_{1\text{pec}} + z_{LL1})(z + z_{0\text{pec}}), \end{aligned} \right\} \quad (8.34)$$

где дополнительное сопротивление в схеме прямой последовательности, включаемое в месте несимметрии, определяется выражением

$$z_{LL1} = z \left(\frac{z z_{2\text{pec}}}{z + z_{2\text{pec}}} + \frac{z z_{0\text{pec}}}{z + z_{0\text{pec}}} \right) / \left(z + \frac{z z_{2\text{pec}}}{z + z_{2\text{pec}}} + \frac{z z_{0\text{pec}}}{z + z_{0\text{pec}}} \right). \quad (8.35)$$

С учетом систем уравнений (8.34) и (8.3) падения напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей можно рассчитать по формулам

$$\left. \begin{aligned} \Delta\dot{U}_{LA1} &= \dot{E}_{A\Sigma} z_{LL1}/(z_{1\text{pec}} + z_{LL1}); \\ \Delta\dot{U}_{LA2} &= -\dot{E}_{A\Sigma}(z - z_{LL1}) z_{2\text{pec}} / ((z_{1\text{pec}} + z_{LL1})(z + z_{2\text{pec}})); \\ \Delta\dot{U}_{LA0} &= -\dot{E}_{A\Sigma}(z - z_{LL1}) z_{0\text{pec}} / ((z_{1\text{pec}} + z_{LL1})(z + z_{0\text{pec}})). \end{aligned} \right\} \quad (8.36)$$

Проверка правильности полученных выражений заключается в оценке тождественности суммы уравнений (8.36) и первого уравнения граничных условий (8.28).

Комплексную схему замещения основной фазы при включении в две фазы системы сопротивлений z (рис. 8.8) можно составить на основе выражения, полученного суммированием выражения (8.35) и уравнений (8.3):

$$\dot{E}_{A\Sigma} = I_{LA1} z_{1\text{pec}} + I_{LA2} z_{2\text{pec}} + I_{LA0} z_{0\text{pec}}. \quad (8.37)$$

С помощью этой схемы могут быть определены симметричные составляющие фазных величин фазы A в месте повреждения и в любой точке системы. Токи и напряжения других фаз определяются уравнениями (8.1) и (8.2).

Как видно, аналитический анализ каждого вида однократной продольной

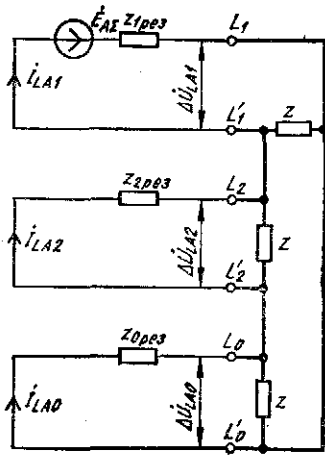


Рис. 8.8. Комплексная схема замещения основной фазы A для случая нарушения продольной симметрии при включении сопротивлений z в фазы B и C

несимметрии сводится к получению расчетных соотношений между фазными величинами и их симметричными составляющими, а также к синтезу на их основе комплексной схемы замещения основной фазы. Комплексная схема замещения используется (в случае необходимости) при дальнейшем анализе с применением расчетных моделей и аналоговых вычислительных машин.

8.5. Двойное замыкание на землю

Двойное замыкание на землю относится к сложным видам повреждений, которые представляют собой совокупность нарушений поперечной и продольной симметрии отдельных участков электрической системы. При этом нарушения могут возникать в различные моменты времени, в разных сочетаниях и местах.

Для решения вопросов проектирования и эксплуатации СЭС промышленных предприятий практический интерес представляет анализ нарушений симметрии в двух точках трехфазной системы (*двукратная несимметрия*): двойное замыкание на землю в трехфазной системе с изолированной нейтралью и однофазное КЗ на землю с разрывом этой же фазы в системе с заземленной нейтралью.

Поскольку каждая точка нарушения симметрии характеризуется тремя симметричными составляющими тока и тремя симметричными составляющими напряжения, при двукратной несимметрии необходимо определить 12 неизвестных симметричных составляющих, для нахождения которых следует составить столько же независимых уравнений.

Исходя из граничных условий, по каждому месту нарушения симметрии трехфазной системы, как и в предыдущих параграфах, можно составить по три уравнения связи симметричных составляющих тока и напряжения различных последовательностей, а исходя из схем замещения каждой последовательности, записать уравнения, которые связывают соответственно симметричные составляющие тока и напряжения одноименной последовательности.

Решение системы 12 уравнений может быть выполнено аналитическими методами, моделированием и с использованием средств вычислительной техники. Последние более предпочтительны, так как позволяют осуществить анализ и рассчитать параметры несимметричного режима не только в точке нарушения симметрии, но и в любой точке электрической сети. На цифровых ЭВМ решение системы уравнений выполняется в матричном представлении по стандартным программам их математического обеспечения. При анализе решения с помощью аналоговых ЭВМ необходимо составить комплексную схему замещения каждого конкретного вида двукратной несимметрии.

В случае неоднократного нарушения симметрии составление комплексной схемы замещения объединением схем замещения отдельных последовательностей только с помощью электрических связей неприемлемо из-за возможного нарушения токораспределения в схеме. Поэтому схемы замещения отдельных последовательностей

объединяют в единую электрически связанную схему замещения лишь по одной точке нарушения симметрии. По другой точке несимметрии схемы замещения отдельных последовательностей соединяют в комплексную схему замещения через промежуточные трансформаторы.

При составлении комплексных схем замещения с использованием промежуточных трансформаторов, чтобы не нарушить граничные условия, особые фазы каждого места нарушения симметрии нужно согласовывать выбором коэффициентов трансформации и соответ-

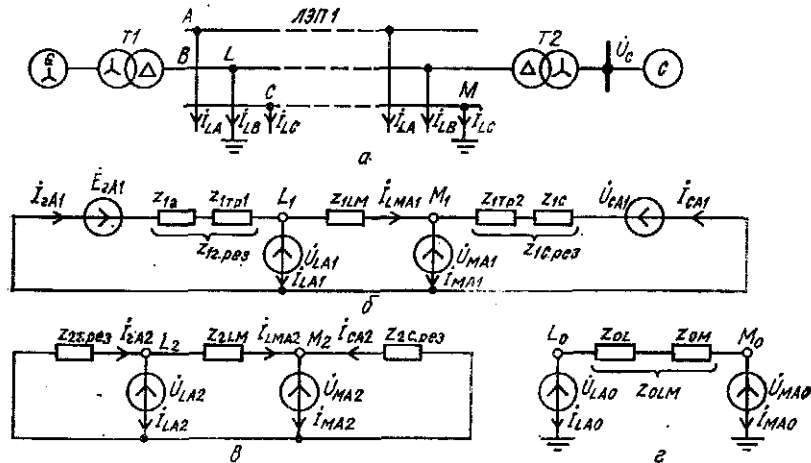


Рис. 8.9. Расчетная схема двойного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью (а) и схемы ее замещения прямой (б), обратной (в) и нулевой (г) последовательностями

ствующим угловым сдвигом токов и напряжений отдельных последовательностей. Кроме того, следует учитывать погрешность, вносимую в расчеты промежуточными трансформаторами.

Двойное замыкание на землю в трехфазной электрической сети с изолированной нейтралью (рис. 8.9, а) рассмотрим при условии, что замыкание на землю произошло одновременно в точке L фазы B и в точке M фазы C . Граничные условия несимметрии:

при замыкании в точке L

$$\left. \begin{aligned} i_{LA} &= 0; \\ i_{LC} &= 0; \\ \dot{U}_{LB} &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (8.38)$$

при замыкании в точке M

$$\left. \begin{aligned} i_{MA} &= 0; \\ i_{MB} &= 0; \\ \dot{U}_{MC} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (8.39)$$

Токи в замкнутых на землю фазах связаны между собой дополнительным условием

$$i_{LB} = -i_{MC}. \quad (8.40)$$

Ниже выполнен анализ связи разноименных симметричных составляющих тока и напряжения в точках замыкания на землю.

Для точки замыкания на землю фазы B граничным условиям (8.38) соответствуют следующие соотношения симметричных составляющих тока и напряжения (основной является фаза B):

$$i_{LB1} = i_{LB2} = i_{LB0} = i_{LB}/3; \quad (8.41)$$

$$\dot{U}_{LB1} + \dot{U}_{LB2} + \dot{U}_{LB0} = 0. \quad (8.42)$$

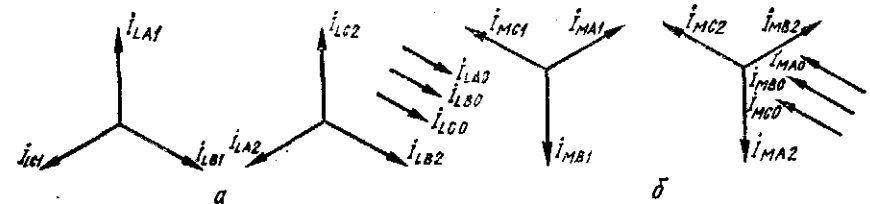


Рис. 8.10. Векторные диаграммы симметричных составляющих токов фаз B и C при двойном замыкании на землю в точках L (а) и M (б)

Аналогично для точки замыкания на землю фазы C граничным условиям (8.39) соответствуют следующие соотношения симметричных составляющих тока и напряжения (основной является фаза C):

$$i_{MC1} = i_{MC2} = i_{MC0} = i_{MC}/3; \quad (8.43)$$

$$\dot{U}_{MC1} + \dot{U}_{MC2} + \dot{U}_{MC0} = 0. \quad (8.44)$$

Сопоставление составляющих, входящих в тождества (8.41) и (8.42), по условию (8.40) позволяет получить информацию о взаимном расположении векторов симметричных составляющих токов фаз для рассматриваемых точек замыкания на землю (рис. 8.10) и о связи их между собой:

$$\left. \begin{aligned} i_{LB1} &= -i_{MC1}; \\ i_{LB2} &= -i_{MC2}; \\ i_{LB0} &= -i_{MC0}. \end{aligned} \right\} \quad (8.45)$$

При совместном рассмотрении замыканий в точках L и M за основную следует принять фазу A , которая при сложном повреждении находится в иных условиях по сравнению с фазами B и C , замкнутыми в соответствующих точках на землю. В этом случае соотношения (8.41) — (8.44) принимают вид

$$a^2 i_{LA1} = a i_{LA1} = i_{LA0} = i_{LB}/3; \quad (8.46)$$

$$a i_{MA1} = a^2 i_{MA2} = i_{MA0} = i_{MC}/3; \quad (8.47)$$

$$a^2 \dot{U}_{LA1} + a \dot{U}_{LA2} + \dot{U}_{LA0} = 0; \quad (8.48)$$

$$a \dot{U}_{MA1} + a^2 \dot{U}_{MA2} + \dot{U}_{MA0} = 0. \quad (8.49)$$

При этом связь между симметричными составляющими тока фазы A в различных точках замыкания выражается соотношениями, полученными в результате преобразования системы тождеств (8.45):

$$\left. \begin{aligned} aI_{LA1} &= -I_{MA1}; \\ I_{LA2} &= -aI_{MA2}; \\ I_{LA0} &= -I_{MA0}. \end{aligned} \right\} \quad (8.50)$$

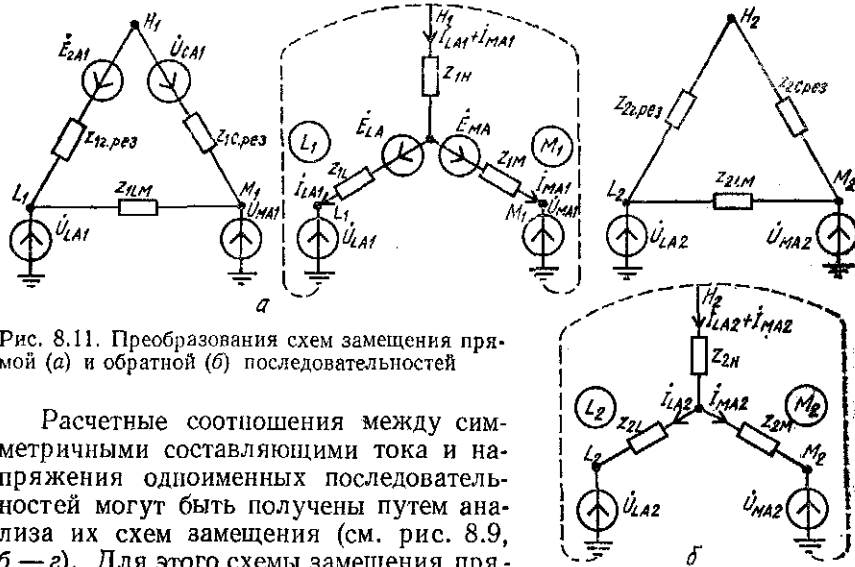


Рис. 8.11. Преобразования схем замещения прямой (а) и обратной (б) последовательностей

Расчетные соотношения между симметричными составляющими тока и напряжения одноименных последовательностей могут быть получены путем анализа их схем замещения (см. рис. 8.9, б — г). Для этого схемы замещения прямой и обратной последовательностей преобразуют таким образом, чтобы выделить ветви замыкания на землю с неизвестными симметричными составляющими тока и напряжения. Затем объединяют в схемах замещения точки равного потенциала (точки нулевого потенциала источников) и преобразуют полученные треугольники в трехлучевые звезды (рис. 8.11). Значения э. д. с. ветвей в преобразованной схеме замещения прямой последовательности (рис. 8.11, а) определяют по формулам

$$\dot{E}_{LA} = [\dot{E}_{rA1}(z_{1r,pez} + z_{1LM}) + \dot{U}_{CA1}z_{1r,pez}]/z_{1pez}; \quad (8.51)$$

$$\dot{E}_{MA} = [\dot{E}_{1A1}z_{1r,pez} + \dot{U}_{CA1}(z_{1r,pez} + z_{1LM})]/z_{1pez}; \quad (8.52)$$

где $z_{1pez} = z_{1r,pez} + z_{1LM} + z_{1Cpez}$.

Сопротивления лучей звезды схемы замещения прямой последовательности рассчитывают по формулам (для обратной последовательности структура формул аналогична)

$$z_{1H} = z_{1r,pez}z_{1Cpez}/z_{1pez}; \quad (8.53)$$

$$z_{1L} = z_{1r,pez}z_{1LM}/z_{1pez}; \quad (8.54)$$

$$z_{1M} = z_{1LM}z_{1Cpez}/z_{1pez}. \quad (8.55)$$

Симметричные составляющие режима для одноименных последовательностей по точкам замыкания на землю связаны следующими системами уравнений:

для схемы замещения прямой последовательности (рис. 8.11, а; контуры L_1 и M_1)

$$\dot{U}_{LA1} = E_{LA} - I_{LA1}(z_{1L} + z_{1H}) - I_{MA1}z_{1H}; \quad (8.56)$$

$$\dot{U}_{MA1} = E_{MA} - I_{LA1}z_{1H} - I_{MA1}(z_{1M} + z_{1H}); \quad (8.57)$$

для схемы замещения обратной последовательности (рис. 8.11, б; контуры L_2 и M_2)

$$\dot{U}_{LA2} = -I_{LA2}(z_{2L} + z_{2H}) - I_{MA2}z_{2H}; \quad (8.58)$$

$$\dot{U}_{MA2} = -I_{LA2}z_{2H} - I_{MA2}(z_{2M} + z_{2H}); \quad (8.59)$$

для схемы замещения нулевой последовательности (см. рис. 8.9, г)

$$\dot{U}_{LA0} = -I_{LA0}z_{0L}; \quad (8.60)$$

$$\dot{U}_{MA0} = -I_{MA0}z_{0M}. \quad (8.61)$$

Симметричные составляющие тока и напряжения в точках двойного замыкания на землю описываются системой независимых уравнений (8.46), (8.48), (8.49), (8.50), (8.56) — (8.61). Для ее решения необходимо сократить число неизвестных, записав симметричные составляющие токов через токи прямой последовательности на основе векторных диаграмм (см. рис. 8.10) для каждой точки несимметрии в следующем виде:

$$I_{LA2} = aI_{LA1} = -I_{MA1}; \quad (8.62)$$

$$I_{LA0} = a^2I_{LA1} = -aI_{MA1}; \quad (8.63)$$

$$I_{MA2} = a^2I_{MA1} = -I_{LA1}; \quad (8.64)$$

$$I_{MA0} = aI_{MA1} = -a^2I_{LA1}. \quad (8.65)$$

При этом решаемая система уравнений с учетом (8.62) — (8.65) примет вид

$$\left. \begin{aligned} aI_{LA1} + I_{MA1} &= 0; \\ a^2\dot{U}_{LA1} + a\dot{U}_{LA2} + \dot{U}_{LA0} + a\dot{U}_{MA1} + a^2\dot{U}_{MA2} + \dot{U}_{MA0} &= 0; \\ \dot{U}_{LA1} &= \dot{E}_{LA} - I_{LA1}[z_{1L} + (1-a)z_{1H}]; \\ \dot{U}_{LA2} &= -I_{LA1}[az_{2L} - (1-a)z_{2H}]; \\ \dot{U}_{LA0} &= -I_{LA1}a^2z_{0L}; \\ \dot{U}_{MA1} &= \dot{E}_{MA} - I_{MA1}[z_{1M} + (1-a^2)z_{1H}]; \\ \dot{U}_{MA2} &= -I_{MA1}[a^2z_{2M} - (1-a^2)z_{2H}]; \\ \dot{U}_{MA0} &= -I_{MA1}az_{0M}. \end{aligned} \right\} \quad (8.66)$$

Система уравнений (8.66) относительно тока прямой последовательности I_{LA1} может быть решена путем подстановки всех уравнений системы во второе ее уравнение:

$$I_{LA1} = (\dot{E}_{LA} - a^2 \dot{E}_{MA}) / z_{\text{рез}}^{(LM)}, \quad (8.67)$$

где

$$z_{\text{рез}}^{(LM)} = z_{1L} + z_{2L} + z_{0L} + z_{1M} + z_{2M} + z_{0M} + 3z_{1н} + 3z_{2н}. \quad (8.68)$$

С учетом выражения (8.68) и уравнений (8.62) — (8.66) симметричные составляющие токов и напряжений определяются выражениями:

для ветви замыкания на землю в точке L , кроме тока I_{LA1} , который рассчитывается по (8.67),

$$\left. \begin{aligned} I_{LA2} &= (a \dot{E}_{LA} - \dot{E}_{MA}) / z_{\text{рез}}^{(LM)}, \\ I_{LA0} &= (a^2 \dot{E}_{LA} - a \dot{E}_{MA}) / z_{\text{рез}}^{(LM)}, \\ \dot{U}_{LA1} &= \dot{E}_{LA} - (\dot{E}_{LA} - a^2 \dot{E}_{MA}) [z_{1н} + (1-a)z_{1M}] / z_{\text{рез}}^{(LM)}, \\ \dot{U}_{LA2} &= -(\dot{E}_{LA} - a^2 \dot{E}_{MA}) [az_{2L} - (1-a)z_{2н}] / z_{\text{рез}}^{(LM)}, \\ \dot{U}_{LA0} &= -(a^2 \dot{E}_{LA} - a \dot{E}_{MA}) z_{0L} / z_{\text{рез}}^{(LM)}, \end{aligned} \right\} \quad (8.69)$$

для ветви замыкания на землю в точке M

$$\left. \begin{aligned} I_{MA1} &= -(a \dot{E}_{LA} - \dot{E}_{MA}) / z_{\text{рез}}^{(LM)}, \\ I_{MA2} &= -(\dot{E}_{LA} - a^2 \dot{E}_{MA}) / z_{\text{рез}}^{(LM)}, \\ I_{MA0} &= -(a^2 \dot{E}_{LA} - a \dot{E}_{MA}) / z_{\text{рез}}^{(LM)}, \\ \dot{U}_{MA1} &= \dot{E}_{MA} - (a \dot{E}_{LA} - \dot{E}_{MA}) [(a^2 - 1)z_{1н} - z_{1M}] / z_{\text{рез}}^{(LM)}, \\ \dot{U}_{MA2} &= (a \dot{E}_{LA} - \dot{E}_{MA}) [(a^2 - 1)z_{2н} + z_{2M}] / z_{\text{рез}}^{(LM)}, \\ \dot{U}_{MA0} &= (a^2 \dot{E}_{LA} - a \dot{E}_{MA}) z_{0M} / z_{\text{рез}}^{(LM)}. \end{aligned} \right\} \quad (8.70)$$

Используя выражения (8.69) и (8.70), можно определить токи и напряжения в замкнутых ветвях с точками L и M . Полученные выражения должны соответствовать граничным условиям (8.38). Токи замыкания в поврежденных фазах определяются выражениями (8.46) и (8.47), которые в данном случае имеют вид

$$I_{LB} = -I_{LC} = 3a^2 I_{LA1} = 3I_{LA0}. \quad (8.71)$$

Токи фаз на других участках электрической сети выражаются через симметричные составляющие токов на этих участках с учетом распределения симметричных составляющих токов ветвей замыкания. Распределение тока замыкания каждой последовательности по участкам электрической сети осуществляется по каждой точке замыкания при условии отсутствия тока замыкания в другой точке с использованием коэффициентов токораспределения. Ток каждой последовательности участка электрической сети определяется как сумма слагаемых, которые соответствуют составляющим тока замыкания на землю для каждой точки повреждения, протекающим по

этому участку, т. е.

$$I_{Ai} = c_i^{(L)} I_{LAi} + c_i^{(M)} I_{MAi}, \quad (8.72)$$

где I_{Ai} — ток i -й последовательности, протекающий по рассматриваемому участку сети; $c_i^{(L)}$ — коэффициент токораспределения для участка сети, найденный при $I_{LAi} = 1$ и $I_{MAi} = 0$; $c_i^{(M)}$ — коэффициент токораспределения для участка сети, вычисленный при $I_{LAi} = 0$ и $I_{MAi} = 1$.

Коэффициенты токораспределения для участка электрической сети «генератор — точка замыкания L » в схеме замещения прямой последовательности (см. рис. 8.9, а) рассчитывают по формулам

$$c_i^{(L)} = (z_{1LM} + z_{1\text{Срез}}) / z_{1\text{рез}}; \quad c_i^{(M)} = z_{1\text{Срез}} / z_{1\text{рез}}, \quad (8.73)$$

а ток прямой последовательности — по формуле

$$I_{rA1} = I_{LA1} [z_{1LM} + (1-a)z_{1\text{Срез}}] / z_{1\text{рез}}. \quad (8.74)$$

Ток обратной последовательности на рассматриваемом участке схемы замещения обратной последовательности определяют по аналогичной формуле

$$I_{rA2} = I_{LA1} [az_{2LM} - (1-a)z_{2\text{Срез}}] / z_{2\text{рез}}, \quad (8.75)$$

где

$$z_{2\text{рез}} = z_{2г.рез} + z_{2LM} + z_{2\text{Срез}}.$$

Ток нулевой последовательности на данном участке не протекает, так как здесь имеется трансформатор с соединением обмоток по схеме «звезда — треугольник», когда $z_{0тр} \rightarrow \infty$. Токи фаз на участке определяются выражениями:

$$I_{rA} = I_{rA1} + I_{rA2} = I_{LA1} \left[\frac{z_{1LM} + (1-a)z_{1\text{Срез}}}{z_{1\text{рез}}} + \frac{az_{2LM} - (1-a)z_{2\text{Срез}}}{z_{2\text{рез}}} \right]; \quad (8.76)$$

$$I_{rB} = a^2 I_{rA1} + a I_{rA2} = I_{LA1} \left[\frac{a^2 z_{1LM} + (a^2 - 1)z_{1\text{Срез}}}{z_{1\text{рез}}} + \frac{a^2 z_{2LM} + (a^2 - a)z_{2\text{Срез}}}{z_{2\text{рез}}} \right]; \quad (8.77)$$

$$I_{rC} = a I_{rA1} + a^2 I_{rA2} = I_{LA1} \left[\frac{az_{1LM} + (a - a^2)z_{1\text{Срез}}}{z_{1\text{рез}}} + \frac{z_{2LM} + (1 - a^2)z_{2\text{Срез}}}{z_{2\text{рез}}} \right]. \quad (8.78)$$

Если исходить из допущения равенства сопротивлений прямой и обратной последовательностей элементов электрической сети, то с учетом (8.71) выражения (8.76) — (8.78) значительно упрощаются. Упрощенные выражения для определения симметричных составляющих тока основной фазы A и токов фаз на участках электрической сети (см. рис. 8.9) приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1. Выражения для определения токов на участках электрической сети

Участок сети	Симметричные составляющие тока фазы А для последовательностей			Токи фаз		
	прямой	обратной	нулевой	А	В	С
Ветвь замыкания с точкой L	$(E_{LA} - a^2 E_{MA}) \times \frac{1}{z_{(LM)}^{(pes)}} = I_{LA1}$	$(a E_{LA} - E_{MA}) \times \frac{1}{z_{(LM)}^{(pes)}} \times \frac{1}{z_{(pes)}^{(LM)}}$	$(a^2 E_{LA} - a E_{MA}) \times \frac{1}{z_{(LM)}^{(pes)}}$	0	$3a^2 I_{LA1} = 3I_{LA0} = I_{LB}$	0
Ветвь замыкания с точкой M	$-(a E_{LA} - E_{MA}) \times \frac{1}{z_{(LM)}^{(pes)}} \times \frac{1}{z_{(pes)}^{(LM)}}$	$-(E_{LA} - a^2 E_{MA}) \times \frac{1}{z_{(LM)}^{(pes)}}$	$-(a^2 E_{LA} - a E_{MA}) \times \frac{1}{z_{(LM)}^{(pes)}}$	0	0	$-3a^2 I_{LA1} = -3I_{LA}$
Генератор — точка L	$\frac{I_{LA1}}{z_{1pes}} (z_{1LM} + (1-a)z_{1Cpes})$	$\frac{I_{LA1}}{z_{1pes}} (az_{1LM} - (1-a)z_{1Cpes})$	0	$\frac{I_{LB^2 1LM}}{3z_{1pes}}$	$\frac{I_{LB}}{3z_{1pes}} (2z_{1LM} + 3z_{1Cpes})$	$\frac{I_{LB}}{z_{1pes}} (z_{1LM} + 3z_{1Cpes})$
Точка L — точка M	$-\frac{I_{LA1}}{z_{1pes}} (z_{1r.pes} + az_{1Cpes})$	$-\frac{I_{LA1}}{z_{1pes}} (az_{1r.pes} + z_{1Cpes})$	$-a^2 I_{LA1}$	$-\frac{I_{LB^2 1LM}}{3z_{1pes}}$	$-\frac{I_{LB}}{3z_{1pes}} (3z_{1r.pes} + z_{1LM})$	$-\frac{I_{LB}}{z_{1pes}} (z_{1LM} + 3z_{1Cpes})$
Точка M — шины системы	$\frac{I_{LA1}}{z_{1pes}} ((1-a)z_{1r.pes} - az_{1LM})$	$-\frac{I_{LA1}}{z_{1pes}} ((1-a)z_{1r.pes} + z_{1LM})$	0	$\frac{I_{LB^2 1LM}}{3z_{1pes}}$	$\frac{I_{LB}}{3z_{1pes}} (3z_{1r.pes} + z_{1LM})$	$-\frac{I_{LB}}{z_{1pes}} (3z_{1r.pes} + 2z_{1LM})$

Напряжения фаз в различных точках электрической сети находят по симметричным составляющим напряжения в этих точках, которые определяют по полученным выше симметричным составляющим токов на участках сети.

8.6. Однофазное короткое замыкание с разрывом фазы

Данный вид продольной несимметрии рассмотрим в электрической сети с изолированной нейтралью, расчетная схема которой изображена на рис. 8.12, а.

Граничные условия для повреждений следующие: при разрыве фазы А в точке L

$$I_{LA} = 0; \Delta U_{LB} = 0; \Delta U_{LC} = 0; \quad (8.79)$$

при однофазном КЗ фазы А на землю в точке К

$$U_{KA} = 0; I_{KB} = 0; I_{KC} = 0. \quad (8.80)$$

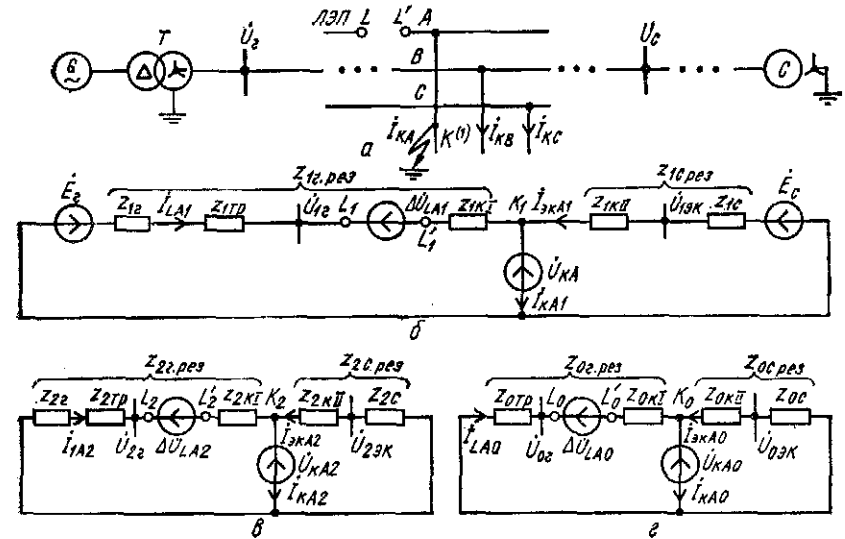


Рис. 8.12. Расчетная схема при однофазном КЗ с разрывом фазы А (а) и схемы замещения прямой (б), обратной (в) и нулевой (г) последовательностей

Приняв фазу А за основную и используя соответствующие расчетные соотношения, получим для разных симметричных составляющих токов и напряжений в точках повреждений следующие выражения:

в точке разрыва фазы А

$$\Delta U_{LA1} = \Delta U_{LA2}; \quad (8.81)$$

$$\Delta U_{LA2} = \Delta U_{LA0}; \quad (8.82)$$

$$I_{LA1} + I_{LA2} + I_{LA0} = 0; \quad (8.83)$$

в точке однофазного КЗ

$$I_{KA1} = I_{KA2}; \quad (8.84)$$

$$I_{KA2} = I_{KA0}; \quad (8.85)$$

$$\dot{U}_{KA1} + \dot{U}_{KA2} + \dot{U}_{KA0} = 0. \quad (8.86)$$

Расчетные соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений в ветвях повреждений для одноименных последовательностей можно получить из схем замещения каждой последовательности на основе второго закона Кирхгофа. При составлении схем замещения последовательностей в ветви повреждений должны быть введены источники с напряжением, равным напряжению соответствующей последовательности (рис. 8.12, б—г).

Для контуров схемы замещения прямой последовательности (рис. 8.12, б) имеем следующие уравнения:

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \dot{E}_r - \dot{E}_{эк} - I_{rA1} z_{1r,рез} + I_{KA1} z_{1Cрез}; \quad (8.87)$$

$$\dot{U}_{KA1} = \dot{E}_{эк} + (I_{rA1} - I_{KA1}) z_{1Cрез}; \quad (8.88)$$

для контуров схемы замещения обратной последовательности (рис. 8.12, в) — уравнения

$$\Delta \dot{U}_{LA2} = -I_{rA2} z_{2рез} + I_{KA2} z_{2Cрез}; \quad (8.89)$$

$$\dot{U}_{KA2} = (I_{rA2} - I_{KA2}) z_{2Cрез}, \quad (8.90)$$

а для контуров схемы замещения нулевой последовательности (рис. 8.12, г) — уравнения

$$\Delta \dot{U}_{LA0} = -I_{rA0} z_{0рез} + I_{KA0} z_{0Cрез}; \quad (8.91)$$

$$\dot{U}_{KA0} = (I_{rA0} - I_{KA0}) z_{0Cрез}. \quad (8.92)$$

Таким образом, параметры режима в ветвях повреждений описываются системой 12 независимых уравнений (8.81) — (8.92). Решение этой системы уравнений приведено в табл. 8.2. Там же помещены выражения для определения симметричных составляющих токов в ветвях расчетной схемы. В этих выражениях приняты следующие обозначения:

$$\left. \begin{aligned} z_{Cрез}^{(1)} &= z_{1Cрез} + z_{2Cрез} + z_{0Cрез}; \\ z_{C1-2} &= z_{1Cрез} - z_{2Cрез}; \\ z_{C1-0} &= z_{1Cрез} - z_{0Cрез}; \\ z_{C2-0} &= z_{2Cрез} - z_{0Cрез}; \\ \Delta_A &= z_{1рез} z_{2рез} + z_{1рез} z_{0рез} + z_{2рез} z_{0рез}; \\ \Delta &= z_{Cрез}^{(1)} \Delta_A - z_{0рез}^2 z_{C1-2} - z_{2рез}^2 z_{C1-0} - z_{1рез}^2 z_{C2-0}. \end{aligned} \right\} \quad (8.93)$$

При известных симметричных составляющих токов в различных ветвях электрической сети, э. д. с. генератора и всей системы легко рассчитать напряжения в интересующих точках сети. Отняв от э. д. с. источника падения напряжения на участке сети между дан-

Таблица 8.2. Выражения для определения симметричных составляющих токов и напряжений в ветвях электрической сети

Ветвь сети	Симметричные составляющие	Расчетные выражения
С разрывом в точке L	I_{LA1}	$(\dot{E}_r - \dot{E}_{эк}) [(z_{2рез} + z_{0рез}) z_{Cрез}^{(1)} z_{C2-0} - z_{C2-0}^2] + \dot{E}_{эк} (z_{0рез} z_{C1-2} + z_{2рез} z_{C-0}) / \Delta$
	I_{LA2}	$(\dot{E}_r - \dot{E}_{эк}) [z_{C1-0} z_{C2-0} - z_{0рез} z_{Cрез}^{(1)}] + \dot{E}_{эк} (z_{1рез} z_{C2-0} - z_{0рез} z_{C1-2}) / \Delta$
	I_{LA0}	$[-(\dot{E}_r - \dot{E}_{эк}) (z_{2рез} z_{Cрез}^{(1)} + z_{C1-0} z_{C2-0}) - \dot{E}_{эк} (z_{1рез} z_{C2-0} + z_{2рез} z_{C1-0})] / \Delta$
	$\Delta \dot{U}_{LA1} = \Delta \dot{U}_{LA2} =$	$(\dot{E}_r - \dot{E}_{эк}) [z_{2рез} z_{0рез} z_{Cрез}^{(1)} + z_{1рез} z_{0рез} z_{C1-0} + z_{0рез} z_{0Cрез} z_{C1-0} + z_{0рез} z_{0Cрез} z_{C1-2}] +$ $+ \dot{E}_{эк} (z_{1рез} z_{2рез} z_{0Cрез} + z_{1рез} z_{2рез} z_{0рез} + z_{2рез} z_{0рез} z_{Cрез}^{(1)}) / \Delta$
	$= \Delta \dot{U}_{LA0}$	$[(\dot{E}_r - \dot{E}_{эк}) (z_{2рез} z_{C1-0} + z_{0рез} z_{C1-2}) + \dot{E}_{эк} \Delta] / \Delta$
Однофазного КЗ в точке K	I_{KA1}	$\dot{E}_{эк} + \{(\dot{E}_r - \dot{E}_{эк}) z_{1Cрез} [(z_{2рез} + z_{0рез}) z_{Cрез}^{(1)} - z_{2рез} z_{0рез} - z_{2рез} z_{C1-0} - z_{0рез} z_{C2-0}] + \dot{E}_{эк} z_{1Cрез} (z_{2рез} z_{C1-0} + z_{0рез} z_{C1-2} + z_{0рез} z_{C1-0} - \Delta_A) / \Delta$
	\dot{U}_{KA1}	$(\dot{E}_r - \dot{E}_{эк}) z_{2Cрез} (z_{C1-0} z_{C2-0} - z_{0рез} z_{Cрез}^{(1)}) + z_{0рез} z_{C1-0} + z_{0рез} z_{C1-2} - z_{2рез} z_{C1-0} - \Delta_A) / \Delta$
	\dot{U}_{KA2}	$[-(\dot{E}_r - \dot{E}_{эк}) z_{2Cрез} (z_{C1-0} z_{C2-0} - z_{0рез} z_{Cрез}^{(1)}) + \dot{E}_{эк} z_{1Cрез} (z_{2рез} z_{C1-0} + z_{0рез} z_{C1-2} - z_{2рез} z_{C1-0} - \Delta_A) / \Delta$
Точка K — шины системы	I_{KA1}	$(\dot{E}_r - \dot{E}_{эк}) [z_{2рез} z_{C1-0} + z_{0рез} z_{C1-2} - (z_{2рез} + z_{0рез}) z_{Cрез}^{(1)}] z_{Cрез} + z_{0рез}^2 z_{C2-0} + z_{0рез} z_{C1-2} / \Delta$
	I_{KA2}	$(\dot{E}_r - \dot{E}_{эк}) [z_{2рез} z_{C1-0} + z_{0рез} z_{C1-2} - (z_{2рез} + z_{0рез}) z_{Cрез}^{(1)}] z_{Cрез} + z_{0рез}^2 z_{C2-0} + z_{0рез} z_{C1-2} / \Delta$
	I_{KA0}	$(\dot{E}_r - \dot{E}_{эк}) [z_{2рез} z_{C1-0} + z_{0рез} z_{C1-2} - (z_{2рез} + z_{0рез}) z_{Cрез}^{(1)}] z_{Cрез} + z_{0рез}^2 z_{C2-0} + z_{0рез} z_{C1-2} / \Delta$
	\dot{U}_{KA1}	$(\dot{E}_r - \dot{E}_{эк}) [z_{2рез} z_{C1-0} + z_{0рез} z_{C1-2} - (z_{2рез} + z_{0рез}) z_{Cрез}^{(1)}] z_{Cрез} + z_{0рез}^2 z_{C2-0} + z_{0рез} z_{C1-2} / \Delta$
	\dot{U}_{KA2}	$(\dot{E}_r - \dot{E}_{эк}) [z_{2рез} z_{C1-0} + z_{0рез} z_{C1-2} - (z_{2рез} + z_{0рез}) z_{Cрез}^{(1)}] z_{Cрез} + z_{0рез}^2 z_{C2-0} + z_{0рез} z_{C1-2} / \Delta$

ным источником и заданной точкой электрической сети, по вычисленным симметричным составляющим тока и напряжения в заданных точках электрической сети находят фазные напряжения и токи фаз.

Таким образом, сложные виды повреждений в СЭС анализируют в следующем порядке:

1) составляют расчетную схему электрической сети и выделяют ветви с повреждениями;

2) устанавливают граничные условия по каждой точке нарушения симметрии;

3) определяют основную фазу;

4) выражают граничные условия по каждой точке несимметрии через расчетные соотношения между равноименными симметричными составляющими токов и напряжений;

5) составляют схемы замещения каждой последовательности для особой фазы и на их основе определяют расчетные соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений одноименных последовательностей;

6) решают систему независимых уравнений для определения неизвестных симметричных составляющих токов и напряжений в ветвях повреждений;

7) находят симметричные составляющие токов и напряжений в заданных точках электрической сети;

8) вычисляют фазные напряжения и полные токи фаз в заданных точках электрической сети.

8.7. Примеры расчетов

Пример 8.1. На радиальной ВЛ напряжением 110 кВ, питающей нагрузку $S_H = 50 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ (рис. 8.13, а), произошло отключение фазы А. Исходные данные указаны на рисунке. Определить токи в неотключенных фазах ВЛ.

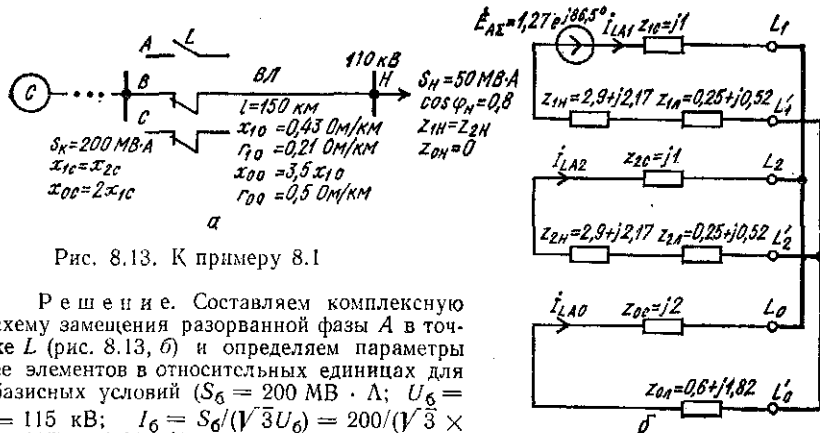


Рис. 8.13. К примеру 8.1

Решение. Составляем комплексную схему замещения разорванной фазы А в точке L (рис. 8.13, б) и определяем параметры ее элементов в относительных единицах для базисных условий ($S_6 = 200 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $U_6 = 115 \text{ кВ}$; $I_6 = S_6 / (\sqrt{3} U_6) = 200 / (\sqrt{3} \times 115) = 1,01 \text{ кА}$);

сопротивления связи с питающей энергетической системой

$$z_{*1c} = z_{*2c} = jS_6 / S_k = j200 / 200 = j1;$$

$$z_{*0c} = 2x_{*1c} = j2;$$

полные сопротивления ВЛ

$$z_{*1л} = z_{*2л} = (r_{10} + jx_{10}) I S_6 / U_{cp}^2 = (0,21 + j0,43) \cdot 80 \cdot 200 / 115^2 = 0,25 + j0,52;$$

$$z_{*0л} (r_{00} + j3,5x_{10}) I S_6 / U_{cp}^2 = (0,5 + j3,5 \cdot 0,43) \cdot 80 \cdot 200 / 115^2 = 0,6 + j1,82;$$

сопротивления нагрузки

$$|z_{*1H}| = |z_{*2H}| = S_6 U_{ном}^2 / (S_H U_{cp}^2) = 200 \cdot 110^2 / (50 \cdot 115^2) = 3,62;$$

$$z_{*1H} = z_{*2H} = |z_{*1H}| (\cos \varphi_H + j \sin \varphi_H) = 3,62 (0,8 + j0,6) = 2,9 + j2,17.$$

После этого рассчитываем:

результатирующие сопротивления отдельных последовательностей относительно точки разрыва

$$z_{*1рез} = z_{*2рез} = z_{*1c} + z_{*1л} + z_{*1H} = j1 + 0,25 + j0,52 + 2,9 + j2,17 = 3,15 + j3,69 = 4,85 \exp(j49,5^\circ);$$

$$z_{*0рез} = z_{*0c} + z_{*0л} = j2 + 0,6 + j1,82 = 0,6 + j3,82 = 3,87 \exp(j81^\circ);$$

э. д. с. питающей энергетической системы

$$E_{*A\Sigma} = I_{*H} z_{*1рез} = z_{*1H} S_H / (\sqrt{3} U_{ном} I_6) = 4,85 \exp(j49,5^\circ) \times 50 \exp(j37^\circ) / (\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 1,01) = 1,27 \exp(j86,5^\circ);$$

дополнительное сопротивление за счет ветвей обратной и нулевой последовательностей относительно точек $L_1 - L'_1$

$$z_{*LL1} = z_{*2рез} z_{*0рез} / (z_{*2рез} + z_{*0рез}) = 4,85 \exp(j49,5^\circ) \times 3,87 \exp(j81^\circ) / (3,15 + j3,69 + 0,6 + j3,82) = 0,875 + j2,06 = 2,24 \exp(j67^\circ);$$

симметричные составляющие токов особой фазы в месте разрыва

$$I_{*LA1} = E_{*A\Sigma} / (z_{*1рез} + z_{*LL1}) = 1,27 \exp(j86,5^\circ) / (3,15 + j3,69 + 0,875 + j2,06) = 0,154 + j0,095 = 0,181 \exp(j31,5^\circ);$$

$$I_{*LA2} = -I_{*LA1} z_{*LL1} / z_{*2рез} = -0,181 \exp(j31,5^\circ) \cdot 2,24 \times \exp(j67^\circ) / (4,85 \exp(j49,5^\circ)) = -0,054 + j0,063 = -0,084 \exp(j49^\circ);$$

$$I_{*LA0} = -I_{*LA1} z_{*LL1} / z_{*0рез} = -0,181 \exp(j31,5^\circ) \cdot 2,24 \times \exp(j67^\circ) / (3,87 \exp(j81^\circ)) = -0,1 + j0,032 = -0,105 \exp(j17,5^\circ);$$

токи фаз

$$I_{*A} = I_{*LA} = I_{*LA1} + I_{*LA2} + I_{*LA0} = 0,154 + j0,095 - 0,054 - j0,063 - 0,1 - j0,032 = 0,$$

что соответствует исходному граничному условию $I_{*LA} = 0$;

$$I_B = (a^2 I_{*LA1} + a I_{*LA2} + I_{*LA0}) I_6 = (e^{j240^\circ} \cdot 0,181 e^{j31,5^\circ} - e^{j120^\circ} \cdot 0,084 e^{j49^\circ} - 0,105 e^{j17,5^\circ}) \cdot 1,01 = 4,34 e^{j245^\circ} \text{ кА};$$

$$I_C = (a I_{*LA1} + a^2 I_{*LA2} + I_{*LA0}) I_6 = (e^{j120^\circ} \cdot 0,181 e^{j31,5^\circ} - e^{j240^\circ} \cdot 0,084 e^{j49^\circ} - 0,105 e^{j17,5^\circ}) \cdot 1,01 = 4,34 \exp(j165^\circ) \text{ кА}.$$

Пример 8.2. На радиальной ВЛ напряжением 110 кВ произошло отключение фаз В и С (рис. 8.14, а). Исходные данные те же, что и на рис. 8.13, а. Определить ток в ВЛ.

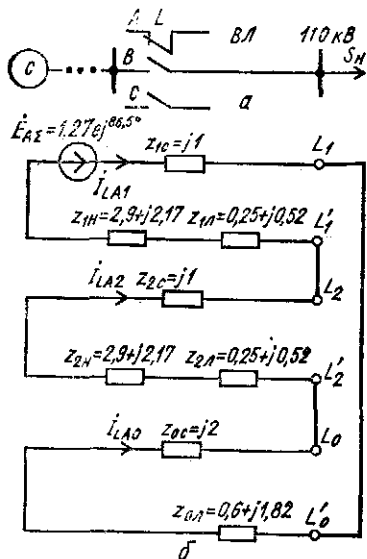


Рис. 8.14. К примеру 8.2

Решение. Для режима работы реактора, при котором все его фазы включены, схема замещения сети показана на рис. 8.15, б. Исходя из базисных условий ($S_6 = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $U_6 = 6,3 \text{ кВ}$; $I_6 = S_6 / (\sqrt{3} U_6) = 100 / (\sqrt{3} \cdot 6,3) = 9,16 \text{ кА}$),

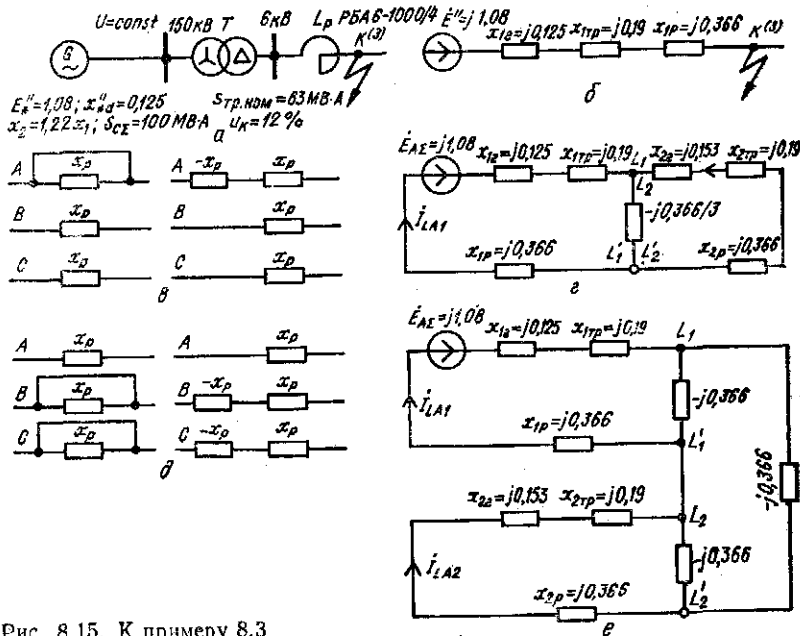


Рис. 8.15. К примеру 8.3

Решение. Составляем комплексную схему замещения особой фазы А при разрыве фаз В и С (рис. 8.14, б). Параметры элементов этой схемы определены в примере 8.1. Пользуясь ими, рассчитываем: симметричные составляющие тока особой фазы

$$\begin{aligned}
 i_{*LA1} &= i_{*LA2} = i_{*LA0} = \\
 &= E_{*A\Sigma} / (z_{*1\text{рез}} + z_{*2\text{рез}} + z_{*0\text{рез}}) + \\
 &= 1,27 \exp(j86,5^\circ) / (3,15 + j3,69 + 3,15 + \\
 &+ j3,69 + 0,6 + j3,82) = 0,097 \exp(j28^\circ); \\
 &\text{ток неотключенной фазы ВЛ} \\
 I_A &= 3i_{*LA1} I_6 = 3 \cdot 0,097 \exp(j28^\circ) \cdot 1,01 = \\
 &= 0,292 \exp(j28^\circ) \text{ кА}.
 \end{aligned}$$

Пример 8.3. Установить пределы изменения наибольших значений фазных токов при трехфазном КЗ за линейным реактором подстанции (рис. 8.15, а) при его работе в следующих режимах: все фазы реактора включены; все фазы реактора закорочены; одна фаза реактора закорочена; две фазы реактора закорочены. Исходные данные указаны на рисунке.

определяем сначала сопротивления генератора, трансформатора и реактора:

$$x_{*1Г} = x_{*d} S_G / S_{Г, \text{ном}} = 0,125 \cdot 100 / 100 = 0,125;$$

$$x_{*1Тр} = u_K S_6 / (100 S_{Тр, \text{ном}}) = 12 \cdot 100 / (100 \cdot 63) = 0,19;$$

$$x_{*1Р} = x_p I_6 U_{Р, \text{ном}} / (100 I_{Р, \text{ном}} U_6) = 4 \cdot 9,16 \cdot 6 / (100 \cdot 1 \cdot 6,3) = 0,366.$$

Затем рассчитываем:

результатирующее сопротивление электрической сети

$$z_{*1\text{рез}} = x_{*1\text{рез}} = j(x_{*1Г} + x_{*1Тр} + x_{*1Р}) = j(0,125 + 0,19 + 0,366) = j0,681;$$

значение сверхпереходного тока трехфазного КЗ

$$I_{*к1=0} = E_{*A\Sigma} / x_{*1\text{рез}} = 1,08 / 0,681 = 1,59,$$

или в именованных единицах

$$I_{к1=0} = I_{*к1=0} I_6 = 1,59 \cdot 9,16 = 14,6 \text{ кА}.$$

Следующий режим работы реактора (с закороченными всеми его фазами) отличается от рассмотренного тем, что следует принять $x_{*1Р} = 0$. В этом случае результирующее сопротивление электрической сети и сверхпереходный ток трехфазного КЗ имеют следующие значения:

$$x_{*1\text{рез}} = x_{*1Г} + x_{*1Тр} = 0,125 + 0,19 = 0,315;$$

$$I_{*к1=0} = E_{*A\Sigma} / x_{*1\text{рез}} = 1,08 \cdot 9,16 / 0,315 = 31,4 \text{ кА}.$$

При работе реактора с одной закороченной фазой (например, фазой А) схема его включения эквивалентна схеме, в которой все фазные сопротивления обмоток реактора симметричны, а в фазу А введено дополнительное сопротивление $x_{*p} = x_{*p}$ (рис. 8.15, в), которое нарушает продольную симметрию фаз. Комплексная схема замещения особой фазы А для этого случая изображена на рис. 8.15, г, где между точками L_1 и L_1' параллельно ветви из сопротивлений обратной последовательности включено дополнительное сопротивление, равное $-x_{*p}/3$.

Значения сопротивлений обратной последовательности (схема замещения не содержит сопротивлений нулевой последовательности, так как протеканию тока нулевой последовательности препятствует силовой трансформатор, у которого $x_{*0Тр} \rightarrow \infty$) в данном режиме следующие:

$$x_{*2Г} = 1,22 x_{*1Г} = 1,22 \cdot 0,125 = 0,153;$$

$$x_{*2Тр} = x_{*1Тр} = 0,19;$$

$$x_{*2Р} = x_{*1Р} = 0,366;$$

$$z_{*2\text{рез}} = jx_{*2\text{рез}} = j(0,153 + 0,19 + 0,366) = j0,709.$$

Дополнительное сопротивление, включаемое в месте продольной несимметрии,

$$z_{*LL1} = j / (-3/x_{*2Р} + 1/x_{*2\text{рез}}) = j / (-3/0,366 + 1/0,709) = -j0,147.$$

Симметричные составляющие токов основной фазы

$$I_{*LA1} = E_{*A\Sigma} / (z_{*1\text{рез}} + z_{*LL1}) = 1,08 / (0,681 - 0,147) = 2,02;$$

$$I_{*LA2} = -I_{*LA1} z_{*LL1} / z_{*2\text{рез}} = -2,02 (-0,147) / 0,709 = 0,419.$$

Токи фаз

$$I_A = (I_{*LA1} + I_{*LA2}) I_6 = (2,02 + 0,419) \cdot 9,16 = 22,4 \text{ кА};$$

$$I_B = (a^2 I_{*LA1} + a I_{*LA2}) I_6 = [(-0,5 - j0,87) \cdot 2,02 +$$

$$+ (-0,5 + j0,87) \cdot 0,419 \cdot 9,16 = 17 \exp(j223^\circ) \text{ кА};$$

$$I_C = (a^2 I_{LA1} + a I_{LA2}) I_0 = [(-0,5 + j0,87) \cdot 2,02 +$$

$$+ (-0,5 - j0,87) \cdot 0,419] \cdot 9,16 = 17 \exp(j137^\circ) \text{ кА}.$$

Наибольший ток в этом режиме

$$I_{kt=0} = I_A = 22,4 \text{ кА}.$$

При работе реактора с замкнутыми двумя фазами (например, фазами В и С) схема его включения эквивалентна схеме замещения с симметричным расположением обмоток реактора и с введением в фазы В и С дополнительных сопротивлений $z_* = -x_p$ (рис. 8.15, д). Комплексная схема замещения особой фазы А для этого случая показана на рис. 8.15, е.

Дополнительное сопротивление, которое включено в комплексную схему замещения между точками L_1 и L'_1 ,

$$\begin{aligned} z_{*LL1} &= z_* \left(\frac{z_* z_{*2\text{pez}}}{z_* + z_{*2\text{pez}}} + z_* \right) / \left(2z_* + \frac{z_* z_{*2\text{pez}}}{z_* + z_{*2\text{pez}}} \right) = \\ &= z_* (2z_{*2\text{pez}} + z_*) / (3z_{*2\text{pez}} + 2z_*) = \\ &= -j0,366 (2 \cdot 0,709 - 0,366) / (3 \cdot 0,709 - 2 \cdot 0,366) = -j0,276. \end{aligned}$$

Симметричные составляющие тока основной фазы

$$I_{LA1} = E_{*A\Delta} I_0 (z_{*1\text{pez}} + z_{*LL1}) = 1,08 \cdot 9,16 / (0,681 - 0,276) = 24,4 \text{ кА};$$

$$\begin{aligned} I_{LA2} &= I_{*LA1} (z_* - z_{*LL1}) / (z_* + z_{*2\text{pez}}) = 24,4 (-0,366 + 0,276) / (-0,276 + \\ &+ 0,709) = 5,1 \text{ кА}. \end{aligned}$$

Токи фаз

$$I_A = I_{LA1} + I_{LA2} = 24,4 - 5,1 = 19,3 \text{ кА};$$

$$\begin{aligned} I_B &= a^2 I_{LA1} + a I_{LA2} = (-0,5 - j0,87) \cdot 24,4 + (-0,5 + j0,87) (-5,1) = \\ &= 27,6 \exp(j248^\circ) \text{ кА}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_C &= a I_{LA1} + a^2 I_{LA2} = (-0,5 + j0,87) \cdot 24,4 + (-0,5 - j0,87) (-5,1) = \\ &= 27,6 \exp(j112^\circ) \text{ кА}. \end{aligned}$$

Наибольший ток в этом режиме

$$I_{kt=0} = I_B = I_C = 27,6 \text{ кА}.$$

Наибольшие значения фазных токов при трехфазном КЗ за линейным реактором в различных режимах его работы находятся в соотношении 14,6 : 31,4 : 22,4 : 27,6 кА.

Пример 8.4. В СЭС, работающей с изолированной нейтралью, на ЛЭП напряжением 35 кВ между районными подстанциями Г и С произошел одновременно замыкания на землю фаз В и С (рис. 8.16, а). Исходные данные указаны на рисунке. Определить фазные токи в ЛЭП и напряжения на шинах подстанций Г и С.

Решение. Используем метод симметричных составляющих и основные расчетные соотношения для случая двойного замыкания на землю. На основании схемы замещения основной фазы А для каждой последовательности (рис. 8.16, б-е) и исходя из базисных условий ($S_6 = 400 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $U_{ф.0} = 37/\sqrt{3} = 21,4 \text{ кВ}$; $I_0 = 400/(\sqrt{3}U_0) = 6,24 \text{ кА}$) рассчитываем сопротивления в относительных единицах отдельных участков СЭС:

участка «подстанция Г — точка L»

$$x_{*1Г} = S_6/S_k = 400/400 = 1;$$

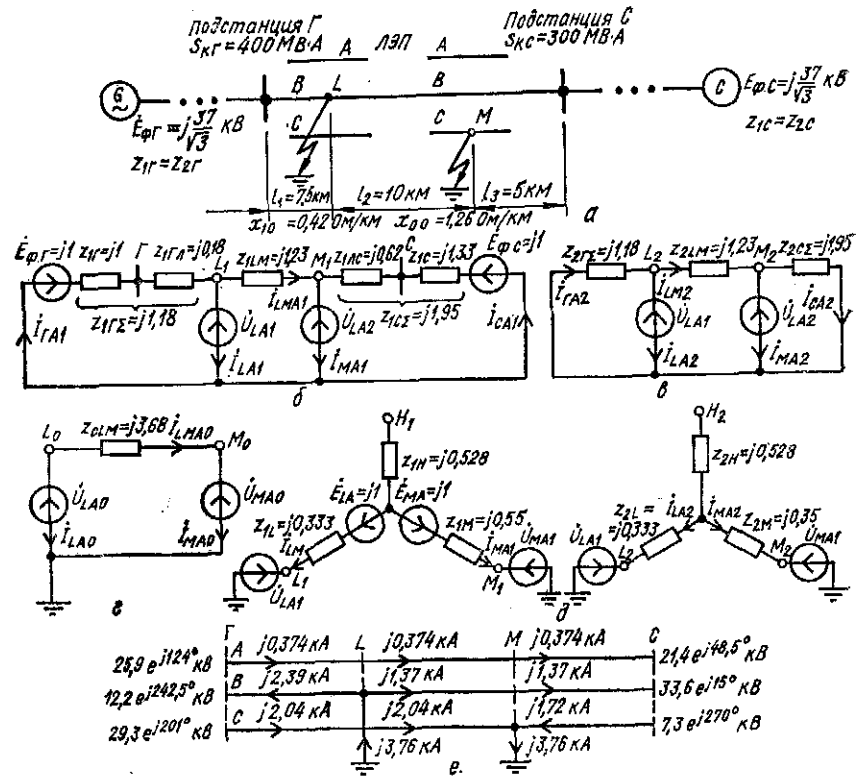


Рис. 8.16. К примеру 8.4

$$x_{*1ГL} = x_{10} I_0 S_6 / U_{\text{ср.ном}}^2 = 0,42 \cdot 7,5 \cdot 400 / 37^2 = 0,18;$$

$$x_{*1Г.pez} = x_{*2Г.pez} = 1 + 0,18 = 1,18;$$

участка LM

$$x_{*1LM} = x_{*2LM} = x_{10} I_2 S_6 / U_{\text{ср.ном}}^2 = 0,42 \cdot 10 \cdot 400 / 37^2 = 1,23;$$

$$x_{*0LM} = x_{00} I_0 S_6 / U_{\text{ср.ном}}^2 = 1,26 \cdot 10 \cdot 400 / 37^2 = 3,68;$$

участка «точка М — подстанция С»

$$x_{*1MC} = x_{10} I_3 S_6 / U_{\text{ср.ном}}^2 = 0,42 \cdot 5 \cdot 400 / 37^2 = 0,62;$$

$$x_{*1C} = S_6/S_k = 400/300 = 1,33;$$

$$x_{*1Cpez} = x_{*2Cpez} = 0,62 + 1,33 = 1,95.$$

Результирующие сопротивления схем замещения прямой и обратной последовательностей

$$z_{*1pez} = z_{*2pez} = z_{*1Г.pez} + z_{*1LM} + z_{*1Cpez} = j1,18 + j1,23 + j1,95 = j4,36.$$

Преобразовав схемы замещения прямой и обратной последовательностей (объединив начала генерирующих ветвей) с выделением ветвей повреждений

(рис. 8.16. д), найдем

$$E_{*LA} = E_{*MA} = [\dot{E}_{*ф.г} (z_{*1Cpez} + z_{*1LM}) + \dot{E}_{*ф.г} z_{*1г.pez}] = j1;$$

$$z_{*1н} = z_{*2н} = j1,18 \cdot j1,95/(j4,36) = j0,528;$$

$$z_{*1L} = z_{*2L} = j1,18 \cdot j1,23/(j4,36) = j0,333;$$

$$z_{*1M} = z_{*2M} = j1,23 \cdot j1,95/(j4,36) = j0,55;$$

$$z_{*pez}^{(LM)} = 2z_{*1L} + 2z_{*1M} + z_{*0LM} + 6z_{*1н} =$$

$$= 2j0,333 + 2j0,55 + j3,68 + 6j0,528 = j8,61.$$

Симметричные составляющие токов и токи в ветвях повреждений

$$\dot{I}_{*LA1} = \dot{E}_{*LA} (1 - a^2)/z_{*pez}^{(LM)} = j\sqrt{3} \exp(j30^\circ)/(j8,61) = 0,201 \exp(j30^\circ);$$

$$\dot{I}_{*LA2} = \dot{E}_{*LA} (a - 1)/z_{*pez}^{(LM)} = j1 [\exp(j120^\circ) - 1]/(j8,61) = 0,201 \exp(j150^\circ);$$

$$\dot{I}_{*LA0} = \dot{E}_{*LA} (a^2 - a)/z_{*pez}^{(LM)} = j1 [\exp(j240^\circ) - \exp(j120^\circ)]/(j8,61) = 0,201 \exp(j90^\circ);$$

$$\dot{I}_{*LB} = -\dot{I}_{*LC} = 3a^2 \dot{I}_{*LA1} = 3 \exp(j240^\circ) \cdot 0,201 \exp(j30^\circ) = -j0,603,$$

или в именованных единицах

$$\dot{I}_{LB} = -\dot{I}_{LC} = \dot{I}_{LB}'6 = -0,603 \cdot j6,24 = -j3,76 \text{ кА.}$$

Симметричные составляющие тока основной фазы и полные токи фаз на участке СЭС «подстанция Г — точка L»

$$\dot{I}_{*GA1} = \dot{I}_{*LA1} [z_{*1LM} + (1 - a) z_{*1Cpez}]/z_{*1pez} =$$

$$= 0,201 \exp(j30^\circ) [j1,23 + (1 - a) j1,95]/(j4,36) = 0,207 \exp(j8^\circ);$$

$$\dot{I}_{*GA2} = \dot{I}_{*LA2} [az_{*1LM} - (1 - a) z_{*1Cpez}]/z_{*1pez} =$$

$$= 0,201 \exp(j30^\circ) [aj1,23 - (1 - a) j1,95]/(j4,36) = 0,207 \exp(j125^\circ);$$

$$\dot{I}_{GA} = (\dot{I}_{*GA1} + \dot{I}_{*GA2}) I_6 = [0,207 \exp(j8^\circ) + 0,207 \exp(j125^\circ)] \cdot 6,24 =$$

$$= j0,374 \text{ кА;}$$

$$\dot{I}_{GB} = \dot{I}_{*LB} (2z_{*1LM} + 3z_{*1Cpez}) I_6 / (3z_{*1pez}) =$$

$$= -j0,603 (2j1,23 + 3j1,95) \cdot 6,24 / (3j4,36) = -j2,39 \text{ кА;}$$

$$\dot{I}_{GC} = -\dot{I}_{*LB} (z_{*1LM} + 3z_{*1Cpez}) I_6 / (3z_{*1pez}) =$$

$$= -(-j0,603) (j1,23 + 3j1,95) \cdot 6,24 / (3j4,36) = j2,04 \text{ кА.}$$

Результаты расчета токов на остальных участках СЭС отражены на рис. 8.16, е. Симметричные составляющие напряжения основной фазы и фазные напряжения на шинах подстанции Г

$$\dot{U}_{*GA1} = \dot{E}_{*ф.г} - \dot{I}_{*GA1} z_{*1г} = j1 - 0,207 \exp(j8^\circ) j1 = 0,796 \exp(j87,5^\circ);$$

$$\dot{U}_{*GA2} = -\dot{I}_{*GA2} z_{*2г} = -0,207 \exp(j125^\circ) j1 = 0,207 \exp(j81,5^\circ);$$

$$\dot{U}_{*GA0} = \dot{U}_{*LA0} = -(a^2 \dot{E}_{*LA} - a \dot{E}_{*MA}) z_{*0L} / z_{*pez}^{(LM)} =$$

$$= -(a^2 - a) j1 j3,68 / (j8,61) = -0,74;$$

$$\dot{U}_{GA} = (\dot{U}_{*GA1} + \dot{U}_{*GA2} + \dot{U}_{*GA0}) U_{ф.6} =$$

$$= [0,796 \exp(j87,5^\circ) + 0,207 \exp(j81,5^\circ) - 0,74] \cdot 21,4 = 25,9 \exp(j124^\circ) \text{ кВ;}$$

$$\dot{U}_{GB} = (a^2 \dot{U}_{*GA1} + a \dot{U}_{*GA2} + \dot{U}_{*GA0}) U_{ф.6} = [a^2 \cdot 0,796 \exp(j87,5^\circ) +$$

$$+ a \cdot 0,207 \exp(j81,5^\circ) - 0,74] \cdot 21,4 = 12,2 \exp(j242,5^\circ) \text{ кВ;}$$

$$\dot{U}_{GC} = (a \dot{U}_{*GA1} + a^2 \dot{U}_{*GA2} + \dot{U}_{*GA0}) U_{ф.6} = [a \cdot 0,796 \exp(j87,5^\circ) +$$

$$+ a^2 \cdot 0,207 \exp(j81,5^\circ) - 0,74] \cdot 21,4 = 29,3 \exp(j201^\circ) \text{ кВ.}$$

Результаты расчета напряжений на шинах подстанций С отражены на рис. 8.16, е.

Пример 8.5. На линии СЭС напряжением 110 кВ в фазе А одновременно произошли однофазные КЗ в точке К и обрыв в начале линии в точках L — L' (рис. 8.17, а). Определить значения фазных токов в линии в месте КЗ и напряжения на шинах подстанций Г и Э (исходные данные для расчета указаны на рисунке).

Решение. Используем метод симметричных составляющих и расчетные соотношения для данного вида повреждения. На основании схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей (рис. 8.17, б—д) и исходя из базисных условий ($S_6 = 500 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $U_{ф.6} = 115 \sqrt{3} = 66,4 \text{ кВ}$; $I_6 = 500/(\sqrt{3} \times$

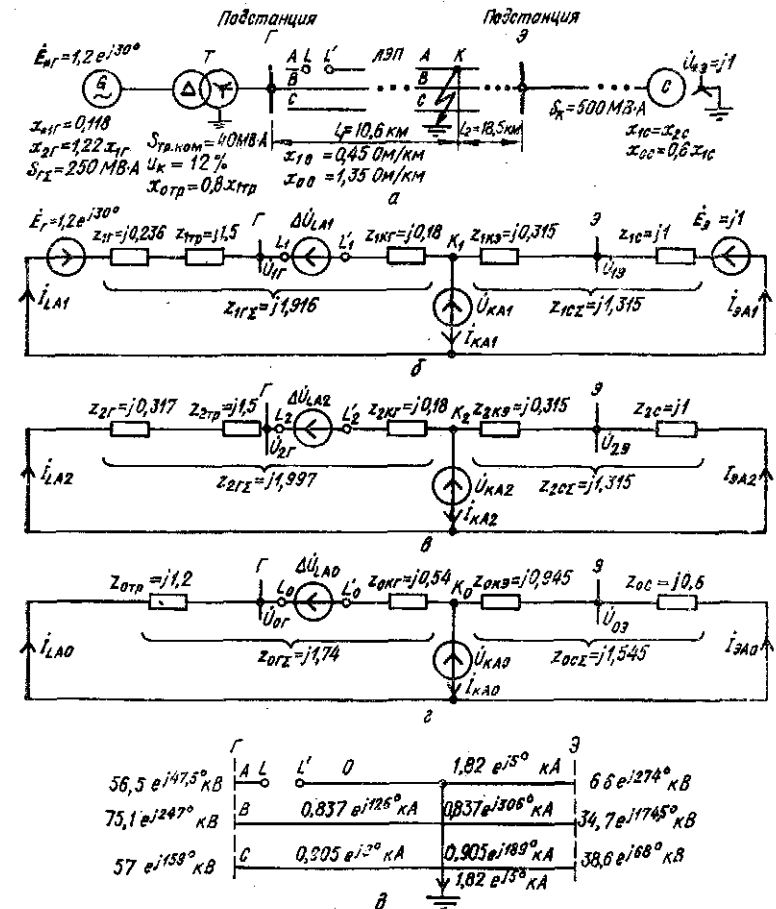


Рис. 8.17. К примеру 8.5

$\times 115) = 2,51$ кА) рассчитываем сопротивления в относительных единицах элементов:

$$\begin{aligned}x_{*1Г} &= x_{*Г} S_0 / S_{Г\Sigma} = 0,236; \\x_{*2Г} &= 1,22 x_{*1Г} = 1,22 \cdot 0,236 = 0,317; \\x_{*1тр} &= x_{*2тр} = u_k S_0 / (100 S_{тр.ном}) = 12 \cdot 500 / (100 \cdot 40) = 1,5; \\x_{*0тр} &= 0,8 x_{*1тр} = 0,8 \cdot 1,5 = 1,2; \\x_{*1к.г} &= x_{*2к.г} = x_{10} l_1 S_0 / U_{ср.ном}^2 = 0,45 \cdot 10,6 \cdot 50 / 115^2 = 0,18; \\x_{*0к.г} &= 3 x_{*1к.г} = 3 \cdot 0,18 = 0,54; \\x_{*1к.эк} &= 0,45 \cdot 18,5 \cdot 500 / 115^2 = 0,315; \\x_{*0к.эк} &= 3 \cdot 0,315 = 0,945; \\x_{*1с} &= x_{*2с} = S_0 / S_k = 500 / 500 = 1; \\x_{*0с} &= 0,6 x_{*1с} = 0,6 \cdot 1 = 0,6.\end{aligned}$$

Результирующие сопротивления схем замещения

$$\begin{aligned}z_{*1Г.рез} &= z_{*1Г} + z_{*2Г} + z_{*1к.г} = j0,236 + j1,5 + j0,18 = j1,916; \\z_{*2Г.рез} &= j0,317 + j1,5 + j0,18 = j1,997; \\z_{*0Г.рез} &= j1,2 + j0,54 = j1,74; \\z_{*1Срез} &= z_{*2Срез} = z_{*кЭ} + z_{*1с} = j0,315 + j1 = j1,315; \\z_{*0Срез} &= j0,945 + j0,6 = j1,545; \\z_{*1рез} &= z_{*1Г.рез} + z_{*1Срез} = j1,916 + j1,315 = j3,231; \\z_{*2рез} &= z_{*2Г.рез} + z_{*2Срез} = j1,997 + j1,315 = j3,312; \\z_{*0рез} &= z_{*0Г.рез} + z_{*0Срез} = j1,74 + j1,545 = j3,285; \\z_{*Срез}^{(1)} &= z_{*1Срез} + z_{*2Срез} + z_{*0Срез} = j1,315 + j1,315 + j1,545 = j4,175; \\z_{*С1-0} &= z_{*1Срез} - z_{*0Срез} = j1,315 - j1,545 = -j0,23; \\z_{*С1-2} &= z_{*1Срез} - z_{*Срез} = j1,315 - j1,315 = 0; \\z_{*С2-0} &= z_{*2Срез} - z_{*0Срез} = j1,315 - j1,545 = -j0,23; \\\Delta_{*А} &= z_{*1рез} z_{*2рез} + z_{*1рез} z_{*0рез} + z_{*2рез} z_{*0рез} = \\&= (3,231 \cdot 3,312 + 3,231 \cdot 3,285 + 3,312 \cdot 3,285) j^2 = -32,195; \\\Delta_{*} &= z_{*Срез}^{(1)} \Delta_{*А} - z_{*0Срез} z_{*С1-2}^2 - z_{*2рез} z_{*С1-0}^2 - \\&- z_{*0рез} z_{*С2-0}^2 = j4,175 (-32,195) - 0 - j3,3 = -j134,1.\end{aligned}$$

Симметричные составляющие токов основной фазы А и токи фаз на различных участках СЭС (используем расчетные выражения табл. 8.2):
ветвь с разрывом в точках L и L'

$$\begin{aligned}i_{*LA1} &= [1,2 \exp(j30^\circ) - j1] [(j3,312 + j3,285) / j4,175 - \\&- (-j0,23) / (-j134,1) + j1 (0 - j0,23 \cdot j3,312) / (-j134,1) = 0,23 \exp(j248^\circ); \\i_{*LA2} &= [1,2 \exp(j30^\circ) - j1] [(-j0,23)^2 - j3,285 / j4,175] / (-j134,1) + \\&+ j1 (-j3,123 \cdot j0,23) / (-j134,1) = 0,112 \exp(j72^\circ);\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}i_{*LA0} &= -[1,2 \exp(j30^\circ) - j1] j3,312 / j4,175 / (-j134,1) - \\&- j1 (-j3,231 / j0,23) / (-j134,1) = 0,119 \exp(j64^\circ); \\i_{*LA} &= i_{*LA1} + i_{*LA2} + i_{*LA0} = 0,23 \exp(j248^\circ) + \\&+ 0,112 \exp(j72^\circ) + 0,119 \exp(j64^\circ) \approx 0;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}i_{LB} &= (a^2) i_{*LA1} + a i_{*LA2} + i_{*LA0} I_0 = |a^2 \cdot 0,23 \exp(j248^\circ) + \\&+ a \cdot 0,112 \exp(j72^\circ) + 0,119 \exp(j64^\circ)| \cdot 2,51 = 0,837 \exp(j126^\circ) \text{ кА}; \\i_{LC} &= (a) i_{*LA1} + a^2 i_{*LA2} + i_{*LA0} I_0 = |a \cdot 0,23 \exp(j248^\circ) + \\&+ a^2 \cdot 0,112 \exp(j72^\circ) + 0,119 \exp(j64^\circ)| \cdot 2,51 = 0,905 \exp(j9^\circ) \text{ кА};\end{aligned}$$

ветвь однофазного КЗ в точке K

$$\begin{aligned}i_{*KA1} &= i_{*KA2} = i_{*KA0} = [1,2 \exp(j30^\circ) - j1] (-j3,312 \cdot j0,23) / (-j134,1) + \\&+ j1 \cdot 32,195 / (-j134,1) = 0,242 \exp(j5^\circ); \\i_{KA} &= 3 i_{*KA1} I_0 = 3 \cdot 0,242 \exp(j5^\circ) \cdot 2,51 = 1,82 \exp(j5^\circ) \text{ кА};\end{aligned}$$

ветвь «точка K — подстанция Э» (симметричные составляющие токов рассчитываем с использованием закона Кирхгофа для узла K)

$$\begin{aligned}i_{*ЭA1} &= i_{*KA1} - i_{*LA1} = 0,242 \exp(j5^\circ) - 0,23 \exp(j248^\circ) = 0,396 \exp(j34^\circ); \\i_{*ЭA2} &= 0,242 \exp(j5^\circ) - 0,112 \exp(j72^\circ) = 0,23 \exp(j334^\circ); \\i_{*ЭA0} &= 0,242 \exp(j5^\circ) - 0,119 \exp(j64^\circ) = 0,215 \exp(j332^\circ); \\i_{ЭA} &= (i_{*ЭA1} + i_{*ЭA2} + i_{*ЭA0}) I_0 = [0,396 \exp(j34^\circ) + \\&+ 0,23 \exp(j334^\circ) + 0,215 \exp(j332^\circ)] \cdot 2,51 = 1,82 \exp(j5^\circ) \text{ кА}; \\i_{ЭB} &= [a^2 \cdot 0,396 \exp(j34^\circ) + a \cdot 0,23 \exp(j334^\circ) + 0,215 \exp(j332^\circ)] \cdot 2,51 = \\&= 0,837 \exp(j306^\circ) \text{ кА}; \\i_{ЭC} &= [a \cdot 0,396 \exp(j34^\circ) + a^2 \cdot 0,23 \exp(j334^\circ) + 0,215 \exp(j332^\circ)] \cdot 2,51 = \\&= 0,905 \exp(j189^\circ) \text{ кА}.\end{aligned}$$

Результаты расчета фазных токов отражены на рис. 8.17, б.
Симметричные составляющие напряжения основной фазы и фазные напряжения на шинах подстанции Г

$$\begin{aligned}U_{*ГA1} &= E_{*Г} - i_{*LA1} (z_{*1Г} + z_{*1тр}) = 1,2 \exp(j30^\circ) - \\&- 0,23 \exp(j248^\circ) (j0,236 + j1,5) = 0,98 \exp(j50^\circ); \\U_{*ГA2} &= -i_{*LA2} (z_{*2Г} + z_{*2тр}) = -0,112 \exp(j72^\circ) (j0,317 + j1,5) = \\&= 0,203 \exp(j200^\circ); \\U_{*ГA0} &= -i_{*LA0} z_{*0тр} = -0,119 \exp(j64^\circ) j1,2 = 0,142 \exp(j334^\circ); \\U_{ГA} &= (U_{*ГA1} + U_{*ГA2} + U_{*ГA0}) U_{ф.б} = [0,98 \exp(j50^\circ) + \\&+ 0,203 \exp(j200^\circ) + 0,142 \exp(j334^\circ)] \cdot 66,4 = 56,5 \exp(j47,5^\circ) \text{ кВ}; \\U_{ГB} &= [a^2 \cdot 0,98 \exp(j50^\circ) + a \cdot 0,203 \exp(j200^\circ) + 0,142 \exp(j334^\circ)] \cdot 66,4 = \\&= 75,1 \exp(j247^\circ) \text{ кВ};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ГС} &= [a \cdot 0,98 \exp(j50^\circ) + a^2 \cdot 0,203 \exp(j200^\circ) + 0,142 \exp(j334^\circ)] \cdot 66,4 = \\ &= 57 \exp(j159^\circ) \text{ кВ.} \end{aligned}$$

Результаты расчета напряжений на шинах подстанции Э отражены на рис. 8.17, д.

Контрольные вопросы

1. Какими примерами можно охарактеризовать продольную несимметрию в СЭС предприятия?
2. Каков порядок действий при анализе продольной несимметрии по методу симметричных составляющих?
3. Какой вид имеет комплексная схема замещения для случая разрыва фазы (включения в фазу сопротивления)?
4. Какой вид имеет комплексная схема замещения для случая включения в две фазы одинаковых сопротивлений (разрыва двух фаз)?
5. Каковы граничные условия для двойного замыкания на землю в разных точках сети и фазах?
6. Какова последовательность действий при анализе сложных видов повреждений по методу симметричных составляющих?
7. Какие исходные расчетные условия и приемы используют при анализе продольной несимметрии?

Темы рефератов

1. Расчетная оценка режима работы трехфазной сети при перегорании предохранителя в одной (двух) фазе.
2. Различие несимметричных режимов при разрыве двух фаз и включении в них одинаковых сопротивлений.
3. Характеристика несимметричного режима по изменению токов и напряжений при отключении фазы с КЗ на землю и при повторном включении поврежденной фазы.

Глава 9

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ОСОБЫХ УСЛОВИЯХ

9.1. Короткие замыкания в питающих сетях

При КЗ в сетях напряжением 330 кВ и выше, кроме периодической и аperiodической составляющих, можно выделить также высшие гармонические составляющие. Последние обусловлены распределенной поперечной емкостью ЛЭП. При наличии в ЛЭП сосредоточенной продольной емкости ток КЗ содержит также субгармоническую составляющую с пониженной частотой по сравнению с промышленной. Расчет составляющих тока КЗ с учетом емкостей ЛЭП при КЗ в различных точках сети легко выполняется с помощью цифровых ЭВМ.

Расчетная схема для одного из условий, показанная на рис. 9.1, позволяет установить общие зависимости для расчета токов КЗ в гаках ЛЭП. При отсутствии продольной емкости в ЛЭП (КЗ в точке

K_1 — на шинах источника, в точке K_2 — за трансформатором) полный ток в месте трехфазного КЗ содержит только периодическую (промышленной частоты) и аperiodическую составляющие. Эти составляющие так же, как и ударный ток КЗ, определяют по известным формулам. Аналогично рассчитывают ток КЗ при наличии продольной емкости, если КЗ возникает за некоторым сопротивлением (точка K_3). При этом в суммарном сопротивлении ЛЭП учитывают сопротивление $x_k = -1/(\omega C_k)$, где C_k — продольная емкость; ω — промышленная частота.

При трехфазном КЗ в любой точке ЛЭП полный ток КЗ состоит из суммы токов i_1 и i_2 , создаваемых источниками, расположенными

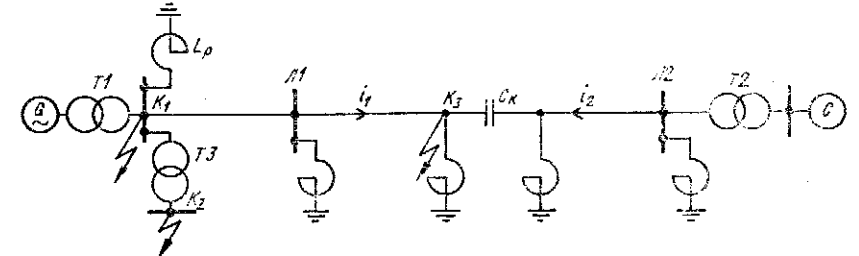


Рис. 9.1. Расчетная схема для одного из рассматриваемых условий

по разные стороны от продольной емкости. Учитывают также расположение точки КЗ относительно емкости и источников. Ток КЗ, создаваемый генераторами (точка КЗ и источник — на одной стороне относительно продольной емкости), состоит из периодической составляющей промышленной частоты, а также свободных периодических и аperiodических составляющих. Его определяют по зависимостям, относящимся к случаю отсутствия продольной емкости.

Ток КЗ, создаваемый системой, которая по отношению к точке КЗ находится за продольной емкостью (точки K_1 и K_3), содержит периодическую составляющую промышленной частоты, свободные периодические и субгармоническую составляющие. Последнюю в общем случае рассчитывают по формуле

$$I_{с \max} = (\sqrt{2} E'' / (\sqrt{3} x_{\text{рез}})) e^{-t/T_c} \cos \omega_c t, \quad (9.1)$$

где $x_{\text{рез}} = \omega_c L_{\text{рез}} - x_k$ — результирующее реактивное сопротивление; $T_c = 2L_{\text{рез}}/r_{\text{рез}}$ — постоянная времени затухания тока субгармоники; $L_{\text{рез}}, r_{\text{рез}}$ — результирующие значения индуктивности и активного сопротивления всех элементов схемы, расположенных по отношению к точке КЗ с той стороны, что и продольная емкость; $\omega_c = 1/\sqrt{L_{\text{рез}}C_{\text{рез}}}$ — угловая частота тока субгармоники.

Ударный ток КЗ, создаваемый источником, связанным с точкой КЗ сосредоточенной продольной емкостью,

$$i_{y \max} = \sqrt{2} E'' (1 + e^{-t_y/T_c}) / (\sqrt{3} x_{\text{рез}}), \quad (9.2)$$

где $t_y = \pi/(\omega - \omega_c)$ — момент появления ударного тока (из-за наличия продольной емкости $t_y > 0,01$ с).

Таким образом, полный ток трехфазного КЗ для рассматриваемых условий приближенно определяется выражением

$$I_{\max} = (I_{n1 \max} + I_{n2 \max} + I_{c0 \max} e^{-t/T_c}) \sin[(\omega - \omega_0)t/2] + I_{a0} e^{-t/T_a}, \quad (9.3)$$

где $I_{n1 \max}$, $I_{n2 \max}$ — соответственно амплитуды периодической составляющей тока промышленной частоты генераторов станции и системы, причем $I_{n1 \max} = \sqrt{2}E''/(V\sqrt{3}x_{1\text{рез}})$; $I_{n2 \max} = \sqrt{2}E''/(V\sqrt{3}x_{2\text{рез}})$; $I_{c0 \max} = \sqrt{2}E''/(V\sqrt{3}x_{2\text{рез}})$ — начальное значение амплитуды тока субгармоники; $I_{a0} = \sqrt{2}E''/(V\sqrt{3}x_{1\text{рез}})$ — начальное значение аperiodической составляющей тока генератора; $x_{1\text{рез}}$, $x_{2\text{рез}}$ — результирующие сопротивления всех элементов схемы до точки КЗ для соответствующих источников;

$$T_c = 2L_{2\text{рез}}/r_{2\text{рез}}; \quad T_a = L_{1\text{рез}}/r_{1\text{рез}}; \quad \omega_0 = 1/\sqrt{L_{2\text{рез}}C_k}.$$

Ударный ток рассчитывают по формуле

$$i_{y \max} = \sqrt{2}E''(1 + e^{-t/T_a})/(V\sqrt{3}x_{1\text{рез}}) + \sqrt{2}E''(1 + e^{-t/T_c})/(V\sqrt{3}x_{2\text{рез}}). \quad (9.4)$$

В ЛЭП напряжением 330 кВ и выше по мере удаления от источника питания периодическая составляющая тока КЗ убывает. Свободные периодические составляющие в полном токе КЗ при этом возрастают.

Отделение от ЭЭС синхронного генератора или группы генераторов обычно происходит при отключении КЗ. После некоторой паузы при АПВ генераторов на КЗ начальный ток повторного КЗ может превышать начальный ток первого повреждения, что нужно учитывать при выборе или проверке аппаратов и проводников по условиям аварийного режима.

Расчетные условия определяются реактивной мощностью, сбрасываемой генератором во время паузы АПВ, параметрами применяемой системы возбуждения генератора, пределами регулирования возбуждения, длительностью первого КЗ и его удаленностью, а также временем паузы АПВ. Рост сбрасываемой генератором реактивной мощности, приближение внешнего сопротивления к 0,6—0,7 относительных единиц при номинальных параметрах генератора и увеличение длительности первоначального аварийного режима сопровождаются возрастанием отношения начального тока повторного КЗ к начальному току первого повреждения. Начальный ток повторного КЗ не превышает начальный ток первого повреждения при:

отключении гидрогенератора от ЭЭС по истечении не более 0,5 с, а турбогенератора — не более 1 с с момента возникновения аварийного режима;

оснащении отключаемых генераторов вентильной системой возбуждения, если пауза АПВ не превышает 0,7 с с момента отключения турбогенератора и 1 с с момента отключения гидрогенератора. В этом случае ток первого повреждения является расчетным при выборе или проверке аппаратов и проводников по условиям КЗ.

Генератор может быть оснащен небыстродействующей системой возбуждения (машинный возбудитель) с напряжением возбуждения при расфорсировке, соответствующим возбуждению генератора на холостом ходу. Поэтому при длительности аварийного режима более 1 с, удаленности КЗ в 0,6—0,7 относительных единиц и полном сбросе генератором реактивной мощности начальный ток повторного КЗ превышает ток первого повреждения на 20—25 %. В рассматриваемых условиях независимо от длительности паузы АПВ расчетным током является начальный ток повторного КЗ. Последний на 25 % больше начального тока первого повреждения.

9.2. Короткие замыкания в сетях постоянного тока

Постоянный ток может применяться для питания сетей внутризаводского электрического транспорта, электропривода, электролизных и зарядных установок. Системы постоянного тока для цепей сигнализации и диспетчеризации обычно имеют малую мощность. Процессы при КЗ во всех сетях постоянного тока одинаковы. КЗ в этих сетях возникают в основном по тем же причинам, что и в сетях переменного тока. Аварийные режимы возможны при недопустимых перегрузках, выходе из строя отдельных элементов силовой схемы выпрямителя или нарушениях в его системах управления и авто-

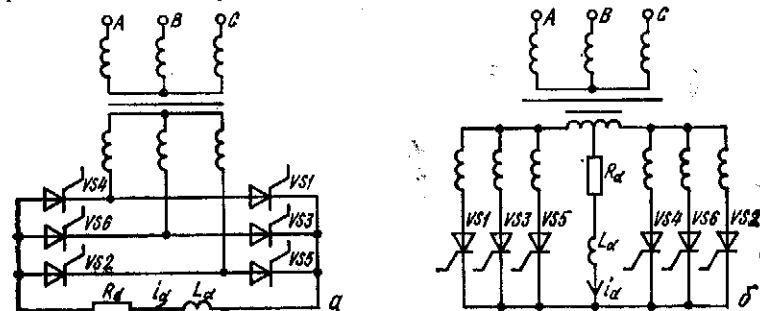


Рис. 9.2. Схемы выпрямления переменного тока

матического регулирования. Расчет этих режимов необходим для выбора параметров силовой схемы преобразователя и средств защиты.

Аварии можно разделить на *внешние* и *внутренние* (неисправность элементов силовой схемы, повреждение одного из вентилей моста). Внешние аварии могут вызывать выход из строя вентилей и развитие внутренней аварии.

Рассмотрим аварийные режимы для двух схем выпрямления: широко распространенной трехфазной мостовой (рис. 9.2, а) и шестифазной с уравнительным реактором (рис. 9.2, б). Примем следующие допущения:

параметры силовых элементов выпрямителя линейны;

нелинейность внешней характеристики выпрямителя вследствие изменения числа коммутируемых вентилей в процессе КЗ учитыва-

ется только при больших длительностях переходного процесса и малой удаленности КЗ;

трехфазная система питания симметрична и уравновешенна; намагничивающие токи трансформаторов и соответственные емкости элементов электрооборудования малы; авария возникает при установившемся режиме питающей сети. Эти допущения позволяют получить результаты, удовлетворяющие требованиям практики.

Ток внешнего КЗ выпрямителя при токе нагрузки I_d в переходном режиме определяется выражением

$$i_k = I_k (1 - e^{-R_d t / L_d}) + I_d e^{-R_d t / L_d}, \quad (9.5)$$

причем внешняя характеристика выпрямителя, исходя из характера его электромагнитных процессов и возможных условий КЗ, состоит из двух участков: прямолинейного и эллиптического.

Установившийся ток КЗ зависит от схемы выпрямителя, режима его работы и параметров цепи. При малых значениях аварийного тока (удаленные КЗ) и поочередной работе двух-трех вентилях схемы, когда внешняя характеристика выпрямителя прямолинейна (угол коммутации вентилях $\gamma < 60^\circ$, режим 1), для рассматриваемых схем выпрямления имеем соответственно

$$\left. \begin{aligned} I_{ка} &= 1,35U_{2л} (1 \pm \Delta u_c / 100) / [r_{рез} + 0,955(x_c + x_{тр}/n)]; \\ I_{кб} &= 0,675U_{2л} (1 \pm \Delta u_c / 100) / [r_{рез} + 0,239(x_c + x_{тр}/n)], \end{aligned} \right\} \quad (9.6)$$

где $U_{2л}$ — вторичное линейное напряжение трансформатора, питающего выпрямитель, В; Δu_c — изменения напряжения питающей сети, %; n — число параллельно работающих выпрямителей.

При больших значениях аварийного тока (КЗ вблизи выпрямителя) и одновременной работе трех вентилях схемы, когда внешняя характеристика выпрямителя эллиптическая (угол $\gamma = 60^\circ$, режим 2),

$$\left. \begin{aligned} I_{ка} &= 1,17U_{2л} (1 \pm \Delta u_c / 100) / \sqrt{r_{рез}^2 + \left[\frac{3}{2}(x_c + x_{тр}/n) \right]^2}; \\ I_{кб} &= 0,585U_{2л} (1 \pm \Delta u_c / 100) / \sqrt{r_{рез}^2 + \left[\frac{3}{8}(x_c + x_{тр}/n) \right]^2}. \end{aligned} \right\} \quad (9.7)$$

Активные сопротивления выпрямителей при КЗ определяются выражениями

$$\left. \begin{aligned} r_{реза} &= 3r_{тр}/(2n) + r_{вн} + r_d; \\ r_{резб} &= 3r_{тр}/(8n) + r_{вн} + r_d; \end{aligned} \right\} \quad (9.8)$$

индуктивности в режиме 1 — выражениями

$$\left. \begin{aligned} L_{реза} &= 0,955(x_c + x_{тр}/n)/\omega + L_{вн}; \\ L_{резб} &= 0,239(x_c + x_{тр}/n)/\omega + L_{вн}, \end{aligned} \right\} \quad (9.9, а)$$

а в режиме 2 — выражениями

$$\left. \begin{aligned} L_{реза} &= 3(x_c + x_{тр}/n)/(2\omega) + L_{вн}; \\ L_{резб} &= 3(x_c + x_{тр}/n)/(8\omega) + L_{вн}. \end{aligned} \right\} \quad (9.9, б)$$

Сопротивление $r_{вн}$ состоит из сопротивления короткозамкнутой цепи постоянного тока и сопротивления дуги $r_d = 0,01 \div 0,015$ Ом.

Токи КЗ на шинах выпрямителей при сопротивлении дуги $r_d = 0$ для рассматриваемых схем можно рассчитать по формулам

$$\left. \begin{aligned} I_{ка} &= 0,78U_{2л} (1 \pm \Delta u_c / 100) \sqrt{r_{тр}^2 + (x_c + x_{тр})^2}; \\ I_{кб} &= 1,56U_{2л} (1 \pm \Delta u_c / 100) \sqrt{r_{тр}^2 + (x_c + x_{тр})^2}, \end{aligned} \right\} \quad (9.10)$$

где сопротивления x_c , $r_{тр}$, $x_{тр}$ в омах определяются выражениями

$$\begin{aligned} x_c &= U_{2л}^2 \cdot 10^{-6} / S_k; & r_{тр} &= P_M U_{2л}^2 \cdot 10^{-3} / S_{тр}^2; \\ x_{тр} &= U_{2л}^2 \cdot 10^{-5} \sqrt{u_k^2 - (100P_M / S_{тр})^2} / S_{тр}, \end{aligned}$$

а S_k — мощность КЗ на шинах переменного тока; P_M — мощность потерь в обмотках трансформатора при КЗ.

Переход от режима 1 к режиму 2 происходит при значениях аварийного тока выпрямителей, равных

$$\left. \begin{aligned} I_{к.л1} &= 0,26U_{2л} (1 \pm \Delta u_c / 100) / (x_c + x_{тр}); \\ I_{к.л2} &= 0,52U_{2л} (1 \pm \Delta u_c / 100) / (x_c + x_{тр}). \end{aligned} \right\} \quad (9.11)$$

При меньших или больших значениях токов КЗ, чем значение $I_{к.л}$, для их определения необходимо использовать соответственно выражения (9.6) и (9.7).

Внутреннее КЗ, вызванное пробоем вентиля трехфазного мостового выпрямителя, находят следующим образом. По параметрам

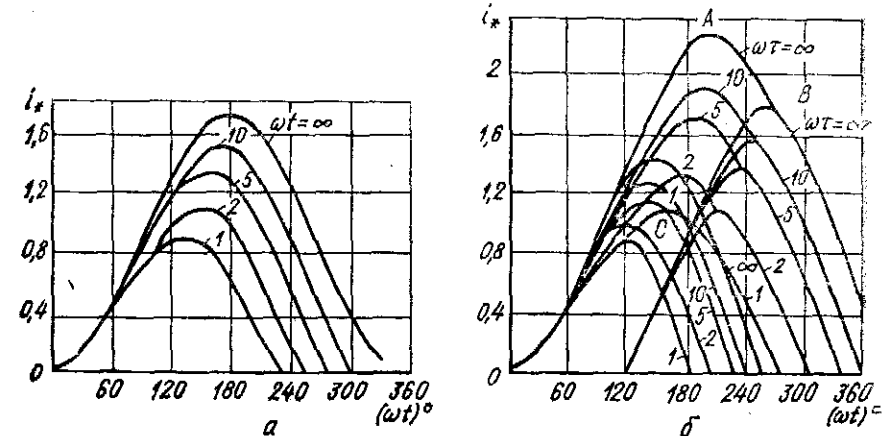


Рис. 9.3. К расчету мгновенных значений аварийного тока тиристоры при внутреннем КЗ и блокировании импульсов управления до очередной коммутации (а) и после первой коммутации (б)

трансформатора определяют отношение X_a/R_a , где $X_a = \omega L_a$ и R_a — суммарные индуктивные и активные сопротивления одной фазы, и рассчитывают максимальный базисный ток в схеме

$$I_{6 \max} = \sqrt{2} U_{2\phi} / \sqrt{X_a^2 + R_a^2} \quad (9.12)$$

Мгновенные значения аварийного тока тиристоры и диодов при использовании расчетных кривых на рис. 9.3 и 9.4 составляют

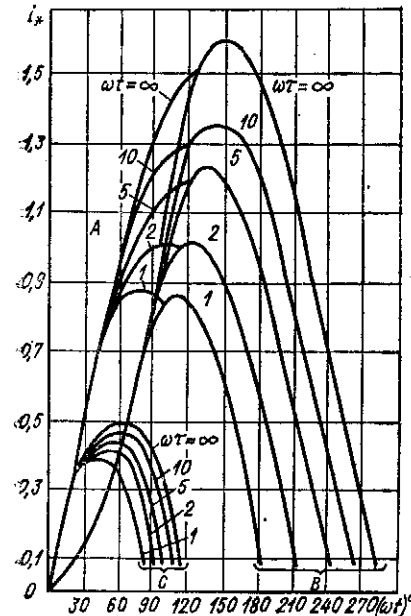


Рис. 9.4. К расчету мгновенных значений аварийного тока диодов при внутреннем КЗ в момент приложения максимального обратного напряжения

после начала развития аварии. Это объясняется тем, что обратное напряжение действует на пробитый вентиль в наибольшую часть периода питающего напряжения.

Источники энергии могут быть связаны с местом КЗ посредством ЛЭП постоянного тока. Учет этих источников при расчете токов КЗ с целью выбора или проверки аппаратов и проводников зависит от места КЗ и типа преобразовательного агрегата. Когда точка КЗ находится в цепи переменного тока выпрямителя, последний необходимо вводить в схему замещения прямой последовательности в виде постоянной нагрузки (постоянного шунта). Параметры шунта определяются предшествующей нагрузкой электропередачи. В схему замещения обратной последовательности выпрямитель не вводится. Схема замещения нулевой последовательности

содержит только трансформаторы выпрямителя с соединением их обмоток по схеме ∇/Δ . Если точка КЗ расположена в цепи переменного тока инвертора, то последний вводится в схему замещения прямой последовательности в виде шунта. Сопротивление шунта $z_{ш}$ зависит от места КЗ и расчетного момента времени. При КЗ вблизи инвертора (возможно нарушение его устойчивости — опрокидывание) для момента времени $0-0,02$ с значение $z_{ш}$ принимают, исходя из предшествующей нагрузки. Для последующих моментов времени $z_{ш} = jx_{тр.н}$, где $x_{тр.н}$ — суммарное сопротивление трансформаторов инверторов.

По значению отношения X_a/R_a и графическим зависимостям, показанным на рис. 9.5 и 9.6, находят относительное значение теплового эквивалента A_T , которое затем преобразуют в абсолютное по формуле

$$W = I_{6 \max} A_T / \omega.$$

Как видно, пробой вентиля в момент окончания коммутации является самым тяжелым по сравнению с пробоями в другие моменты

после начала развития аварии. Это объясняется тем, что обратное напряжение действует на пробитый вентиль в наибольшую часть периода питающего напряжения.

Источники энергии могут быть связаны с местом КЗ посредством ЛЭП постоянного тока. Учет этих источников при расчете токов КЗ с целью выбора или проверки аппаратов и проводников зависит от места КЗ и типа преобразовательного агрегата. Когда точка КЗ находится в цепи переменного тока выпрямителя, последний необходимо вводить в схему замещения прямой последовательности в виде постоянной нагрузки (постоянного шунта). Параметры шунта определяются предшествующей нагрузкой электропередачи. В схему замещения обратной последовательности выпрямитель не вводится. Схема замещения нулевой последовательности

содержит только трансформаторы выпрямителя с соединением их обмоток по схеме ∇/Δ .

Если точка КЗ расположена в цепи переменного тока инвертора, то последний вводится в схему замещения прямой последовательности в виде шунта. Сопротивление шунта $z_{ш}$ зависит от места КЗ и расчетного момента времени. При КЗ вблизи инвертора (возможно нарушение его устойчивости — опрокидывание) для момента времени $0-0,02$ с значение $z_{ш}$ принимают, исходя из предшествующей нагрузки. Для последующих моментов времени $z_{ш} = jx_{тр.н}$, где $x_{тр.н}$ — суммарное сопротивление трансформаторов инверторов.

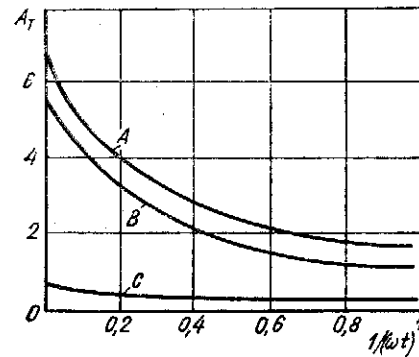


Рис. 9.5. Кривые относительного значения теплового эквивалента при внутреннем КЗ неуправляемого выпрямителя

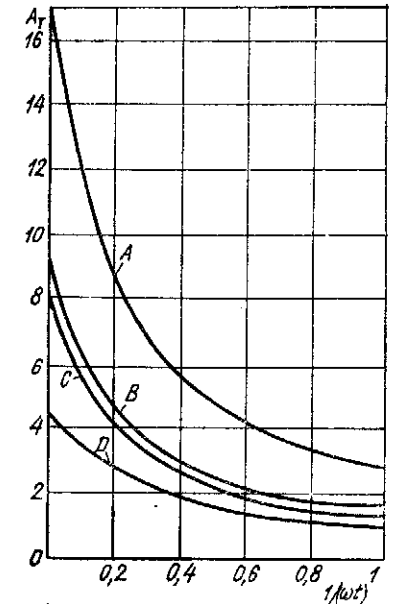


Рис. 9.6. Кривые относительного теплового эквивалента при внутреннем КЗ и блокировании импульсов управления до первой коммутации (кривые B), после первой коммутации для пробитого тиристора (кривые A) и тиристоры цепи подпитки (кривые C и D)

Если при КЗ инвертор не опрокидывается, то для любого момента времени $z_{ш} = U_{ост} z_n / U_{ост}$, где $U_{ост}$ — остаточное напряжение на шинах инвертора при КЗ (без учета электропередачи постоянного тока); z_n — сопротивление шунта, определяемое предшествующей нагрузкой; $U_{ост}$ — остаточное напряжение на шинах инвертора до КЗ. В схему замещения обратной последовательности инвертор не вводят. Схема замещения нулевой последовательности содержит только трансформаторы инвертора с соединением их обмоток по схеме ∇/Δ .

Когда КЗ приводит к снятию импульсов управления инвертора, то для любых моментов времени (вплоть до нового включения электропередачи) $z_{ш} = \infty$.

9.3. Короткие замыкания в сетях повышенной частоты

Электромагнитные процессы в сетях повышенной частоты (до 10 000 Гц) при аварийных режимах рассчитывают по тем же условиям и формулам, что и в сетях промышленной частоты (50 Гц). При работе на повышенных частотах проявляются поверхностный эффект и эффект близости. Поэтому ток по сечению провода распределяется неравномерно. Глубина проникновения тока в проводник из немагнитного материала определяется выражением

$$\Delta = 5030 \sqrt{\rho/f},$$

где ρ — удельное сопротивление проводника, Ом · см; f — частота тока, Гц.

Величина Δ уменьшается с увеличением частоты и поперечного сечения проводника. Активное и индуктивное сопротивления проводника при этом возрастают, что вызывает уменьшение допустимого длительного тока нагрузки и увеличение потери напряжения. В проводниках сечением 10 мм² и менее коэффициент поверхностного эффекта незначителен и при расчетах сетей повышенной частоты его не учитывают.

Эффект близости определяет перераспределение переменного тока в проводнике в случае приближения к нему другого проводника с током или проводника с наведенным током. Он существует при любой конфигурации сечения проводников.

С повышением частоты уменьшаются размеры и масса магнитопровода электрических машин и трансформаторов. Электрические сети повышенной частоты более металлоемкие, чем сети промышленной частоты, ввиду больших сечений проводников. В целом электроустановки повышенной частоты легче и меньше по размерам аналогичных установок промышленной частоты. Для питания сетей и установок повышенной частоты применяются тиристорные преобразователи частоты.

Основной задачей расчета и анализа аварийных режимов в сетях повышенной частоты является определение их параметров при междуфазных и однофазных КЗ на корпус (землю), перегрузках, снижении напряжения или при его кратковременном отключении. Электрические сети повышенной частоты выполняются в виде шиннопроводов и кабелей, а также изолированных проводов, проложенных открыто или в стальных трубах. Проводники для них обычно выбираются по допустимым нагреву и потере напряжения, затем проверяются по токам КЗ.

В [12] помещены данные о допустимых длительных токовых нагрузках на кабели и провода с медными и алюминиевыми жилами сечением 16 мм² и более, а также при кратковременных нагрузках, обусловленных КЗ, в случае протекания по ним трехфазного однофазного тока частотой от 200 до 8000 Гц.

Аварийные режимы в сетях повышенной частоты рассчитываются с учетом соответствующей схемы распределения электрической

энергии: радиальной, магистральной или магистрально-радиальной. Радиальная схема применяется для отдельных потребителей достаточно большой мощности (более 20 кВт), если питающий пункт находится приблизительно в центре этих нагрузок. При магистральной схеме одна линия — магистраль питает электрической энергией повышенной частоты несколько приемников сравнительно небольшой мощности (менее 20 кВт), присоединенных к ней в различных точках. При радиальной схеме применяются кабели или провода в трубах, при магистральной — токопроводы.

9.4. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью

Этот вид замыкания наиболее распространен в сетях с малым током замыкания на землю. Процессы, протекающие в таких сетях при замыкании на землю, весьма сложны, что затрудняет их анализ и оценку. Они существенно зависят от параметров и схемы сети, сопротивления цепи замыкания.

Сопротивление нулевой последовательности в сетях напряжением 6—35 кВ определяется в основном емкостью элементов сети относительно земли и, в меньшей степени, утечками этих элементов. Поэтому замыкания на землю в сетях 6—35 кВ сопровождаются протеканием малых токов повреждения, которые могут быть во много раз меньше тока нагрузки. Это особенно характерно для

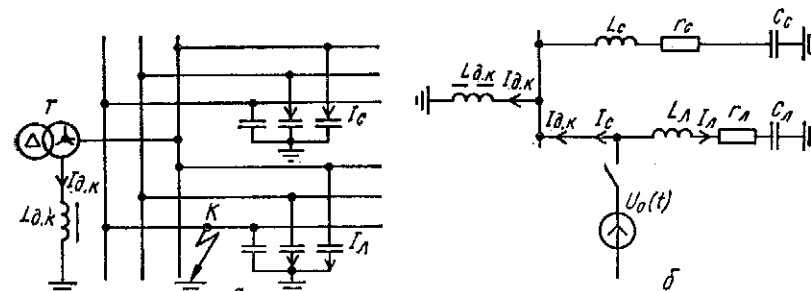


Рис. 9.7. Схема сети (а) и ее замещение схемой нулевой последовательности (б)

сетей с ВЛ напряжением 6—10 кВ, где емкость проводов относительно земли невелика. В сетях с КЛ, а также в сетях с протяженными ВЛ напряжением 10—35 кВ токи замыкания на землю могут быть значительными.

По условиям улучшения гашения дуги и предотвращения перехода замыкания на землю в междуфазное КЗ в рассматриваемых сетях устанавливают дугогасящие катушки, с помощью которых компенсируется основная гармоника емкостного тока замыкания на землю. В итоге результирующий ток повреждения в таких сетях в установившемся режиме резко уменьшается. При замыкании на землю (рис. 9.7, а) ток, протекающий по поврежденному соеди-

нению, равен сумме токов неповрежденных элементов, определяемых емкостью и активным сопротивлением изоляции относительно земли каждого из них, и тока дугогасящей катушки при ее наличии.

В некомпенсированных сетях токи основной гармоники на поврежденном и неповрежденном присоединениях направлены в противоположные стороны. Это объясняется расположением источника напряжения нулевой последовательности в месте замыкания (рис. 9.7, б). Поэтому ток I_C , определяемый емкостным сопротивлением неповрежденной сети, протекает в поврежденном элементе в направлении к шинам, а в неповрежденном — от них.

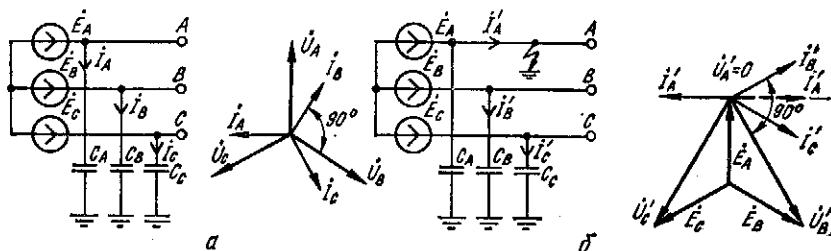


Рис. 9.8. Схема замещения и векторные диаграммы напряжений и емкостных токов сети с изолированной нейтралью для нормального режима (а) и однофазного КЗ на землю (б)

При включении дугогасящей катушки $L_{д.к.}$ в нейтраль одного из трансформаторов на поврежденном участке фаза основной гармоники тока повреждения будет зависеть от соотношения между емкостью неповрежденных участков и индуктивностью катушки. Если преобладает индуктивная составляющая тока повреждения, то фазы реактивных составляющих тока повреждения одинаковы как на неповрежденном (емкостный ток, направлен в сторону линии), так и на поврежденном (индуктивный ток, направлен в сторону шин) присоединениях.

Значение и фаза токов замыкания на землю определяются напряжением нулевой последовательности U_0 . Наибольшее значение U_0 будет при замыканиях на землю без переходного сопротивления и равно фазному напряжению сети. При замыканиях через переходное сопротивление значение U_0 определяется соотношением между сопротивлением нулевой последовательности и переходным сопротивлением. Угол между напряжением U_0 и током замыкания на землю всегда одинаков и равен углу сопротивления нулевой последовательности сети. Наличие переходного сопротивления уменьшает значение и сдвигает фазу U_0 относительно фазного напряжения.

Для анализа токов однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью рассмотрим соответствующие схемы замещения и векторные диаграммы (рис. 9.8). Введем ряд допущений, исходя из целей и постановки практических задач расчета аварийных режимов сети:

1) емкости отдельных фаз относительно земли, равномерно распределенные вдоль проводов, заменяем эквивалентными сосредоточенными емкостями $C_A = C_B = C_C = C$, включенными по середине ЛЭП;

2) не учитываем проводимости утечек, а также активные и индуктивные сопротивления ЛЭП, которые ничтожно малы по сравнению с емкостными сопротивлениями фаз относительно земли;

3) сопротивления нагрузки и ЛЭП (фазные напряжения) считаем симметричными.

Емкостные токи фаз $I_A = j\omega C U_A$, $I_B = j\omega C U_B$, $I_C = j\omega C U_C$ равны по значению, а по фазе опережают соответствующие напряжения на угол 90° . В нормальном режиме сумма токов равна нулю (рис. 9.8, а). Напряжение нейтрали (между нулевой точкой сети и землей) определяется выражением

$$U_{00} = (E_A Y_A + E_B Y_B + E_C Y_C) / (Y_A + Y_B + Y_C) = 0, \quad (9.13)$$

где $Y_A = Y_B = Y_C = j\omega C$ — емкостные проводимости отдельных фаз в нормальном режиме.

В случае замыкания на землю без переходного сопротивления в точке повреждения аварийная фаза A приобретает потенциал земли (рис. 9.8, б). Поэтому $U'_A = 0$, $Y_A = \infty$. Напряжение нейтрали U_{00} становится равным $-E_A$. Напряжения неповрежденных фаз по отношению к земле возрастают в $\sqrt{3}$ раза и составляют

$$U'_B = \sqrt{3} E_A e^{-j150^\circ}; \quad U'_C = \sqrt{3} E_A e^{-j150^\circ}.$$

Емкостные токи фаз также увеличиваются в $\sqrt{3}$ раза. Опережая напряжения U'_B и U'_C на 90° , эти токи суммируются в земле и возвращаются через поврежденную фазу, ток которой равен току замыкания на землю:

$$I_{3A}^{(1)} = 3I_0 = I_A = -(I'_B + I'_C) = 3j\omega C E_A, \quad (9.14)$$

где I_0 — ток нулевой последовательности при замыкании на землю.

Токи $I_{3A}^{(1)}$ и I_0 опережают э. д. с. E_A на 90° и определяются емкостями фаз питающей системы заданного напряжения, а также значением E_A . Поэтому в разветвленных сетях со значительной емкостью ток замыкания на землю будет больше. Так, при замыкании на землю фазы одной из нескольких ЛЭП, подключенных к общему источнику, суммарный ток $I_{3\Sigma}$ в месте замыкания обусловлен емкостными токами всех ЛЭП и составляет

$$I_{3\Sigma} = 3I_{0\Sigma} = 3j\omega C_\Sigma U_\phi. \quad (9.15)$$

Здесь C_Σ — суммарная емкость одной фазы всех ЛЭП, причем $C_\Sigma = C_{уд} l$, где $C_{уд}$ — емкость одной фазы сети относительно земли, Ф/км; l — общая протяженность одной фазы сети.

Ток замыкания на землю для сети с КЛ можно определить также по эмпирической формуле

$$I_{3\Sigma} = (95 + 2,84q) U_{ном} l / (2200 + 6q), \quad (9.16)$$

где $U_{ном}$ — номинальное линейное напряжение сети, кВ; l — длина КЛ, км; q — сечение кабеля, мм².

Оценка аварийных режимов замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью имеет принципиально важное значение для ряда предприятий и объектов с позиций обеспечения надежности электроснабжения, электробезопасности оборудования и его конструктивного исполнения. Наиболее характерно это для горных предприятий, которые являются мощными и ответственными потребителями электрической энергии. Они имеют специфические особенности (сложные горно-геологические условия, пыле- и взрывоопасность газовых шахт), совокупность которых качественно отличает их от промышленных предприятий. В качестве примера рассмотрим аварийные режимы шахтных электрических сетей.

Для ограничения условий открытого искрообразования в подземных выработках газовых шахт в результате коммутационных перенапряжений, а также предотвращения ложных действий подземной защиты от токов утечки из-за ухудшения изоляции электроустановок эти сети питают от специальных разделительных трансформаторов или трехобмоточных трансформаторов 35—110/6/6 кВ.

В шахтной электрической сети наблюдается наибольшее число повреждений из-за несвоевременного устранения неисправностей в электрооборудовании, а также в результате ошибочных действий обслуживающего персонала.

В условиях эксплуатации угольная пыль и влага оседают на шахтное электрооборудование, вследствие чего могут возникнуть токи утечки, которые при определенных условиях способствуют возникновению КЗ с опасными последствиями. Основная причина КЗ в подземных шахтных сетях — механическое повреждение электрооборудования. Наиболее высокой повреждаемости подвержены шахтные бронированные и, особенно, гибкие кабели, в которых чаще существуют одно- и междуфазные утечки. В условиях шахтных выработок КЗ могут явиться причиной подземных пожаров (с наибольшей опасностью для людей). При определенных ситуациях КЗ приводят к нарушению безопасных свойств шахтного электрооборудования. Защита от токов КЗ является одним из основных средств обеспечения взрыво- и пожаробезопасности электрооборудования.

В шахтных электрических сетях могут возникнуть однофазные замыкания на землю и междуфазные КЗ. С учетом особой опасности этих замыканий действующие Правила безопасности в подземных выработках шахт допускают применение только трансформаторов с незаземленной нейтралью, что определяется условиями электробезопасности. Заземление нулевой точки разрешается лишь для сетей напряжением 0,4 кВ на поверхности шахт. Согласно Правилам максимально допустимая мощность КЗ на шинах центральной подземной подстанции не должна превышать 50 % мощности отключения, но не более 100 МВ · А.

С учетом изложенного однофазные токи замыкания на землю не могут быть значительными. В подземных шахтных сетях замыкания фазы на землю или корпус токоприемника даже при малых то-

ках связано с опасностью поражения людей электрическим током. Поэтому эти замыкания, в отличие от сетей промышленных предприятий, незамедлительно отключаются специальной защитой от утечек. Наличие такой защиты позволяет практически исключить переход однофазных замыканий в двухфазные или двухфазные КЗ на землю.

В токе замыкания на землю практически всегда содержатся составляющие с частотами, превышающими промышленную частоту. В момент замыкания на землю возникает переходный процесс, в котором могут быть выделены две стадии. Начальная стадия характеризуется распространением электромагнитных волн в обе сто-

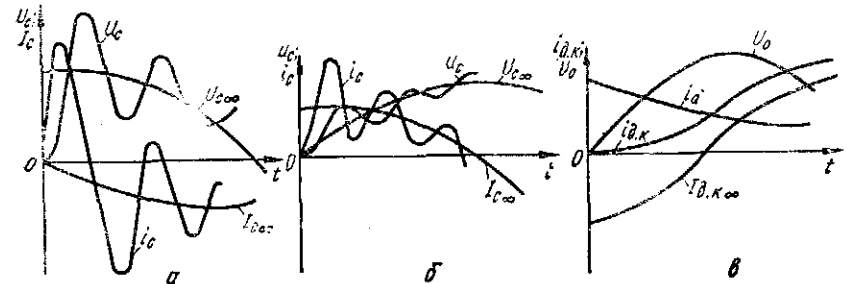


Рис. 9.9. Кривые токов и напряжений переходного процесса при подаче возмущающего напряжения $U_0(t)$

роны от места повреждения. Здесь частота составляющих переходного процесса велика (до сотни килогерц), а длительность процесса предельно мала. В последующей стадии характер переходного процесса приблизительно такой же, как в цепях с сосредоточенными постоянными. Ориентировочно переходный процесс можно оценить по схеме замещения нулевой последовательности (см. рис. 8.7, б), на которую подается возмущающее напряжение $U_0(t)$. Характер изменения токов замыкания и напряжения в сети отражают кривые на рис. 9.9. Переходный процесс длится не более 10 мс, частота его составляет сотни герц.

Наиболее эффективный переходный процесс наблюдается (рис. 9.9, а), если начальное значение напряжения $U_0(0)$ соответствует в установившемся режиме максимальному значению напряжения на результирующей емкости C_c (рис. 9.7, б). Это возможно при замыкании на землю в момент прохождения фазного напряжения поврежденной фазы через максимальное значение (наиболее распространенный случай).

Если начальное значение $U_c(0)$ соответствует переходу напряжения U_c через нуль, то токи переходного процесса уменьшаются (рис. 9.9, б). Амплитуды токов переходного процесса могут в десятки раз превышать установившиеся токи замыкания на землю. Приблизительно отношение амплитуд можно считать равным отношению частоты переходного процесса к промышленной частоте.

В сетях с компенсацией дугогасящая катушка практически не влияет на высокочастотные составляющие переходного процесса (рис. 9.9, в). Здесь частота настройки близка к 50 Гц при достаточно точной компенсации емкостного тока. Дугогасящая катушка может вызвать появление аperiodической составляющей тока замыкания на землю. Ее постоянная времени зависит от добротности катушки и амплитуды тока, не превышающей номинального значения. Поэтому результирующий ток замыкания на землю в этих сетях, кроме высокочастотных, содержит аperiodическую составляющую.

Установлено и подтверждено практикой, что высшие гармоники практически всегда имеются в токе замыкания и составляют от 5 до 15 % тока основной гармоники. Гармонический состав тока замыкания зависит от вида сети, условий замыкания и может меняться в широких пределах.

9.5. Переходные процессы, обусловленные особенностями технологии производства

Электротехнологические установки широко применяются в различных отраслях народного хозяйства. Перспективы их использования весьма значительны. Как потребители электрической энергии эти установки имеют ряд специфических особенностей, проявляющихся в большом разнообразии режимов работы и переходных процессов в СЭС предприятий вследствие резкопеременного, импульсного, несинусоидального и несимметричного характера нагрузки, изменения напряжения, появления электромагнитных помех в сетях и т. п. Колебания напряжения вызываются резкопеременными и ударными нагрузками, которые характерны, в первую очередь, для электродуговых сталеплавильных печей и электросварочных установок. Они также могут создаваться такими потребителями, как вентиляльные преобразователи прокатных станков, электротяговые установки и т. п.

Как известно, колебания напряжения классифицируют как изменения модуля напряжения, происходящие со скоростью не менее одного процента номинального напряжения в секунду. Колебания напряжения влияют на работу светотехнических устройств, радио- и телевизионной аппаратуры, систем автоматики и управления, вычислительной техники и т. п. При нелинейной нагрузке генерируются высшие гармоники тока, перегружаются конденсаторные батареи, из-за чего появляются дополнительные потери мощности. Колебания напряжения приводят к ухудшению энергетических показателей работы электрооборудования и электрических сетей, а также к нежелательному изменению механических характеристик электродвигателей.

В качестве примера рассмотрим особенности протекания переходных процессов при работе некоторых электротехнологических установок.

Электродуговые сталеплавильные печи относятся к потребителям с циклическим резкопеременным режимом работы. Один из периодов графика их нагрузки — расплавление металла — характеризуется наибольшей неравномерностью (сильные и частые случайные колебания тока), что объясняется эксплуатационными КЗ. В этот период расходуется 50—80 % всей потребляемой за плавку энергии, создается ударный эффект в сети. Для дуговых печей характерно значительное число отключений от сети по ходу плавки, связанных с технологическими операциями или с аварийными остановками (до 10 за плавку).

В сетях с дуговыми печами практически любые изменения напряжения можно рассматривать как колебания. Случайные колебания напряжения в питающей сети часто превышают допустимые пределы. Они обусловлены колебаниями тока в печи из-за КЗ и разрыва дуги, периодического характера регулирования процесса, а также особенностей электрической дуги, вызывающей колебания тока частотой от 2 до 10 кГц с амплитудой ± 15 %. Колебания напряжения составляют 2—4 % при напряжении 110 и 35 кВ и 3—12 % при 6 и 10 кВ. Частота таких колебаний 0,5—1 Гц.

Оценка ударного эффекта дуговых сталеплавильных печей выполняется с помощью методов, используемых при анализе электрических цепей. Она имеет важное значение при построении СЭС предприятий с учетом влияния этих установок. Ввиду случайного характера изменения параметров нагрузки дуговых печей и размахов колебаний напряжения при их анализе и нормировании следует применять методы теории случайных процессов. Анализируя колебания напряжения в сетях параллельных дуговых печей, надо учитывать электромагнитное влияние их друг на друга.

Технологические отключения дуговых печей, происходящие, как правило, сразу после обрыва печных дуг, сопровождаются коммутационными перенапряжениями на обмотках отключаемого трансформатора. Поскольку число таких отключений велико, а перенапряжения значительны, их необходимо учитывать при разработке оборудования электропечной установки.

Уровень перенапряжений определяется главным образом быстродействием выключателя. Возникающие коммутационные перенапряжения зависят также от режима работы трансформатора. Наибольшие уровни перенапряжений (семикратные) возможны при отключениях ненагруженных трансформаторов. Наиболее неблагоприятным режимом с точки зрения возникновения значительных перенапряжений (пятикратных) при отключениях трансформаторов под нагрузкой является отключение двухфазной нагрузки при токах, близких к токам ненагруженного агрегата. Расчет перенапряжений выполняется с использованием методов, применяемых в электротехнике.

Кратность возможных бросков тока намагничивания при включениях трансформаторов достигает $4I_{ном}$ (рис. 9.10). Броски токов резко уменьшаются с переходом на более низкие ступени напряжения, а также по мере прогрева печи.

Импульсный характер графиков нагрузки электросварочных установок приводит к появлению провалов в огибающей кривой напряжения, форма которых зависит от формы индивидуальных импульсов тока сварки. Изменения тока и напряжения на зажимах

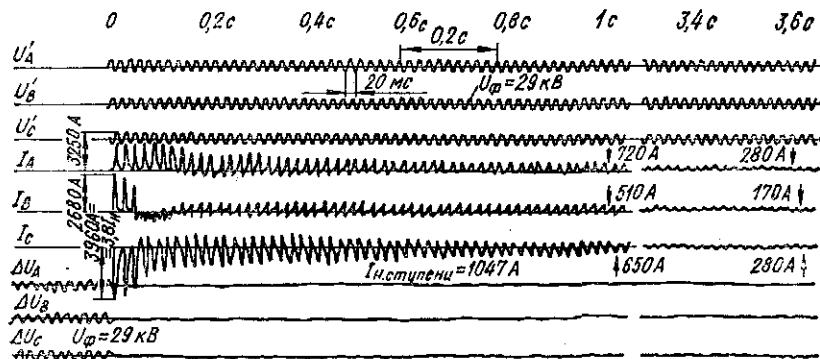


Рис. 9.10. Изменения токов и напряжений в сети при включении трансформатора мощностью 45 МВ · А печи ДСП-200 и при работе в режиме холостого хода

стыковой сварочной установки мощностью 600 кВ · А показаны на рис. 9.11.

Законы изменения провалов напряжения соответствуют законам изменения индивидуальных графиков и описываются зависимостями, определяемыми с помощью вероятностных методов. Глу-

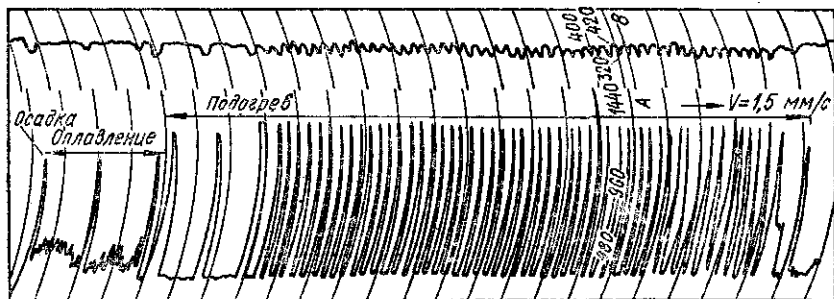


Рис. 9.11. Изменения сварочного тока и напряжения на зажимах стыковой сварочной установки мощностью 600 кВ · А

бина провалов напряжения определяется мощностью электросварочной установки и источника питания, а также параметрами питающей сети. Установки точечной и рельефной сварки создают провалы напряжения до 7 %. Наибольшая глубина провалов напряжения наблюдается на зажимах стыковых и многоточечных установок (до 19 %). Средняя частота провалов напряжения $f_{н.ср} = n/t_{п.ср}$, где n — число импульсов тока за средний цикл сварки $t_{п.ср}$.

В сетях, питающих группы сварочных установок, провалы напряжения носят случайный характер. Наибольшие значения про-

валов напряжения (до 20 %) наблюдаются в сетях, питающих стыковые и многоточечные установки, наименьшие — в сетях, питающих дуговые сварочные установки (не более 3 %). Максимумы частот провалов напряжения групповых графиков составляют 1,8—4 Гц.

Электросварочные установки создают также колебания напряжения, средняя частота которых $f_{к.ср} = 2n/t_{п.ср}$. Колебания напряжений разнообразны: от периодических прямоугольных до случайных марковских. Максимальная частота колебаний напряжения в групповых сетях составляет 5—12 Гц. Основная энергия спектра колебаний сосредоточена в интервале 2,5—3 Гц. Электросварочные установки работают в импульсном режиме, поэтому необходимо учитывать появление переходных процессов в потребляемом токе. При асинхронном включении амплитудное значение переходного тока может достигать трехкратного значения номинального тока. Длительность процесса — от трех до шести периодов. Большие значения переходных токов приводят к увеличению амплитуды провалов напряжения и дополнительному искажению синусоиды напряжения за счет появления в токе постоянной составляющей и четных гармоник. Режимы работы электросварочных установок регулируются с помощью тиристорov.

Создаваемые ударными нагрузками непериодические колебания напряжения можно привести к периодическим, эквивалентным по энергии или средней мощности за время контроля процесса T . Эквивалентный размах периодического p -го колебания в процентах определяется выражением

$$\delta V_{эк} = \sqrt{\sum_{p=1}^n \delta V_p^2/n},$$

где n — число колебаний за время T .

Выражение для определения $\delta V_{эк}$, пригодное в проектной практике, можно записать иначе, используя значения набросов реактивных мощностей δQ_p и мощности КЗ на шинах резкопеременных нагрузок:

$$\delta V_{эк} = S_k^{-1} \sqrt{\sum_{p=1}^n \delta Q_p/n}.$$

Условием допустимости колебаний напряжения является $\delta V_{эк} \leq \delta V_d$.

9.6. Процессы, происходящие при коммутациях конденсаторных батарей

Конденсаторные батареи устанавливаются в узлах нагрузки сетей напряжением 6—110 кВ в основном для регулирования реактивной мощности, чем достигается существенное улучшение энергетических показателей ЭЭС. С применением конденсаторных батарей могут дополнительно решаться задачи повышения устой-

чивости режимов, ограничения токов КЗ и регулирования напряжения.

Процессы коммутации конденсаторных батарей имеют специфические особенности. Включение и отключение их сопровождается изменением многих параметров режима. В течение переходных процессов могут возникать значительные толчки тока и перенапряжения, представляющие опасность как для сетей и коммутационной аппаратуры, так и для батарей. Выключатель, установленный в цепи батарей, включает и отключает большие токи, осуществляет коммутацию значительно чаще, чем выключатель ВЛ. Кроме того, броски переходного тока при включении конденсаторной батареи больше, чем при включении линии. Поэтому к выключателям высокого напряжения, предназначенным для работы в цепях батарей, предъявляются повышенные требования.

При включении конденсаторной батареи* на ток промышленной частоты накладывается высокочастотный ток переходного режима. В случае неблагоприятной фазы напряжения в момент включения батареи скорость нарастания тока соответствует включению на КЗ. Амплитуда тока переходного режима существенно меньше амплитуды тока КЗ, однако может достигать нескольких килоампер. Амплитуда переходного тока достигает минимального значения, если ток появляется при максимальном напряжении. Еще большие броски тока возможны при параллельном включении батарей, однако такие токи специально ограничиваются реакторами.

Сравнительно частые включения и отключения конденсаторной батареи (один-два раза в сутки) утяжеляют воздействие тока на выключатель. Это, как правило, приводит к увеличению вероятности его отказа (сваривание контактов и большой их износ, недопустимое повышение давления в дугогасительном устройстве и др.). Процессы изменения тока при включении однофазной цепи с сосредоточенной емкостью известны из курса электротехники. При включении трехфазной конденсаторной батареи в системе с заземленной нейтралью (сети напряжением 110 кВ) процессы аналогичны однофазным. При этом необходимо пренебречь полным сопротивлением контура возврата тока через землю или считать, что включение фаз конденсаторной батареи произошло одновременно, хотя во многих сетях это может не соблюдаться.

В трехфазной схеме реальной электрической сети амплитуды тока включения могут отличаться от рассчитанных для однофазной схемы вследствие затухания переходного тока, наличия нескольких составляющих разных частот и неодновременности появления тока в различных фазах. На переходный процесс может оказывать влияние даже небольшая разновременность появления тока из-за различий в приложенных к контактам мгновенных значений фазного напряжения и неустраняемой разновременности замыкания кон-

тактов. Так как периоды изменения тока высокой частоты малы, то даже небольшая разновременность появления тока приводит к тому, что при включении второй или третьей фазы ток в ранее включившихся фазах может достигать больших значений и взаимное влияние их становится существенным.

Многочисленными испытаниями установлено, что, несмотря на большое число отмеченных факторов, которые могут влиять на расхождение максимальных амплитуд переходного тока при включении конденсаторной батареи в расчетной однофазной и в реальной трехфазной схемах, амплитуды токов практически совпадают. Изменения фазных токов и напряжений при включениях конденсаторной батареи показаны на рис. 9.12. Скорость нарастания переходного тока при наличии высокочастотных составляющих может достигать больших значений (до 50 А/мкс), опасных для выключателя. Для ее снижения уменьшают паразитную емкость конденсаторной батареи или включают реактор между выключателем и батареей.

При включении конденсаторных батарей переходные процессы сопровождаются появлением перенапряжений. Теоретически максимальный коэффициент перенапряжения равен 2 и возможен при замыкании цепи в максимум напряжения. Практически этот коэффициент не превышает 1,9.

В случае отключения батареи, сопровождающегося повторными зажиганиями при исследовании выключателей с естественным масляным дутьем, толчки тока и перенапряжения обычно бывают больше, чем при ее включении. Значения токов при этом зависят от мощности батареи и характеристик сети, а перенапряжений — от числа повторных зажиганий во время отключений. Включение сопротивлений для разряда батарей или использование для этого трансформатора напряжения оказывает влияние только на процесс включения, если заземляющее устройство присоединено постоянно. При отключениях и включениях конденсаторной батареи, присоединенной к подстанции длинным кабелем, возникают дополнительные колебательные процессы, которые приводят к значительным перенапряжениям в сети.

При отключении конденсаторной батареи с помощью маломасляных выключателей перенапряжения, повторный пробой или зажигание отсутствуют, время горения дуги уменьшается. Этому способствует наличие постоянного давления в дугогасительных устройствах выключателя. Использование таких выключателей для коммутации конденсаторных батарей представляется весьма перспективным.

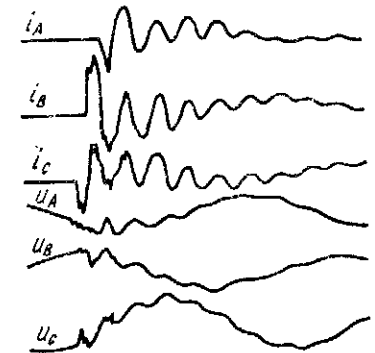


Рис. 9.12. Изменение фазных токов и напряжений при включении конденсаторной батареи

* Здесь рассматриваются процессы при коммутации конденсаторных батарей в сетях, не имеющих других батарей.

Применение заземляющих сопротивлений в нейтрали конденсаторной батареи может снизить перенапряжения при повторных зажиганиях и восстанавливающиеся на контактах выключателя напряжения на 15—20 %.

9.7. Примеры расчетов

Пример 9.1. Определить ток КЗ в выпрямителе, питающем двигатель постоянного тока при глухом замыкании его обмотки. Выпрямитель питается от трансформатора мощностью 400 кВ · А, напряжением 10/0,23 кВ. Мощность КЗ на стороне ВН составляет 50 МВ · А. Питание к двигателю подводится двухжильным алюминиевым кабелем сечением $2 \times 120 \text{ мм}^2$, длиной 25 м. Выпрямитель собран по трехфазной мостовой схеме.

Решение. Параметры питающего трансформатора и кабеля по справочным данным: трансформатор ТМ-400/10 ($\Delta P_k = 5,5 \text{ кВт}$; $u_k = 4,5 \%$); $r_1 = 0,258 \text{ Ом/км}$ ($r_{\text{каб}} = r_1 l = 0,258 \cdot 0,025 = 0,0065 \text{ Ом}$). Сопротивление дуги r_d в месте КЗ примем равным 0,01 Ом.

Сопротивления питающего трансформатора

$$r_{\text{тр}} = P_m U_{2л}^2 \cdot 10^{-3} / S_{\text{тр}}^2 = 5,5 \cdot 230^2 \cdot 10^{-3} / 400^2 = 0,018 \text{ Ом};$$

$$x_{\text{тр}} = U_{2л}^2 \cdot 10^{-5} \sqrt{u_k^2 - (100 P_m / S_{\text{тр}})^2} / S_{\text{тр}} = \\ = 230^2 \cdot 10^{-5} \sqrt{4,5^2 - (100 \cdot 5,5 / 400)^2} / 400 = 0,057 \text{ Ом}.$$

Результирующее активное сопротивление цепи КЗ

$$r_{\text{рез}} = 3r_{\text{тр}}/2 + r_{\text{каб}} + r_d = 3 \cdot 0,018/2 + 0,0065 + 0,01 = 0,0435 \text{ Ом}.$$

Сопротивление связи с системой

$$x_c = U_{2л}^2 \cdot 10^{-6} / S_k = 230^2 \cdot 10^{-6} / 50 = 0,001 \text{ Ом}.$$

Ток КЗ в режиме 1

$$I_k = 1,35 U_{2л} / [r_{\text{рез}} + 0,955 (x_c + x_{\text{тр}})] = \\ = 1,35 \cdot 330 / [0,0435 + 0,955 (0,001 + 0,057)] = 3,14 \text{ кА}.$$

Аварийный ток, при котором происходит переход от режима 1 к режиму 2,

$$I_{\text{к.п}} = 0,26 U_{2л} / (x_c + x_{\text{тр}}) = 0,26 \cdot 230 / (0,001 + 0,057) = 1,03 \text{ кА}.$$

Так как $I_k > I_{\text{к.п}}$, то в данном случае имеет место режим 2. Ток КЗ в режиме 2

$$I_k = 1,17 U_{2л}^2 / \sqrt{r_{\text{рез}}^2 + \left[\frac{3}{2} (x_c + x_{\text{тр}}) \right]^2} = \\ = 1,17 \cdot 230^2 / \sqrt{0,0435^2 + [(3/2) (0,001 + 0,057)]^2} = 2,77 \text{ кА}.$$

Пример 9.2. Индукционная установка поверхностной закалки потребляет мощность $P_y = 500 \text{ кВт}$ при частоте 8000 Гц, питаясь напряжением $U_{\text{ном}} = 375 \text{ В}$ при $\cos \varphi = 0,9$. Источник питания расположен на расстоянии 5 м от установки. Напряжение подводится по шинопроводу, состоящему из пяти алюминиевых шин $100 \times 6 \text{ мм}$ (три шины прямые и две обратные). Определить ток КЗ при замыкании выводов индуктора.

Решение. Шины шириной 100 мм при расстоянии между ними 30 мм и частоте 8000 Гц имеют сопротивление $r_1 = 0,72 \text{ Ом/км}$ и $x_1 = 14,92 \text{ Ом/км}$.

Полное сопротивление шинопровода с учетом того, что при пяти шинах имеется четыре пары токопроводящих поверхностей,

$$z_{\text{ш}} = \sqrt{(r_1 l)^2 + (x_1 l)^2} / 4 = 18,7 \text{ мОм}.$$

В расчете учтем сопротивление питающего трансформатора. Мощность трансформатора 630 кВ · А, $u_k = 5,5 \%$, $\Delta P_x = 8,5 \text{ кВт}$.

Тогда

$$z_{\text{тр}} = u_k U_{2\text{ном}} / (100 \sqrt{3} I_y) = 5,5 \cdot 400 / (100 \cdot \sqrt{3} \cdot 900) = 14,1 \text{ Ом};$$

$$r_{\text{тр}} = P_k / (3 I_y^2) = 8500 / (3 \cdot 900^2) = 3,5 \text{ Ом};$$

$$x_{\text{тр}} = \sqrt{z_{\text{тр}}^2 - r_{\text{тр}}^2} = 13,6 \text{ Ом}.$$

Суммарное сопротивление короткозамкнутой цепи

$$z_k = \sqrt{(r_{\text{тр}} + r_{\text{ш}})^2 + (x_{\text{тр}} + x_{\text{ш}})^2} = \\ = \sqrt{(3,5 + 0,9)^2 + (13,6 + 18,65)^2} = 32,6 \text{ мОм}.$$

Ток КЗ

$$I_k = U_2 / z_k = 12,3 \text{ кА}.$$

Пример 9.3. Рассчитать значения емкостного тока замыкания на землю в распределительной сети и индуктивности дугогасящего реактора для полной компенсации первой гармоники емкостной составляющей тока замыкания, если известно, что сеть напряжением 10 кВ имеет четыре КЛ длиной 1,5; 1,8; 2,4 и 2,1 км соответственно, а удельная емкость кабеля одной фазы $C_{\text{уд}} = 0,37 \cdot 10^{-6} \text{ Ф/км}$. Емкость электроприемников не учитывать.

Решение. Емкостный ток замыкания на землю

$$I_{\text{зс}} = \sqrt{3} U_{\text{ном}} \omega C_{\text{уд}} l_{\Sigma} = \\ = \sqrt{3} \cdot 10000 \cdot 314 \cdot 0,37 \cdot 10^{-6} (1,5 + 1,8 + 2,4 + 2,1) = 15,67 \text{ А}.$$

Индуктивность дугогасящего реактора при условии, что $I_L = I_{\text{зс}}$,

$$L_{\text{д.р}} = U_{\text{ном}} / (\sqrt{3} \omega I_{\text{зс}}) = 10000 / (\sqrt{3} \cdot 314 \cdot 15,67) = 1,17 \text{ Гн}.$$

Контрольные вопросы

1. В чем заключаются особенности КЗ в питающих сетях напряжением 330 кВ и выше?
2. Каковы общие зависимости, используемые при расчете токов КЗ в питающих сетях?
3. Какие составляющие имеет полный ток трехфазного КЗ для условий, показанных на рис. 9.1?
4. Каковы условия возникновения КЗ в сетях постоянного тока?
5. Каковы режимы работы выпрямителей при возможных КЗ?
6. Как осуществляется переход от режима 1 к режиму 2 при расчете КЗ в цепи выпрямителя?
7. Как выполняется расчет внутренних КЗ выпрямителя, вызванных пробоем вентиля?
8. Каковы особенности расчета КЗ в сетях повышенной частоты?
9. Чем характеризуются замыкания на землю в сетях напряжением 6—35 кВ?
10. С какой целью применяются дугогасящие катушки? Как они влияют на процессы при замыканиях на землю?
11. Какое значение имеет оценка режимов замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью?

12. В чем особенности переходных процессов при работе электротехнологических установок?
13. Какие характерные особенности переходных процессов при коммутациях конденсаторных батарей?

Темы рефератов

1. Расчеты аварийных режимов в сетях постоянного тока.
2. Оценка аварийных режимов в сетях повышенной частоты.
3. Опасность процессов замыкания на землю в электрических сетях.
4. Расчет процессов при коммутациях конденсаторных батарей в электрических сетях.

Глава 10

УРОВНИ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

10.1. Качество электромагнитных переходных процессов

Основными источниками электроснабжения промышленных предприятий являются сети ЭЭС. Тенденция увеличения числа и мощности источников электрической энергии в энергетических системах, приближения источников питания к потребителям, увеличения числа и мощности синхронных и асинхронных двигателей в узлах нагрузки означает одновременно повышение уровней мощности и токов КЗ на шинах понижающих подстанций и в распределительных электрических сетях СЭС. Это обуславливает предъявление повышенных требований в отношении функционирования коммутационной аппаратуры, релейной защиты, системной автоматики, а также электродинамической и термической стойкости элементов СЭС.

При создании СЭС следует согласовывать предъявляемые требования к их элементам с возможными в них переходными процессами. Анализ электромагнитных переходных процессов с оценкой их качества необходим для проектирования и правильной эксплуатации СЭС.

Качество переходных процессов с точки зрения согласования с требованиями, предъявляемыми к СЭС и их элементам, характеризуют *качественными* и *количественными* показателями. Последние обычно являются функционалами зависимостей параметров режима от времени или их предельными значениями и содержат определенную информацию. Показателями качества электромагнитных переходных процессов, возникающих при переходе СЭС из нормального режима работы в аварийный, дают оценку по следующим их свойствам, характеристикам и последствиям.

1. По *длительности переходного процесса*. Это интервал времени, в течение которого СЭС переходит из одного устойчивого состояния работы в другое установившееся состояние. Длительность процессов, близких к апериодическим, можно оценить интервалом

времени $t_{дл} \leq 3T_n$, если воспользоваться эквивалентной постоянной времени электрической сети (5.64).

Время существования аварийного режима при переходных процессах, возникающих вследствие внезапных нарушений нормального режима, обычно стремятся сократить, оценивая расчетную продолжительность аварийного режима (КЗ). Этот интервал времени складывается из минимального времени действия средств релейной защиты $t_{р.з. min}$ и собственного времени отключения коммутационной аппаратуры $t_{с.откл.}$:

$$\tau = t_{р.з. min} + t_{с.откл.}$$

Преднамеренные нарушения режима (включение, отключение, КЗ, пуск и т. п.) рассчитывают по длительности для каждого вида электрооборудования с целью сравнения с допустимым временем переходного режима, которое ограничивается техническими и технологическими условиями, требованиями безопасности, нагрева и др.

2. По *характеру переходного процесса*, который оценивают по изменению тока во времени. Характер электромагнитного переходного процесса зависит от мощности источников электрической энергии, параметров электрических сетей, наличия на генераторах средств АРВ, установки в электрических сетях устройств АПВ.

Характер переходного процесса изменения параметров режима может быть *апериодическим*, *колебательным* с неизменной или апериодической амплитудой и *монотонным*. При расчете параметров режима КЗ используют качественную оценку характера переходного процесса по амплитуде. По размагничивающему действию реакции статора генераторов при протекании тока источники питания условно подразделяют на источники *неограниченной* и *ограниченной* мощностей, что определяется их электрической удаленностью от места КЗ (см. гл. 5).

Количественными оценками характера переходного процесса являются *коэффициент затухания периодической составляющей тока КЗ*

$$\gamma_{ат} = I_{ат} / I'' \quad (10.1)$$

и *коэффициент затухания апериодической составляющей тока КЗ*

$$\gamma_{ат} = i_{ат} / i_{ат=0}. \quad (10.2)$$

3. По *опасности последствий для оборудования СЭС*, которая оценивается соответственно следующими показателями переходного процесса изменения тока КЗ:

электродинамической стойкостью элементов СЭС (проверяется по ударному току при трехфазном КЗ);

термической стойкостью (оценивается по наибольшему тепловому импульсу тока при трехфазном или двухфазном КЗ)

$$B_k = \int_0^t i_k(t) dt. \quad (10.3)$$

4. По *существенности влияния параметров аварийного переходного процесса на нормальные режимы работы СЭС и ее элементов*. Для СЭС предприятий оценки этого влияния отражаются зависимости показателей качества электрической энергии (ГОСТ 13109—67) у электроприемников со сложным режимом потребления энергии от уровня мощности КЗ:

коэффициентом несинусоидальности

$$K_{нс} = S_{п.а}/S_K \leq 0,05, \quad (10.4)$$

который пропорционален суммарной мощности преобразовательных агрегатов $S_{п.а}$ и обратно пропорционален мощности КЗ;

коэффициентом несимметрии

$$\epsilon_n = S_{н.о}/S_K \leq 0,02, \quad (10.5)$$

который пропорционален мощности однофазной нагрузки $S_{н.о}$ и обратно пропорционален мощности КЗ;

колебаниями напряжения

$$\delta V = (\Delta P r_{рез}/x_{рез} + \Delta Q)/S_K, \quad (10.6)$$

которые пропорциональны набросу мощности реактивной нагрузки ΔQ и обратно пропорциональны мощности КЗ;

колебаниями частоты

$$\Delta f \approx (\Delta P/\Delta t)/(2\pi S_K), \quad (10.7)$$

которые пропорциональны скорости наброса активной мощности $\Delta P/\Delta t$ у электроприемников с резкопеременной нагрузкой и обратно пропорциональны мощности КЗ.

5. По *стоимости дополнительных мероприятий для улучшения требуемых характеристик переходного процесса в СЭС*. Для СЭС крупных предприятий токи КЗ достигают на приемных пунктах электрической энергии таких значений, что без их ограничения обойтись нельзя. Решение и осуществление этой задачи требуют дополнительных капитальных вложений в СЭС.

Как видно, показатели качества электромагнитных переходных процессов по-разному характеризуют условия функционирования СЭС и электроприемников. В основе количественной оценки всех показателей лежат токи и мощности КЗ. Для СЭС характерно противоречие в их оценке. С точки зрения снижения стоимости элементов СЭС и облегчения условий их работы желательно уменьшение уровней тока и мощности КЗ, а с точки зрения обеспечения качества электрической энергии у электроприемников, наоборот, необходим их высокий уровень. Это и определяет постановку задачи поиска компромиссного выбора показателей качества электромагнитных переходных процессов.

10.2. Способы ограничения токов короткого замыкания

Уровни токов и мощностей КЗ характеризуют ожидаемые условия работы электрооборудования СЭС в аварийных режимах. Они определяют выбор сечения шин, токопроводов, проводов и кабелей,

отключающую и коммутационную способности аппаратов, электродинамическую и термическую стойкость токоведущих частей и конструкций электрооборудования. Выбор электрооборудования по факторам аварийного режима не только означает предъявление более жестких требований к его техническим характеристикам, но и свидетельствует о соответствующем росте его стоимостных показателей.

При проектировании СЭС решается технико-экономическая задача ограничения уровней токов и мощностей КЗ до значений, допустимых параметрами электрооборудования, которое экономически целесообразно применять. В процессе эксплуатации СЭС, сопровождающейся их развитием с включением новых источников

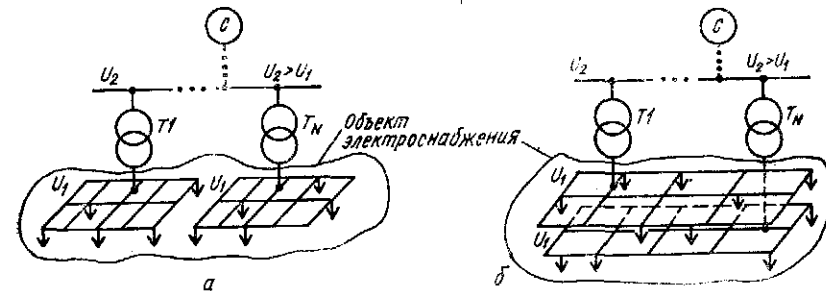


Рис. 10.1. Продольное (а) и поперечное (б) разделения электрической сети

электрической энергии, возникает задача ограничения уровней токов и мощностей КЗ, если они превышают технические параметры установленного электрооборудования. При ее решении используют различные меры, связанные с ограничением токов КЗ и направленные на увеличение сопротивления цепи КЗ, локализацию в аварийном режиме источников ее питания и отключение поврежденной электрической сети за время $t < 1/(4f)$ (для частоты тока $f = 50$ Гц оно составляет $t < 5$ мс).

К таким методам относятся: выбор структуры и схемы электрических соединений элементов СЭС; стационарное и автоматическое деление электрической сети; выбор режима ее эксплуатации; выбор схем коммутации; применение оборудования с повышенным электрическим сопротивлением; использование быстродействующих коммутационных аппаратов; изменение режима нейтрали элементов сети и электромагнитное преобразование параметров режима системы.

Структура и схемы электрических соединений элементов СЭС выбираются на стадии ее проектирования и реконструкции. В основу принимаемых решений при этом должны быть положены следующие принципы [17]:

продольное разделение сетей одинакового уровня напряжения при размещении их на территориально различных участках объекта электроснабжения и связь их через сеть более высокого напряжения (рис. 10.1, а);

поперечное разделение сетей одинакового напряжения, если они территориально совмещены, но связаны через сеть более высокого напряжения (рис. 10.1, б);

раздельное питание узлов нагрузки от источников электрической энергии с обеспечением их параллельной работы через связи в электрической сети и с использованием блочных соединений «генератор — трансформатор — линия»;

разукрупнение приемных подстанций и поэтапное создание СЭС путем внедрения глубоких вводов высокого напряжения;

применение раздельной работы основных элементов СЭС (линий, трансформаторов) на всех ступенях распределения электрической энергии;

применение разомкнутых распределительных сетей и широкое внедрение в них токопроводов, шинных и кабельных магистральных линий, которые позволяют использовать токоограничивающее действие самой сети.

При построении схем электроснабжения необходимо руководствоваться рядом важных требований, предъявляемых к СЭС, сущность которых следующая.

1. Максимальное приближение источников питания к электроприемникам. В длительных режимах используется централизованное электроснабжение от ЭЭС через один или несколько приемных пунктов. Для СЭС промышленных предприятий характерным является наличие нескольких источников питания цепи КЗ: собственные источники электрической энергии в виде генераторов ТЭС, подстанции связи с районной энергетической системой, синхронные компенсаторы, а также синхронные и асинхронные двигатели. Долевое участие каждого источника в питании места КЗ зависит от их мощности и электрической удаленности. Приближение основного источника питания означает уменьшение количества промежуточных трансформаций в СЭС, увеличение количества элементов сети, рассчитываемых на более высокие напряжения, а следовательно, на меньшие рабочие токи и токи КЗ. Все источники питания предприятия с целью резервирования связываются между собой токопроводами, КЛ или ВЛ на питающем или вторичном напряжениях. При этом наряду с резервированием большего количества элементов связи на вторичном напряжении предпочтительнее, так как они позволяют получить меньшие уровни токов КЗ.

2. Секционирование всех ступеней распределения электрической энергии в СЭС. Это требование тесно связано с выбором количества и мощности трансформаторов главных понижающих подстанций (ГПП) и трансформаторных пунктов (ТП), количества и пропускной способности питающих линий. Такое построение СЭС позволяет увеличить электрическое сопротивление сети протеканию тока КЗ, предотвратить развитие аварии и локализовать место КЗ.

3. Построение и выбор конфигурации электрической сети (радиальной, магистральной, радиально-магистральной) должны обосновываться (наряду с такими основными факторами, как на-

дежность, потери мощности и энергии, расход цветного металла и др.) также степенью использования сечений проводников, выбранных по току КЗ.

4. Использование ступенчатого токоограничения в схеме электроснабжения, при котором токоограничивающие устройства или элементы сети, обладающие токоограничивающим действием, устанавливаются на нескольких последовательных ступенях распределения электрической энергии. С этой точки зрения наиболее характерны схемы электроснабжения угольных шахт, в которых

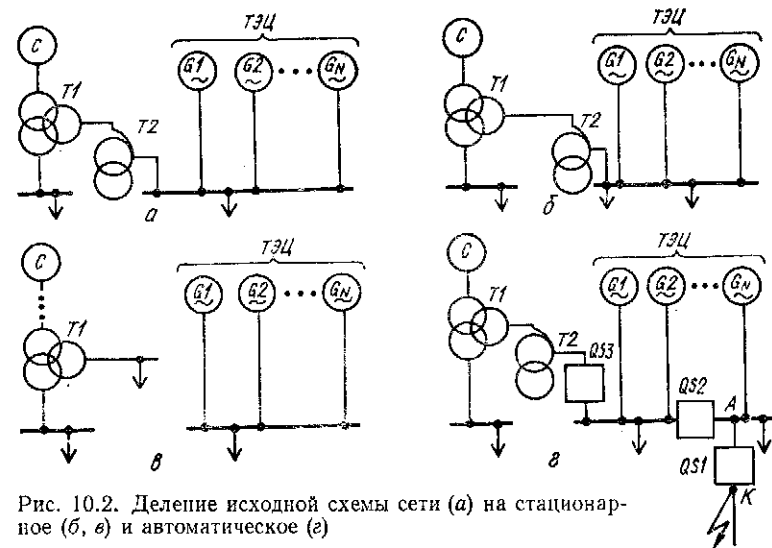


Рис. 10.2. Деление исходной схемы сети (а) на стационарное (б, в) и автоматическое (в)

первой ступенью ограничения мощности КЗ является снижение ее на ГПП шахты, а второй — на вводах, питающих нагрузку подземных потребителей, где мощность КЗ ограничивается правилами безопасности пределом в 50 МВ · А с перспективой его повышения до 100 МВ · А.

Стационарное или автоматическое деление сетей выполняется обычно в системах внешнего электроснабжения в связи с увеличением числа и мощности источников электрической энергии как в энергетической системе, так и на собственных ТЭС. Необходимость деления сети появляется в тех случаях, когда уровень токов КЗ в узлах нагрузки превышает допустимый уровень по параметрам электрооборудования, находящегося в эксплуатации. Заметим, что деление сети существенно влияет на эксплуатационные режимы, устойчивость и надежность работы электрической системы, а также на потери мощности и энергии в сетях.

Стационарное деление исходной схемы сети (рис. 10.2, а) выполняют в нормальном режиме таким образом, чтобы максимальный уровень тока КЗ в конкретном узле нагрузки не превышал

допустимый по параметрам установленного электрооборудования (рис. 10.2, б, в).

Автоматическое деление сети осуществляют в аварийных режимах последовательной локализацией места КЗ (рис. 10.2, з). При КЗ на присоединении А производится отключение части источников питания места повреждения (выключателем $QS2$ или $QS3$), а затем выключателем $QS1$ отключается присоединение. Последовательное отключение источников питания цепи тока КЗ позволяет применять коммутационные аппараты с меньшей отключающей способностью по сравнению с аппаратами, соответствующими действительному уровню токов КЗ.

Выбор режима эксплуатации сети тесно связан со схемными решениями. В СЭС с длительным режимом рекомендуется раздельная работа силовых трансформаторов ГПП, а также ТП. Совместно с раздельной работой источников электрической энергии разукрупнение подстанций и секционирование всех ступеней распределения энергии дают возможность получить в нормальном режиме наибольшее сопротивление цепи тока КЗ. В нормальном режиме все секции РУ работают независимо, а необходимая степень бесперебойности электроснабжения обеспечивается включением секционных выключателей оперативным обслуживающим персоналом или с использованием АВР. Кольцевые схемы электроснабжения эксплуатируют с разомкнутым секционным выключателем на одной из подстанций.

Изложенные рекомендации по выбору режима при наличии крупных электроприемников с резкопеременной ударной нагрузкой не всегда приемлемы. При ограниченной мощности источника электрической энергии крупные электроприемники соизмеримой с ним мощности обуславливают выбросы и сбросы активной и реактивной нагрузок, которые вызывают колебания напряжения. Для обеспечения допустимого минимального уровня напряжения в питающей сети таких электроприемников эффективными средствами являются: повышение уровня токов КЗ (см. п. 10.4), применение повышенных напряжений, обособленное электроснабжение.

Схемы питания СЭС при проектировании внешнего электроснабжения выбираются на основе фактической мощности КЗ, поступающей от энергетической системы, требуемой степени бесперебойности электроснабжения, состава и территориального размещения электроприемников. При этом необходимо также оценивать токи КЗ, генерируемые синхронными и асинхронными двигателями, а также возможности дальнейшего развития СЭС. Схемы электрических соединений должны отвечать требованиям надежности, простоты и экономичности.

Определяющим для уровней токов КЗ в СЭС является выбор схемы электрических соединений ГПП как узла связи между ЭЭС и распределительной сетью СЭС. Чем больше мощность понижающего трансформатора связи ЭЭС, тем больше токи КЗ на шинах ГПП.

Для их уменьшения следует разукрупнять по мощности подстанции СЭС или применять схемы электрических соединений,

ограничивающие уровень токов КЗ на шинах вторичного напряжения. На рис. 10.3 показаны варианты схем электрических соединений, которые рекомендуется использовать в связи с повышением единичной установленной мощности трансформаторов.

При выборе схем электрических соединений необходимо обращать внимание на построение сетей, подключаемых к шинам вторичного напряжения ГПП. Через распределительную сеть питается место КЗ от асинхронных и синхронных двигателей. Секционирование на всех ступенях распределения электрической энергии

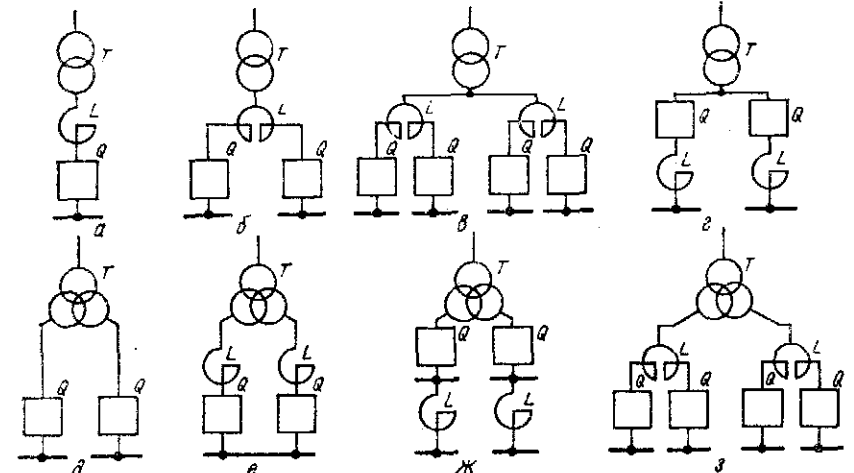


Рис. 10.3. Варианты схем электрических соединений ГПП с ограничением токов КЗ на шинах вторичного напряжения при единичной установленной мощности трансформаторов:

а — 25—40 МВ·А; б — 32—63 МВ·А; в — 63—80 МВ·А; г — 63—100 МВ·А; д — 25—80 МВ·А; е — 40—80 МВ·А; жс — 63—80 МВ·А; з — 100 МВ·А

уменьшает значение тока КЗ, генерируемого местными источниками. При этом следует учитывать изменение схемы электрических соединений в эксплуатационных режимах, при которых допускается длительная работа с включенными секционными аппаратами для наиболее тяжелого режима.

В схемах электроснабжения предприятий перспективно применение соединений: линия питающего напряжения — трансформатор ГПП, линия питающего напряжения — трансформатор ГПП — токопровод распределительного напряжения, линия распределительного напряжения — трансформатор подстанции — магистральный шинопровод низкого напряжения и др.

Применение электрооборудования с повышенным электрическим сопротивлением предусматривает установку как общесетевых, так и специальных элементов. При проектировании СЭС можно целенаправленно выбирать элементы сети с большим реактивным и активным сопротивлениями, изменяя количество и мощность трансформа-

торов, применяя трансформаторы с повышенным относительным напряжением КЗ, ВЛ и токопроводы с увеличенным расстоянием между фазами, протяженные шинопроводы и т. п. К специальному электрооборудованию относятся трансформаторы и автотрансформаторы с расщепленными обмотками НН, одноцепные и двоянные реакторы, токоограничивающие устройства резонансного, трансформаторного и реакторно-вентильного типов [17], назначение которых — увеличивать сопротивление току, превышающему ток рабочего режима.

Токоограничивающее действие коммутационных аппаратов проявляется при быстродействии, соизмеримом с периодом изменения тока. При этом они выполняют функции ограничения воздействия по амплитуде и длительности отключения тока КЗ. Электродинамическое действие тока КЗ уменьшается при использовании аппаратов, время срабатывания которых менее 5 мс (рис. 10.4). В качестве таких аппаратов могут применяться безынерционные предохранители, тиристорные выключатели с принудительной коммутацией, ограничители ударного тока взрывного действия, а также некоторые типы автоматов на напряжение до 1 кВ.

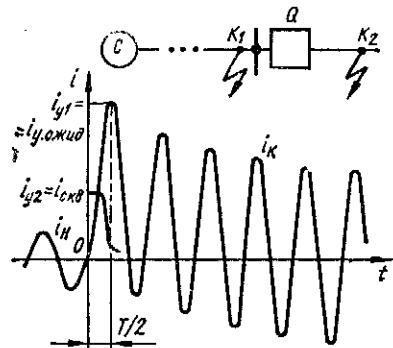


Рис. 10.4. Ограничение коммутационным аппаратом Q электродинамического воздействия тока КЗ со значения i_{y1} до значения i_{y2}

При продолжительности КЗ более 5 мс проявляется тепловое действие

тока, которое также может быть уменьшено ускорением отключения поврежденной цепи.

Весьма существенным фактором изменения значений токов КЗ, которые протекают в контурах проводники — земля, является и изменение режима нейтрали электрической сети. Заземление нейтралей элементов через цепи с дополнительными сопротивлениями приводит к изменению эквивалентного сопротивления нулевой последовательности. Эту же цель достигают заменой автотрансформаторов в узловых точках сети трансформаторами такой же мощности с соединением фазных обмоток по схеме «звезда — звезда». Заземление нейтрали облегчает решение других важных задач проектирования (уровней изоляции, требований безопасности, уровней перенапряжений, надежности), но повышает значение тока КЗ на землю. Поэтому выбор и изменение режима нейтрали сети или ее элементов должны решаться комплексно путем технико-экономического обоснования.

Электромагнитное преобразование параметров СЭС (параметров режима нагрузки) включает в себя передачу мощности потребителям с выполнением операций выпрямления, инвертирования и изменения частоты тока, а также

преобразование трехфазной системы напряжений в однофазную, преобразование системы напряжения в систему тока и т. п. В СЭС такие преобразования параметров электрической энергии являются односторонними и выполняются в основном с целью питания специальных групп электроприемников (прокатных станов, сварочных машин, промышленного и городского транспорта). Элементы электрооборудования, реализующие эти операции, играют еще роль развязывающих элементов на ступенях распределения энергии и роль токоограничивающих устройств путем исключения питания места КЗ от подключенных за ними узлов нагрузки и местных источников (в аварийных режимах исключается обратная передача мощности в питающую сеть).

При преобразовании системы напряжения в систему тока в последней режим КЗ является неаварийным, а нормальным режимом ее работы (сети групповых сварочных постов; сети питания электродуговых печей; вторичные цепи релейной защиты, подключенные к трансформаторам тока). Такое преобразование используется для передачи и распределения энергии в системе рудничного транспорта бесконтактными электровозами.

Таким образом, ограничение мощностей и токов КЗ в СЭС производится правильным проектированием схем их подстанций и электрических сетей. Выбор способа ограничения мощностей и токов КЗ неоднозначен и практически представляет собой совокупность мер, комплексно решающих целый ряд вопросов выбора параметров электрооборудования и режимов его работы на основе технико-экономических расчетов.

10.3. Применение технических средств ограничения токов короткого замыкания

Реализация различных способов ограничения токов КЗ, кроме принятия при проектировании и эксплуатации решений о структуре схем соединения элементов и режимах эксплуатации СЭС, предусматривает применение и специальных технических средств. Последние представляют собой специальное электрооборудование, которое непосредственно, благодаря своему конструктивному исполнению, ограничивает значение или продолжительность воздействия тока КЗ либо используется в схемах соединения элементов, выполняющих в совокупности эту функцию. К таким средствам относятся:

аппараты и устройства, реализующие автоматическое деление сети;

силовые трансформаторы и автотрансформаторы с особым исполнением конструкции и соединением фазных обмоток;

токоограничивающие элементы и устройства;

токоограничивающие коммутационные аппараты;

устройства изменения режима работы нейтрали силовых трансформаторов.

Автоматическое деление сети может использоваться во внешнем электроснабжении предприятий в сетях напряжением 35 кВ и выше. Такая операция реализуется с применением устройств противоаварийной автоматики и коммутационных аппаратов, устанавливаемых на мощных присоединениях, между секциями РУ и на вводах.

Средства противоаварийной автоматики включают в себя релейную защиту, реагирующую на появление КЗ, устройства автоматического выполнения последовательного отключения коммутационных аппаратов (см. рис. 10.2, з), устройства автоматической частотной разгрузки, АПВ и АВР. Эта система последовательного отключения токов КЗ должна обладать высокими надежностью и быстродействием как при отключении КЗ, так и при восстановлении исходного режима. Ее коммутационные аппараты должны выдерживать полный сквозной ток КЗ и включение без повреждения на КЗ в данном присоединении.

Недостатками этой системы являются [17]:

снижение запаса устойчивости послеаварийного режима вследствие небаланса мощности источников питания и нагрузок в разделившихся частях электрической сети, изменения соединений в схеме электроснабжения;

значительное время восстановления исходного режима питания электроприемников после отключения присоединения с КЗ.

Для автоматического деления сети необходимо:

выполнить анализ расчетной схемы для возможных КЗ;

оценить баланс мощности в намеченных для деления участках электрической сети;

учесть возможное изменение конфигурации электрической сети; рассчитать время последовательного отключения тока КЗ и время восстановления схемы для нормального режима;

оценить запас устойчивости послеаварийного режима, согласовать уровни токов КЗ и технические параметры коммутационных аппаратов

Силовые трансформаторы и автотрансформаторы могут создаваться с учетом необходимости ограничения токов КЗ. Для ограничения уровня мощности КЗ на шинах вторичного напряжения может быть использована конструктивная особенность трансформатора. Известно, что напряжение КЗ определяется номинальным напряжением и проходной мощностью трансформатора, которые обуславливают геометрические размеры его обмоток. При концентрическом размещении обмоток у двухобмоточных трансформаторов обмотка НН располагается внутри, а ВН — снаружи; у трехобмоточных трансформаторов обмотка СН помещается между обмотками НН и ВН. Расположение обмоток, диаметр и размеры канала между обмотками влияют на значение напряжения КЗ. Так, между обмотками СН и ВН у трехобмоточных трансформаторов оно меньше, чем между обмотками НН и ВН.

Снижение уровня мощности КЗ на выводах понижающих трансформаторов (рис. 10.5) определяется выражениями:

для двухобмоточных трансформаторов

$$S''_{к2}/S''_{к1} = 1/(1 + u_{к} S''_{к1}/(100S_{тр.ном})); \quad (10.8)$$

для трехобмоточных трансформаторов

$$\left. \begin{aligned} S''_{к2}/S''_{к1} &= 1/(1 + 2u_{кВ-Н} S''_{к1}/(100S_{тр.ном})); \\ S''_{к3}/S''_{к1} &= 1/(1 + 2u_{кВ-С} S''_{к1}/(100S_{тр.ном})). \end{aligned} \right\} \quad (10.9)$$

Из (10.8) и (10.9) следует, что снижение мощности КЗ зависит от напряжения КЗ между соответствующими обмотками трансформаторов, их единичной мощности и мощности КЗ, поступающей от ЭЭС. Понижающие двух- и трехобмоточные трансформаторы по

напряжению КЗ имеют некоторый диапазон варьирования. Например, для двухобмоточных трансформаторов на напряжения 35/6—10 кВ и мощность 1—80 МВ · А он лежит в пределах 6,5—14,4 %, на напряжения 110/6—10 кВ и мощность 2,5—400 МВ · А — в пределах 10,5—13,5 %, на напряжения 150/6—10 кВ и мощность 2,5—250 МВ · А — в пределах 10,5—14,6 %, на напряжения 220/6—10 кВ и мощность 31,5—125 МВ · А — в пределах 10,6—14 %. Поэтому для ограничения уровня мощности КЗ на шинах вторичного напряжения, согласно (10.8) и (10.9), следует выбирать трансформаторы с повышенным для соответствующих обмоток напряжением КЗ, разукрупнять по мощности понижающие подстанции на связях с мощной ЭЭС, использовать раздельную работу трансформаторов.

Трансформаторы и автотрансформаторы могут выполняться с расщепленными обмотками НН. Части расщепленной обмотки размещаются симметрично относительно обмотки ВН, имеют самостоятельные выводы и допускают произвольное распределение нагрузки между обмотками. Ограничение мощности КЗ конструктивно достигается большим значением напряжения КЗ между частями расщепленной обмотки.

Для ограничения несимметричных токов КЗ существенную роль играет схема соединения фазных обмоток трансформаторов и автотрансформаторов. Так как в схему замещения нулевой последовательности включаются только те ветви, по которым циркулируют токи нулевой последовательности, то она не содержит участков электрической сети, находящихся за обмотками, соединенными в треугольник.

Токоограничивающие реакторы представляют собой дополнительные реактивные сопротивления, включаемые в различных точках электрической сети напряжением 6—220 кВ.

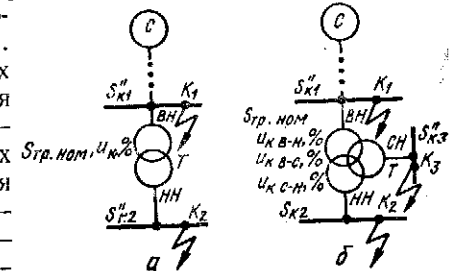


Рис. 10.5. К ограничению уровня мощности КЗ выбором параметров двухобмоточных (а) и трехобмоточных (б) трансформаторов

Их назначение — снижение тока КЗ за реактором и сохранение требуемого уровня остаточного напряжения в узловых точках сети перед реактором. В зависимости от места включения различают реактирование присоединений (рис. 10.6, а), вводов (рис. 10.3 и 10.6, б), секций (рис. 10.6, в) и их сочетания (рис. 10.6, г). По схеме включения различают реакторы *одноцепные* и *сдвоенные* (расщепленные). Отличие сдвоенного реактора от одноцепного заключается в наличии среднего вывода обмотки, в связи с чем возможны различные схемы его включения и использования. Токоограничива-

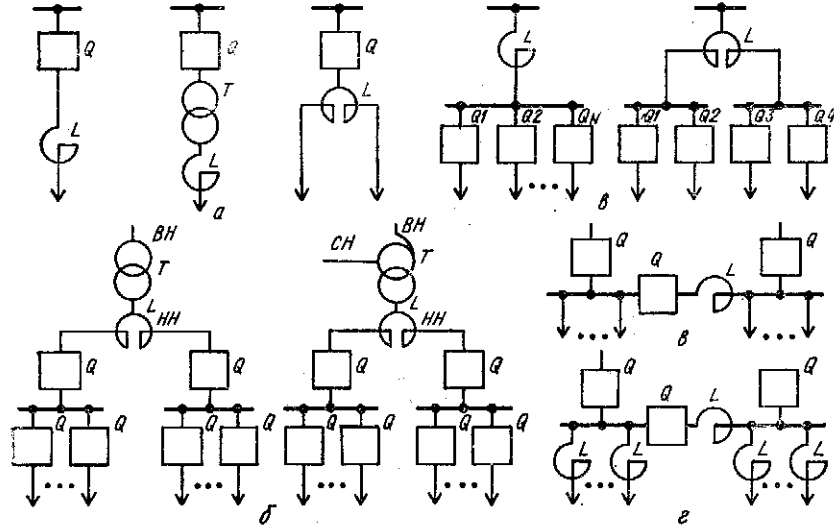


Рис. 10.6. Схемы реактирования присоединений (а), вводов (б), секций (в) и их сочетания (г)

ющее действие реактора характеризуется его индуктивным сопротивлением и номинальным током.

Для уменьшения затрат следует стремиться к применению групповых реакторов вместо индивидуальных в цепях присоединений, вводов и схем коммутации ГПП. Вместе с тем в схемах, содержащих групповые реакторы на большие номинальные токи и с большим реактивным сопротивлением, возможны колебания напряжения, вызываемые изменением их нагрузки. Этот недостаток устраняется установкой сдвоенных реакторов с обеспечением равномерной загрузки их ветвей; при наличии резкопеременной нагрузки снижение колебаний напряжения достигается только частично.

При условии соблюдения на выводах одной ветви реактора нормированного значения колебания напряжения на другую ветвь можно подключить мощность резкопеременной нагрузки, определяемую выражением

$$S_n = \delta V / (u_k / (100 S_{\text{тр.ном}}) - (50 x_{\text{ном}}) / U_{\text{ном}}^2), \quad (10.10)$$

где δV — значение колебания напряжения; u_k , $S_{\text{тр.ном}}$ — напряжение КЗ и мощность трансформатора, к которому подключен сдвоенный реактор.

Эффективность использования *одноцепного реактора* зависит от параметров электрической сети и мощности КЗ, поступающей от источника питания к намечаемой точке его подключения (рис. 10.7, а). Относительное снижение мощности и тока КЗ можно рассчитать по формуле

$$\Delta S_{*к} = (S_{к1} - S_{к2}) / S_{к1} = \Delta I_{*к} = (I_{к1} - I_{к2}) / I_{к1},$$

которая после подстановки $I_{к1} = I_0 / x_c$ и $I_{к2} = I_0 / (x_c + x_p)$ принимает вид

$$\Delta S_{*к} = \Delta I_{*к} = (x_p / x_c) / (1 + x_p / x_c).$$

Отношение x_p / x_c имеет ограниченный диапазон изменения и зависит от параметров реактора, реактивность которых находится в пределах 3—16 %, а также от параметров связи узла сети с источником питания:

$$x_c = 100 S_c / S_{к},$$

где S_c — пропускная способность элементов сети районной энергетической системы.

Токоограничивающее действие реактора снижается с увеличением мощности приемных пунктов электрической энергии и повышается с их разукрупнением по числу и мощности трансформаторов (рис. 10.8).

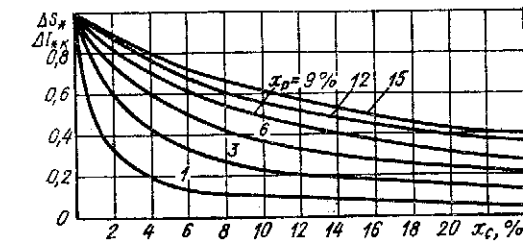


Рис. 10.8. Зависимость токоограничивающего действия одноцепного реактора от его реактивности и сопротивления системы

Реактор выбирают по номинальному напряжению и току, а также индуктивному сопротивлению и проверяют по динамической и термической стойкости к току КЗ, при необходимости — по уровню остаточного напряжения в предвключенном узле сети.

Первоначальным действием при выборе реактора является определение его индуктивного сопротивления. Исходя из необходимого уровня мощности КЗ за реактором $S_{к2} = S_{к.необх.}$, требуемое индуктивное сопротивление в процентах или в омах рассчитыва-

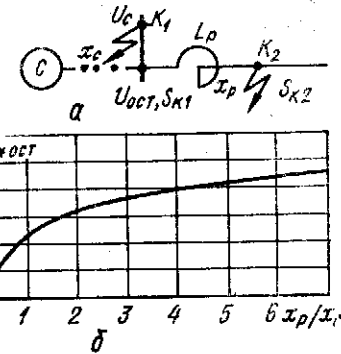


Рис. 10.7. Схема включения одноцепного реактора (а) и его характеристики (б)

ют соответственно по формулам

$$x_p = ((S_{\sigma}/S_{k2}) - x_{с.с.б}) \cdot 100 I U_{\sigma} / (I_{\sigma} U_{\sigma}); \quad (10.11)$$

$$x_p = (x_p \% / 100) U_{\sigma} / (\sqrt{3} I), \quad (10.12)$$

где $x_{с.с.б}$ — сопротивление связи данного узла сети с источником электрической энергии, приведенное к базисным условиям; I , U_{σ} — рабочий ток и напряжение сети, соответствующие длительному режиму работы реактора.

По току, напряжению сети и индуктивному сопротивлению выбирают реактор с ближайшим ббльшим стандартным значением x_p , который проверяют (при необходимости) по значению остаточного напряжения

$$U_{ост} \geq 0,6 U_{\sigma}. \quad (10.13)$$

Уровень остаточного напряжения зависит от отношения сопротивлений x_p/x_c (рис. 10.7, б):

$$U_{*ост} = U_{ост}/U_{\sigma} = \sqrt{3} I_{k2} x_{p,ном} / U_{\sigma} = 1 / (x_c / x_{p,ном} + 1), \quad (10.14)$$

или (в процентах)

$$U_{ост} = x_{p,ном} I_{k2} / I_{p,ном}, \quad (10.15)$$

где $x_{p,ном}$, $I_{p,ном}$ — параметры выбранного реактора; I_{k2} — уточненное, соответственно стандартному индуктивному сопротивлению реактора и его номинальному току, значение тока КЗ.

Если условие (10.13) не выполняется, то новое расчетное значение (в процентах) следует определить, исходя из необходимого уровня остаточного напряжения $U_{*ост,необх}$, по формуле

$$x_p = 100 U_{*ост,необх} x_{с.с.б} I U_{\sigma} / ((1 - U_{*ост,необх}) I_{\sigma} U_{\sigma}). \quad (10.16)$$

По этому значению x_p выбирают реактор с ближайшим ббльшим стандартным значением сопротивления, пересчитывают ток КЗ за выбранным реактором и проверяют соответствие его параметров условиям электродинамической и термической стойкости.

Секционные реакторы ограничивают ток КЗ на сборных шинах и присоединениях. По сравнению с линейными реакторами они оказывают меньшее токоограничивающее действие, так как рассчитываются на ббльшие номинальные токи, протекающие между секциями при нарушении нормального режима их раздельной работы.

Секционные реакторы выбирают по номинальному напряжению, наибольшему из рабочих токов секций и индуктивному сопротивлению. Сопротивлением реактора вначале задаются и путем поверочных расчетов изменяют его до значения, допустимого параметрами устанавливаемого электрооборудования. По значению остаточного напряжения, электродинамической и термической стойкости секционные реакторы не проверяют.

Сдвоенные реакторы конструктивно характеризуются индуктивностью ветвей $L_1 = L_2 = L_n$ и коэффициентом связи частей расщепленной обмотки

$$k_{св} = M / \sqrt{L_1 L_2} = M / L_n = \omega M / x_{ном}, \quad (10.17)$$

где M — взаимная индуктивность частей обмотки.

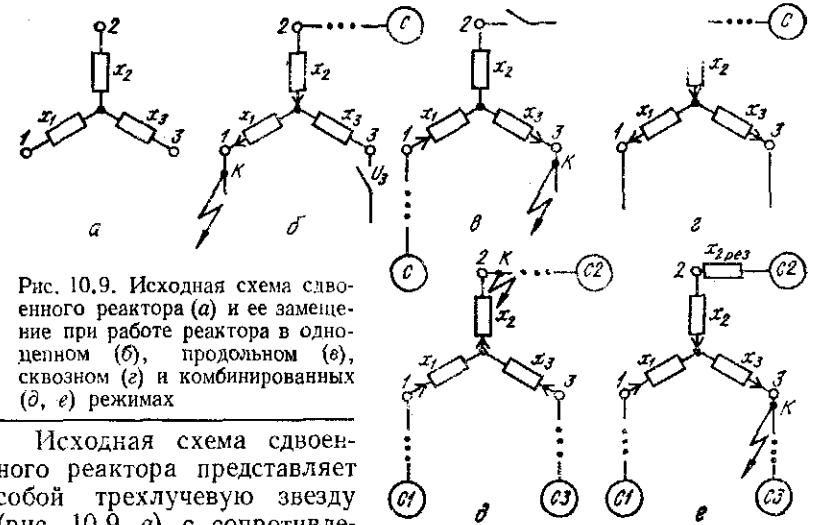


Рис. 10.9. Исходная схема сдвоенного реактора (а) и ее замещение при работе реактора в одноцепном (б), продольном (в), сквозном (г) и комбинированных (д, е) режимах

Исходная схема сдвоенного реактора представляет собой трехлучевую звезду (рис. 10.9, а) с сопротивлениями лучей x_1 , x_2 и x_3 . Однако в зависимости от схемы включения такой реактор работает в различных по токоограничению режимах, так как имеет разные результирующие сопротивления:

в одноцепном режиме (рис. 10.9, б)

$$x_p = x_{ном} (1 + k_{св}) - x_{ном} k_{св} = x_{ном}; \quad (10.18)$$

в продольном режиме (рис. 10.9, в)

$$x_p = x_{ном} (1 + k_{св}) + x_{ном} (1 + k_{св}) = 2x_{ном} (1 + k_{св}); \quad (10.19)$$

в сквозном режиме (рис. 10.9, г) при одинаковых токах ветвей

$$x_p = x_{ном} - x_{ном} k_{св} = x_{ном} (1 - k_{св}). \quad (10.20)$$

В продольном одноцепном (комбинированном) режиме источники питания находятся со стороны каждой ветви реактора. Если КЗ происходит со стороны ветви 2 (рис. 10.9, д), то результирующее сопротивление реактора

$$x_p = 0,5 x_{ном} (1 - k_{св}), \quad (10.21)$$

а если со стороны ветви 1 или 3 (рис. 10.9, е), то при $x_{2рез} > k_{св} x_{ном}$

$$x_p = x_{ном} (1 + k_{св}) (x_{2рез} - k_{св} x_{ном}) / [x_{ном} (1 + k_{св}) + x_{2рез} - k_{св} x_{ном} + x_{ном} (1 + k_{св})], \quad (10.22)$$

а при $x_{2рез} < k_{св} x_{ном}$

$$x_p = x_{ном} (1 + k_{св}). \quad (10.23)$$

Выбор сдвоенного реактора аналогичен выбору одноцепного реактора при $x_p = x_{ном}$. Значение тока каждой ветви сдвоенного реактора должно быть не менее 0,675 номинального тока обмотки трансформатора либо суммарного тока нагрузки. При этом пред-

полагается равномерное распределение нагрузки между ветвями реактора.

Недостатком двоянных реакторов является возможность повышения напряжения на слабо нагруженной ветви при работе в одноцепном и сквозном режимах (см. рис. 10.9, б, в). Напряжение на слабо нагруженной ветви за счет магнитной связи частей обмотки реактора содержит составляющую э. д. с., которая индуцируется током КЗ нагруженной ветви. При КЗ на одной из ветвей реактора на другой его отключенной ветви будет напряжение

$$U_3 = \sqrt{3} x_{\text{ном}} (1 + k_{\text{св}}) I_{\text{к}},$$

или с учетом того, что $x_{\text{ном}} = x_{\text{ном}} U_{\text{р.ном}} / (\sqrt{3} I_{\text{р.ном}})$,

$$U_{*3} = x_{\text{ном}} (1 + k_{\text{св}}) I_{\text{к}} / I_{\text{р.ном}}. \quad (10.24)$$

Это напряжение зависит от реактивности ветви реактора, его номинального тока и коэффициента связи, значения которого находятся в пределах 0,4—0,63.

Наличие сопротивления у токоограничивающих реакторов приводит к дополнительным потерям напряжения, мощности и энергии. Идеальной считается нелинейная характеристика сопротивления реактора, при которой в нормальных режимах работы оно наименьшее, а в аварийных — наибольшее. Среди последних разработок известны конструкции управляемых и насыщающихся реакторов, токоограничивающих устройств трансформаторного и резонансного типов [17].

В управляемых реакторах сопротивление изменяется подмагничиванием магнитопровода потоком дополнительных управляющих обмоток. Результирующим сопротивлением реактора можно управлять также путем использования вентилей тиристорных выключателей.

В насыщающихся реакторах сопротивление возрастает в результате изменения степени насыщения магнитопровода при увеличении тока КЗ, протекающего через реактор.

В токоограничивающих устройствах трансформаторного типа используется последовательное включение сопротивления в цепь первичной обмотки трансформатора. Их результирующее сопротивление изменяется путем управления режимом работы вторичной обмотки трансформатора с помощью нелинейных сопротивлений или тиристорных выключателей.

Действие токоограничивающих устройств резонансного типа основано на явлении резонанса напряжений. Увеличение их сопротивления при появлении КЗ является следствием нарушения резонанса. Расстройка резонанса осуществляется изменением частоты тока в переходном процессе, использованием пороговых элементов, насыщающихся дросселей, тиристорных выключателей и ограничителей ударного тока.

Токоограничивающие коммутационные аппараты совмещают функции ограничения наибольших значений токов КЗ и защиты от воздействия сверхтоков на электро-

установки путем их отключения. К ним относятся быстродействующие токоограничивающие предохранители, ограничители ударного тока и специальные автоматические выключатели на напряжение до 1 кВ.

Токоограничивающие предохранители обеспечивают защиту электроустановки при условии, если

$$i_{\text{у.скв}} < i_{\text{у.ожд}}, \quad (10.25)$$

где $i_{\text{у.ожд}}$ — ожидаемый ток, который возник бы в сети при отсутствии в ней предохранителя (см. рис. 10.4).

Токоограничивающие предохранители применяются в сетях напряжением до 35 кВ. Они характеризуются следующими показателями: номинальным напряжением, током патрона и током плавкой вставки, который не должен превышать номинального тока патрона предохранителя, а также наибольшим и наименьшим токами отключения, зависимостями времени плавления вставки $t_{\text{пл}}$, времени отключения $t_{\text{откл}}$ и тока ограничения $i_{\text{у.скв}}$ от периодической составляющей $I_{\text{п.к}}$ ожидаемого тока КЗ.

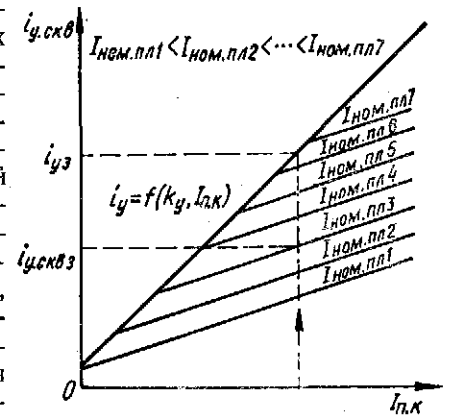


Рис. 10.10. Характеристика токоограничения предохранителя

Токоограничивающее действие предохранителей определяется номинальным током плавкой вставки $I_{\text{ном.пл}}$, а также значениями периодической составляющей и ударного тока КЗ при отсутствии в сети предохранителя (рис. 10.10). Если степень токоограничения оценивать по коэффициенту ограничения

$$k_{\text{огр}} = i_{\text{у.скв}} / i_{\text{у.ожд}}, \quad (10.26)$$

то значение последнего уменьшается с увеличением номинального тока плавкой вставки и становится наименьшим при номинальном токе патрона предохранителя.

Как средство токоограничения предохранители сравнительно дешевы и просты, но имеют ряд недостатков: одноразовое использование плавкой вставки, ограниченный выбор по шкале плавких вставок и патронов, нестабильность токовременных характеристик, плохая совместимость действия с устройствами релейной защиты и с системой автоматики, а также недостаточная эксплуатационная надежность. Они используются в схемах электроснабжения ответственных электроприемников.

Ограничители ударного тока, как и предохранители, являются коммутационными аппаратами одноразового действия. В них используется принцип отключения цепи взрывом токоведущего проводника пиропатроном. Сигнал на срабатывание ограничителя

поступает от внешних устройств релейной защиты, контролирующей ток КЗ и его первую производную. Ток КЗ ограничивается за время около 0,5 мс при полном отключении сети за 5 мс.

Ограничители ударного тока применяются в сетях с большими токами напряжением 0,66—35 кВ. В СЭС промышленных предприятий они могут быть использованы для:

шунтирования реакторов в нормальных рабочих режимах с целью уменьшения потерь напряжения и мощности (рис. 10.11, а—в);

осуществления параллельной работы в схемах коммутации с электрооборудованием, обладающим недостаточной стойкостью по параметрам режима КЗ (рис. 10.11, г);

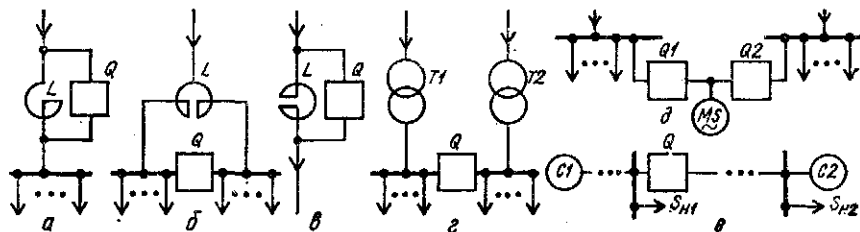


Рис. 10.11. Возможные схемы включения ограничителей ударного тока

построения схем питания особо ответственных электроприемников, недопускающих перерывов в электроснабжении (рис. 10.11, д); автоматического деления сети с двусторонним питанием (рис. 10.11, е);

разземления нейтрали силового трансформатора при больших токах КЗ на землю.

Недостатками ограничителей ударного тока являются высокая стоимость и сложность управления.

Автоматические выключатели, применяемые в сетях напряжением до 1 кВ, срабатывают при токах КЗ за время 0,2—0,6 с. Это время достаточно для обеспечения защиты электрооборудования от теплового воздействия токов КЗ, благодаря чему электрические сети, защищаемые такими выключателями, на термическую стойкость не проверяются.

Известны конструкции специальных автоматических выключателей (токоограничивающие выключатели, выключатели с ограничителями) для снижения амплитуды тока КЗ в течение времени отключения. В них ограничение сверхтоков достигается быстрым введением в электрическую цепь больших сопротивлений. Для этой цели используется сопротивление электрической дуги, образующейся между размыкающимися контактами выключателя или в специальных элементах (ограничителях). Быстрое нарастание сопротивления электрической дуги реализуется отбросом контактов выключателя под действием электродинамических сил, вызываемых протекающим током КЗ, или в результате срабатывания быст-

родействующих электромагнитных элементов. В ограничителях сопротивлением дуги уровень тока КЗ снижается до такого значения, при котором электрическую цепь может разомкнуть выключатель, работающий совместно с ограничителем.

Способность выключателей снижать уровень токов КЗ можно оценивать характеристиками срабатывания и токоограничения. *Характеристика срабатывания* представляет собой зависимость времени срабатывания от значения тока КЗ и определяется конструктивными параметрами выключателей. Для ограничивающих выключателей кривая этой зависимости (рис. 10.12, а) содержит участки, соответствующие срабатыванию теплового 1 и электромагнитного 2 расцепителей, а для выключателей с ограничителями — дополнительно и участок 3 действия

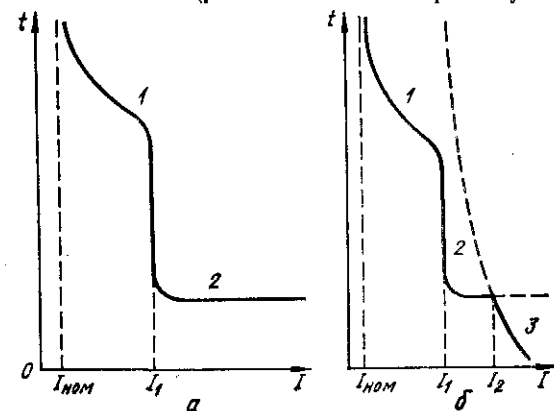


Рис. 10.12. Характеристики срабатывания ограничивающих выключателей (а) и выключателей с ограничителями (б)

ограничителя (рис. 10.12, б). Граница участков, соответствующих теплового и электромагнитному расцепителям, зависит от выбора установки I_1 электромагнитного расцепителя. Время-токовая характеристика ограничителя подбирается таким образом, чтобы при токах, меньших I_2 , выключатель самостоятельно отключал цепь. При токах, больших I_2 , первым должен срабатывать ограничитель, а выключатель будет отключать ток, уменьшенный его действием.

Характеристика токоограничения — это зависимость ограниченного ударного тока КЗ от периодической составляющей ожидаемого тока КЗ. На эту зависимость оказывают влияние напряжение, коэффициент мощности, соотношение составляющих полного сопротивления цепи тока КЗ (рис. 10.13). С понижением коммутационного напряжения токоограничивающая способность выключателей увеличивается.

Токоограничивающие выключатели обладают следующими достоинствами по сравнению с обычными автоматическими выключателями:

- меньшими массогабаритными показателями;
- меньшей стоимостью выключателей на тот же номинальный ток отключения;
- снижением на 10—30 % электродинамического и на 5—10 % теплового действия токов КЗ;

более высокими показателями надежности (износостойкостью, безотказностью, безопасностью).

Их недостатками являются сложность обеспечения селективной работы нескольких выключателей и одноразовое использование ограничителей тока.

Устройства, включаемые в цепь заземления нейтрали силовых элементов, могут иметь различное целевое назначение, так как режим нейтрали сети влияет на решение многих вопросов электроснабжения: облегчение условий работы релейной защиты; выбор класса рабочей изоляции проводников; снижение уровня атмосферных и коммутационных перенапряжений и др. К ним относятся также вопросы ограничения токов наиболее распространенных однофазных КЗ на землю.

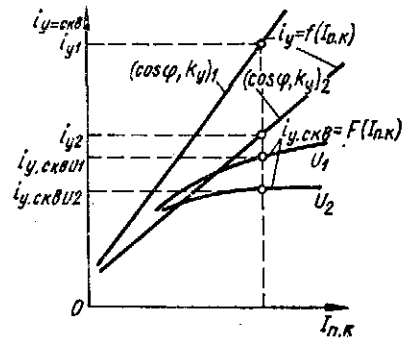


Рис. 10.13. Характеристики тока ограничения выключателя при $U_1 > U_2$, $\cos \varphi_1 < \cos \varphi_2$, $k_{y1} > k_{y2}$

Для ограничения токов КЗ на землю разземляют нейтраль части силовых трансформаторов (рис. 10.14, а), включают в цепь нейтрали элементов сети реакторы с линейной характеристикой (рис. 10.14, б), насыщающиеся реакторы (рис. 10.14, в), дугогасящие реакторы и резисторы (рис. 10.14, г), нелинейные сопротив-

$$K_3 = U_{ф.з} / U_{ф.ном} \leq 1,4, \quad (10.27)$$

где $U_{ф.з}$ — разность потенциалов между неповрежденной фазой и землей в точке КЗ на землю другой или двух других фаз; $U_{ф.ном}$ — разность потенциалов между фазой и землей в этой точке до КЗ.

Неравенство (10.27) выполняется при соотношении параметров сети

$$z_{0рез} / z_{1рез} \leq 3 \div 4 \quad \text{или} \quad x_{0рез} / x_{1рез} \leq 5, \quad (10.28)$$

где $z_{1рез}$, $x_{1рез}$ — результирующие полное и реактивное сопротивления прямой последовательности; $z_{0рез}$, $x_{0рез}$ — то же нулевой последовательности.

Для ограничения токов КЗ на землю разземляют нейтраль части силовых трансформаторов (рис. 10.14, а), включают в цепь нейтрали элементов сети реакторы с линейной характеристикой (рис. 10.14, б), насыщающиеся реакторы (рис. 10.14, в), дугогасящие реакторы и резисторы (рис. 10.14, г), нелинейные сопротив-

ления (рис. 10.14, д); гальванически разделяют сеть установкой трансформаторов или заменой автотрансформаторов трансформаторами, что расширяет возможности изменения режима нейтрали ее участков.

Эти устройства могут включаться постоянно в нейтраль, вводиться в цепь ее рабочего заземления при КЗ на землю (рис. 10.14, е) с помощью коммутационных аппаратов или изменять результирующее сопротивление при появлении КЗ на землю путем срабатывания пороговых элементов (насыщающихся реакторов; индуктивно-емкостных контуров, настроенных в резонанс напряжений).

Нейтрали заземляются через дугогасящие реакторы для компенсации емкостного тока сети при замыканиях на землю. Дугогася-

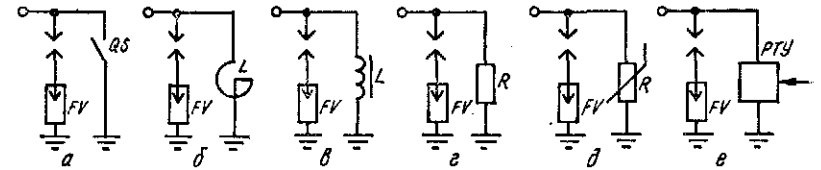


Рис. 10.14. Схемы, поясняющие выполнение рабочего заземления нейтрали

щий реактор отличается от одноцепного тем, что имеет большое индуктивное сопротивление и нелинейную вольт-амперную характеристику при напряжениях, превышающих номинальное. В контуре, состоящем из ветви дугогасящего реактора с индуктивной проводимостью и эквивалентной ветви емкостной проводимости сети на землю, создаются условия резонанса токов. Этот режим работы нейтрали должен предусматриваться при значениях емкостного тока замыкания на землю:

более 10 А — в сетях с ВЛ на железобетонных и металлических опорах напряжением 6—20 кВ и во всех сетях напряжением 35 кВ;

более 30 А — в сетях без таких опор при напряжениях 3—6 кВ, более 20 А — при напряжении 10 кВ и более 15 А — при напряжениях 15—20 кВ;

более 5 А — в схемах соединений «генератор — трансформатор» (на генераторном напряжении).

При значениях тока замыкания на землю более 50 А рекомендуется установка не менее двух заземляющих дугогасящих реакторов.

Наибольшие токи КЗ на землю наблюдаются в сети с глухозаземленной нейтралью. При заземлении нейтрали элементов сети через резистор или нелинейное активное сопротивление периодическая составляющая тока однофазного КЗ снижается на 20—30 %, при этом резко уменьшается время воздействия его апериодической составляющей. Одновременно облегчаются условия работы релейной защиты и предотвращается появление перемежающихся дуговых КЗ на землю, хотя напряжения на нейтрали и неповрежденных фазах при КЗ увеличиваются.

При атмосферных и коммутационных перенапряжениях заземление нейтрали через резистор равносильно ее глухому заземлению.

Заземление нейтрали через реакторы или резонансные токоограничивающие устройства преследует цель ввести при КЗ в цепь заземления нейтрали индуктивное сопротивление. Оно ограничивает ток КЗ в большей степени, чем при заземлении через устройства с активным сопротивлением того же значения, снижает напряжение на нейтрали, но менее эффективно при атмосферных перенапряжениях.

В сетях напряжением 110 кВ для ограничения тока КЗ эффективнее использовать резисторы, чем реакторы. Степень снижения тока при этом ограничивается допустимым повышением напряжения на неповрежденных фазах (до $1,4U_{ф.ном}$). В сетях напряжением 220 кВ (в зависимости от параметров сети) эффективным может быть применение как резисторов, так и реакторов. Заземление нейтрали трансформаторов через резистор или реактор позволяет снизить установившийся ток КЗ до 50—80 % значения тока КЗ при глухозаземленной нейтрали без превышения допустимых уровней перенапряжений на нейтрали и неповрежденных фазах.

В сетях с изолированной или заземленной через дугогасящие реакторы нейтралью ток замыкания на землю наименьший. Он обуславливается активной проводимостью на землю и степенью компенсации емкостного тока дугогасящим реактором электрически связанной части сети. Поэтому в данном случае наиболее просто ограничить токи неполнофазных замыканий сети на землю путем разземления нейтрали ее силовых элементов.

Степень снижения тока КЗ с помощью рассмотренных средств ограничивается допустимым повышением напряжения на нейтрали и неповрежденных фазах в процессе КЗ, а также классом применяемой изоляции. Так как трансформаторы на напряжение 110 кВ и выше имеют низкий класс изоляции нейтрали, то степень токоограничения уменьшается с повышением номинального напряжения сети. Разземление нейтралей трансформаторов на напряжение 330 кВ и выше не допускается.

Выбор схемы и устройств цепи рабочего заземления нейтралей силовых элементов для снижения токов неполнофазных КЗ на землю зависит от режима нейтрали всей сети, ее параметров и ограничений по уровням перенапряжений, которые определяются шкалой номинальных напряжений. При этом весомыми являются также следующие факторы: удобство эксплуатации, требования надежности и бесперебойности электроснабжения, стремление найти экономически выгодную границу между снижением токов КЗ на землю и допустимым повышением уровня различных видов перенапряжений.

10.4. Оптимизация уровней токов короткого замыкания

Система электроснабжения является небольшой частью ЭЭС, где происходит формирование исходного при проектировании уровня мощности КЗ. Если собственных источников электрической энер-

гии ЭЭС не содержит, то наибольшее значение мощности КЗ будет на границе раздела с питающей энергетической системой. При наличии собственных источников наибольшее значение мощности КЗ определяется их мощностью, мощностью КЗ, поступающей от ЭЭС, и электрической удаленностью источников электрической энергии друг от друга.

Уровни мощности КЗ в узлах нагрузки зависят от структуры ЭЭС, параметров ее сетей и состава электроприемников. При проектировании установление оптимального уровня мощности КЗ в каждом узле ЭЭС предусматривает анализ более широкого ряда по-

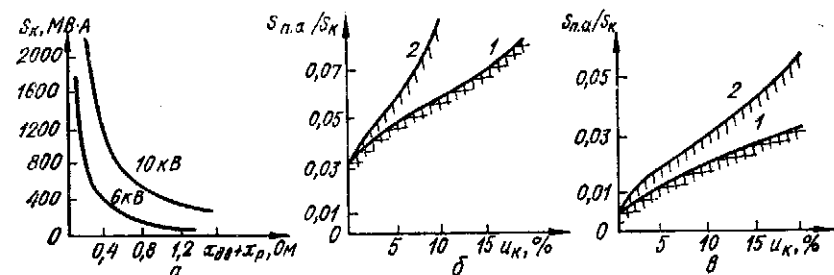


Рис. 10.15. Влияние мощности КЗ на условие сохранения остаточного напряжения $0,85U_{ном}$ при реакторном (x_p) пуске двигателя с сопротивлением $x_{дв}$ (а) и на подключение управляемых (1) и неуправляемых (2) вентильных преобразователей с коэффициентом расщепления обмоток трансформатора, равным 4 (кривые 1) и 0 (кривые 2)

казателей, к которым относятся технические и стоимостные показатели выпускаемого промышленностью электрооборудования, проводников и токоограничивающих устройств, категория бесперебойности электроснабжения и его надежность, устойчивость двигательной нагрузки, работоспособность релейной защиты, качество напряжения у потребителей, пуск и самозапуск мощных электродвигателей, потери мощности и энергии в сетях, ущерб от перерывов в электроснабжении.

Учет действия факторов, определяющих оптимальный уровень мощности КЗ, является противоречивым. С одной стороны, снижение наибольших значений мощности КЗ в узлах нагрузки позволяет устанавливать более простое и дешевое электрооборудование, уменьшить сечение проводников, применять простые решения по схемам распределения электрической энергии с использованием устройств системой автоматики АВР, АПВ и уменьшить ущерб от аварийного воздействия токов КЗ за счет их локализации. Однако при этом возрастают затраты на дополнительно устанавливаемое специальное оборудование и токоограничивающие устройства и ущерб от возможных перерывов в электроснабжении. С другой стороны, обеспечение уровня напряжения для пуска и самозапуска электродвигателей, ограничение колебаний и отклонений напряжения в узлах электроснабжения с резкопеременной ударной нагрузкой, ограничение несинусоидальности напряжения, снижение

влияния несимметрии нагрузки, обеспечение надежности работы релейной защиты требуют сохранения больших значений мощности КЗ.

При самозапуске мощных электродвигателей остаточное напряжение в узлах нагрузки зависит от мощности КЗ и реактивного сопротивления сети (рис. 10.15, а). В случае резкопеременной ударной нагрузки уровень колебаний напряжения снижается с повышением мощности КЗ в узле [см. выражение (10.6)]. Для выполнения требования (10.4) допустимая мощность подключения вентиляльных преобразователей зависит от уровня мощности КЗ в узле нагрузки (рис. 10.15, б, в).

Таким образом, при проектировании СЭС может ставиться технико-экономическая задача снижения уровней мощности КЗ в конкретных узлах до оптимальных. Ее целевой функцией являются приведенные затраты

$$Z(S_k) = \sum_{i=1}^i (K_i p_i + K_{\Delta i} p_{\Delta i}) + C_{\Sigma} + Y_{\Sigma}, \quad (10.29)$$

где K_i — основные капитальные вложения в электрооборудование СЭС (трансформаторы, РУ, электрические аппараты, ЛЭП); $K_{\Delta i}$ — дополнительные вложения в специальное электрооборудование (надбавки за специальное исполнение трансформаторов и токоограничивающих коммутационных аппаратов; стоимость токоограничивающих и дугогасящих реакторов, различного вида токоограничивающих устройств, а также устройств, обеспечивающих нормированные значения показателей качества электрической энергии, пусковых устройств и средств АРВ мощных электродвигателей); $p_i, p_{\Delta i}$ — суммарные коэффициенты отчислений от основных и дополнительных капитальных вложений в электрооборудование и его строительную часть; C_{Σ} — суммарные эксплуатационные расходы по основному и специальному электрооборудованию и стоимость потерь электрической энергии; Y_{Σ} — суммарный ущерб при снижении уровней мощности КЗ от перерывов в электроснабжении, нарушений устойчивости двигателей нагрузки, снижения надежности электроснабжения и от ухудшения качества электрической энергии у потребителей.

Критерием оптимальных уровней мощности КЗ является минимум приведенных затрат (10.29). Для минимизации целевой функции приведенных затрат целесообразно использовать метод дискретной оптимизации [17]. Последний позволяет перейти от оптимизации функции многих дискретно изменяющихся переменных (10.29) к исследованию на экстремум функции $Z = F(S_k)$ при учете множества ограничений по различным параметрам дискретной шкалы мощностей электрооборудования, шкале номинальных напряжений, нормируемым показателям качества электрической энергии, допустимым потерям мощности и энергии, уровню перенапряжений, максимальной мощности КЗ и т. д.

Существование большого количества переменных и множества ограничений значительно сужает возможности поиска глобального

минимума функции (10.29). Поэтому практически более приемлемы частные математические модели оптимизации уровней мощности КЗ. Они могут быть разработаны для конкретных узлов СЭС с выделением группы наиболее существенных переменных, зависящих от параметров режима КЗ.

Оптимальное значение расчетного тока КЗ в сетях промышленных предприятий должно определяться в основном с учетом двух факторов:

1) обеспечения возможности применения электрических аппаратов с более легкими параметрами и проводников возможно меньших сечений;

2) сохранения значений показателей качества электрической энергии в нормируемых пределах.

Для учета других факторов должны быть установлены функциональные зависимости между их количественными показателями и параметрами режима КЗ.

10.5. Координация уровней токов короткого замыкания

Координация уровней токов КЗ — это согласование их значений в различных узлах СЭС. По своей постановке она представляет собой важную технико-экономическую задачу, от решения которой зависят энергетические и стоимостные характеристики СЭС.

Что касается централизованного электроснабжения промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства, то эта задача возникает при значительных токах КЗ на границе раздела с питающей энергетической системой. Ее решение заключается в ступенчатом снижении токов КЗ, создаваемых источниками электрической энергии, при проектировании СЭС, ее эксплуатации и дальнейшем развитии либо реконструкции.

При проектировании СЭС исходными данными для решения задачи координации токов КЗ являются сведения об источниках питания и о составе электроприемников. На основе намеченного территориального размещения потребителей известными считаются предполагаемые источники электрической энергии и их характеристики для узла подключения СЭС:

установленные мощности генерирующих источников промышленного района с перспективой их развития на 8—10 лет;

мощности или токи КЗ, генерируемые источниками с учетом их развития не менее чем на 5 лет с момента ввода в эксплуатацию СЭС;

рабочее напряжение районной ЭЭС;

параметры ЛЭП между ЭЭС и СЭС.

Состав электроприемников обуславливает требования к бесперебойности электроснабжения, качеству электрической энергии, допустимой продолжительности перерывов в питании и др. По этим исходным данным могут быть сформулированы необходимые свойства проектируемой СЭС по надежности, потерям напряжения, мощности и энергии, безопасности, гибкости, жесткости и устойчивости,

а также намечены варианты и параметры предполагаемого к применению электрооборудования.

На основе количественных показателей этих свойств и характеристик электрооборудования для узлов распределения электрической энергии могут быть определены оптимальные значения токов КЗ. С их учетом следует обосновывать оптимальную структуру схемы электроснабжения — число приемных пунктов связи с ЭЭС, размещение подстанций глубокого ввода (ПГВ), выбор рабочих напряжений и количества ступеней распределения энергии.

На этапе эксплуатации ЭЭС необходимость решения вопросов координации токов КЗ возникает при изменениях схемы электроснабжения, повышении мощности генерирующих источников, мощности или пропускной способности основных элементов, при введении ограничений на режимы работы основного электрооборудования, увеличении плотности нагрузки и сетей. При этом новые уровни токов КЗ должны быть согласованы с параметрами установленного электрооборудования и сетей.

Координация токов КЗ достигается:

- стационарным или автоматическим делением сети;
- установкой токоограничивающих одноцепных и сдвоенных реакторов;
- применением различных токоограничивающих устройств;
- установкой коммутационных аппаратов повышенной стойкости к воздействию токов КЗ;

разукрупнением трансформаторных подстанций по мощности трансформаторов и секций путем установки трансформаторов с расщепленными обмотками или сдвоенных реакторов;

изменением режима нейтрали сети путем разземления части нейтралей трансформаторов, заземления нейтралей через резисторы, реакторы и токоограничивающие устройства;

электрическим делением сети путем установки разделительных трансформаторов.

В условиях последующего расширения и развития ЭЭС согласованием токов КЗ преследуют такие же цели, как при эксплуатации ЭЭС. Дополнительной рациональной мерой здесь является строительство новых приемных пунктов связи с ЭЭС и ПГВ для покрытия увеличения электрических нагрузок с использованием поперечного и продольного разделений сетей.

На всех этапах координации токов КЗ анализ их на разных ступенях распределения энергии используется для обоснования технической необходимости создания нового и модернизации существующего электрооборудования. Контроль токов КЗ в узлах нагрузки и анализ динамики их изменения являются важным фактором обеспечения надежности электроснабжения.

10.6. Примеры расчетов

Пример 10.1. Сравнить режимы параллельной и раздельной работ трансформаторов ГПП (рис. 10.16, а) по значениям начального и ударного токов трехфазного КЗ на шинах НН в точке К.

Решение. Принимаем за базисные следующие условия: $S_6 = S_K = 2000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_6 = 10,5 \text{ кВ}$. Тогда

$$I_6 = 2000 / (\sqrt{3} \cdot 10,5) = 110 \text{ кА}.$$

Спротивления схем замещения (рис. 10.16, б, в) в относительных единицах

$$x_{*1} = S_6 / S_K = 2000 / 2000 = 1;$$

$$x_{*2} = x_{*3} = x_{*4} = u_K S_6 / (100 S_{\text{тр.ном}}) = 11 \cdot 2000 / (100 \cdot 125) = 1,76.$$

Токи КЗ:

при параллельной работе трансформаторов (см. рис. 10.16, б)

$$I''_{\text{п}} = I_6 / (x_{*1} + x_{*2} / 2) = 110 / (1 + 1,76 / 2) = 58,5 \text{ кА};$$

$$I_{\text{у.п}} = 1,8 \sqrt{2} I''_{\text{п}} = 1,8 \sqrt{2} \cdot 58,5 = 149 \text{ кА};$$

при раздельной работе трансформаторов (см. рис. 10.16, в)

$$I''_{\text{р}} = I_6 / (x_{*1} + x_{*2}) = 110 / (1 + 1,76) = 36,2 \text{ кА};$$

$$I_{\text{у.р}} = 1,8 \sqrt{2} \cdot 36,2 = 92,2 \text{ кА}.$$

Переход с раздельной на параллельную работу трансформаторов ГПП вызывает повышение токов КЗ на шинах НН на

$$(I''_{\text{п}} / I''_{\text{р}} - 1) \cdot 100 = (58,5 / 36,2 - 1) \cdot 100 = 62 \text{ \%}.$$

Пример 10.2. Рассчитать сопротивление реактора напряжением 10 кВ (рис. 10.17, а) для ограничения мощности КЗ на шинах до $200 \text{ МВ} \cdot \text{А}$. Мощность КЗ, поступающая от энергетической системы, составляет $3000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$.

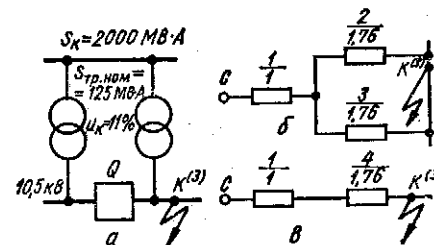


Рис. 10.16. К примеру 10.1

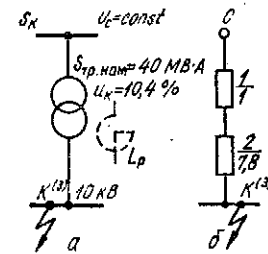


Рис. 10.17. К примеру 10.2

Решение. Принимаем за базисные следующие условия: $S_6 = 3000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_6 = 10,5 \text{ кВ}$. Тогда

$$I_6 = 3000 / (\sqrt{3} \cdot 10,5) = 165 \text{ кА}.$$

Спротивления схемы замещения (рис. 10.17, б) в относительных единицах; связи с системой

$$x_{*1} = S_6 / S_K = 3000 / 3000 = 1;$$

трансформатора

$$x_{*2} = u_K S_6 / (100 S_{\text{тр.ном}}) = 10,4 \cdot 3000 / (100 \cdot 40) = 7,8.$$

При номинальных параметрах сети в месте включения реактора [$U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$;

$$I_{\text{ном}} = 40 / (\sqrt{3} \cdot 10) = 2,31 \text{ кА}]$$

его сопротивление должно быть

$$x_{\text{р}} = [S_6 / S_{K2} - (x_{*1} + x_{*2})] I_{\text{ном}} U_6 \cdot 100 / (I_6 U) = \\ = [3000 / 200 - (1 + 7,8)] \cdot 2,31 \cdot 10,5 / (165 \cdot 10) = 9,11 \text{ \%},$$

или

$$x_p = 9,11 \cdot 10 / (\sqrt{3} \cdot 231) = 0,227 \text{ Ом.}$$

Этим данным соответствует реактор РБА10-3000-12 с параметрами

$$U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}; I_{\text{ном}} = 3000 \text{ А}; x_p = 12 \% (x_p = 0,23 \text{ Ом}).$$

Фактическая мощность КЗ за реактором с сопротивлением, приведенным к базисным условиям,

$$x_{*p,6} = x_p / 6 U_c / (100 / I_{\text{ном}} U_6) = 12 \cdot 165 \cdot 10 / (100 \cdot 3 \cdot 10,5) = 6,29,$$

составляет

$$S_K = S_6 / x_{*p,6} = 3000 / (1 + 7,8 + 6,29) = 199 \text{ МВ} \cdot \text{А.}$$

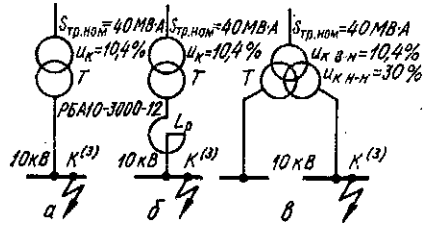


Рис. 10.18. К примеру 10.3

Пример 10.3. При реконструкции ПГВ (рис. 10.18, а) предполагается снизить мощность КЗ на шинах напряжением 10 кВ. Установить степень снижения мощности КЗ для вариантов ее ограничения, показанных на рис. 10.18, б и в. Мощность КЗ на стороне ВН равна 3000 МВ · А.

Решение. Принимаем за базисные следующие условия: $S_6 = 3000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_6 = 10,5 \text{ кВ}$. Тогда

$$I_6 = 3000 / (\sqrt{3} \cdot 10,5) = 165 \text{ кА.}$$

Используя результаты вычислений, полученные в предыдущем примере, находим:

для базового варианта (см. рис. 10.18, а)

$$S_{ка} = S_6 / x_{*p,6} = 3000 / (1 + 7,8) = 341 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

для варианта, показанного на рис. 10.18, б,

$$S_{кб} = 3000 / (1 + 7,8 + 6,29) = 199 \text{ МВ} \cdot \text{А.}$$

Сопротивления обмоток трансформатора для варианта, соответствующего рис. 10.18, а, при

$$k_{расц} = u_{кн-н} / u_{кв-н} = 30 / 10,4 = 2,88$$

следующие:

$$x_{*в} = u_{кв-н} (1 - k_{расц} / (2n)) S_6 / (100 S_{тр.ном}) = 10,4 (1 - 2,88 / (2 \cdot 2)) \cdot 3000 / (100 \cdot 40) = 2,18;$$

$$x_{*н1} = x_{*н2} = u_{кв-н} k_{расц} S_6 / (2 \cdot 100 S_{тр.ном}) = 10,4 \cdot 2,88 \cdot 3000 / (200 \cdot 40) = 11,23.$$

Мощность КЗ на одной из секций шин напряжением 10 кВ

$$S_{кв} = 3000 / (1 + 2,18 + 11,23) = 208,2 \text{ МВ} \cdot \text{А.}$$

Ограничение мощности КЗ в обоих вариантах реконструкции ПГВ практически одинаковое, поскольку при использовании реактора она уменьшается на 41,6 %, а при установке трансформатора с расщепленной обмоткой — на 39 %.

Пример 10.4. Сравнить начальные значения токов трехфазного КЗ в равноценных по пропускной способности схемах электроснабжения при номинальном режиме их работы (рис. 10.19, а, б). Исходные данные для расчета указаны на схемах.

Решение. Расчет выполняем в относительных единицах. За базисные принимаем условия $S_6 = 1000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_6 = 6,3 \text{ кВ}$. Тогда

$$I_6 = 1000 / (\sqrt{3} \cdot 6,3) = 91,6 \text{ кА.}$$

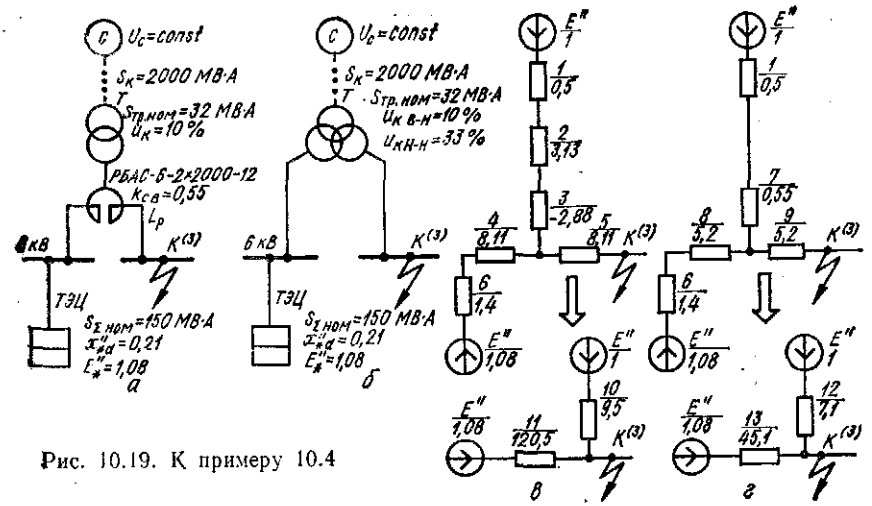


Рис. 10.19. К примеру 10.4

Сопротивления схем замещения (рис. 10.19, а и б)

$$x_{*1} = S_6 / S_K = 1000 / 2000 = 0,5;$$

$$x_{*2} = u_k S_6 / (100 S_{тр.ном}) = 10 \cdot 1000 / (100 \cdot 32) = 3,13;$$

$$x_{*3} = -k_{св} x_{ном} I_6 U / (100 U_6) = -0,55 \cdot 12 \cdot 91,6 \cdot 10 / (100 \cdot 2 \cdot 10,5) = -2,88;$$

$$x_{*4} = x_{*5} = (1 + k_{св}) x_{ном} I_6 U / (100 U_6) =$$

$$= (1 + 0,55) \cdot 12 \cdot 91,6 \cdot 10 / (100 \cdot 2 \cdot 10,5) = 8,11;$$

$$x_{*6} = x_{*d} S_6 / S_{\Sigma ном} = 0,21 \cdot 1000 / 150 = 1,4;$$

$$x_{*7} = u_{кв-н} (1 - u_{кн-н} / (u_{кв-н} \cdot 2n)) S_6 / (100 S_{тр.ном}) =$$

$$= 10 (1 - 33 / (10 \cdot 2 \cdot 2)) \cdot 1000 / (100 \cdot 32) = 0,55;$$

$$x_{*8} = x_{*9} = u_{кн-н} S_6 / (200 S_{тр.ном}) = 33 \cdot 1000 / (200 \cdot 32) = 5,2.$$

Сопротивления упрощенных схем замещения

$$x_{*10} = (0,5 + 3,13 - 2,88) + 8,11 + (0,5 + 3,13 - 2,88) \cdot 8,11 / (8,11 + 1,4) = 9,5;$$

$$x_{*11} = (8,11 + 1,4) + 8,11 + (8,11 + 1,4) \cdot 8,11 / (0,5 + 3,13 - 2,88) = 120,5;$$

$$x_{*12} = (0,5 + 0,55) + 5,2 + (0,5 + 0,55) \cdot 5,2 / (5,2 + 1,4) = 7,1;$$

$$x_{*13} = (5,2 + 1,4) + 5,2 + (5,2 + 1,4) \cdot 5,2 / (0,5 + 0,55) = 45,1.$$

Начальные значения токов трехфазного КЗ:

для схемы со сдвоенным реактором

$$I''_{с.р} = (1/9,5 + 1,08/120,5) \cdot 91,6 = 10,5 \text{ кА};$$

для схемы с трансформатором, имеющим расщепленную обмотку,

$$I''_{тр} = (1/7,1 + 1,08/45,1) \cdot 91,6 = 15,1 \text{ кА.}$$

Токоограничение в аварийном режиме при трехфазном КЗ в схеме со сдвоенным реактором эффективнее, так как сверхпереходный ток меньше на

$$(I''_{тр} / I''_{с.р} - 1) \cdot 100 = (15,1/10,5 - 1) \cdot 100 = 43,8 \%.$$

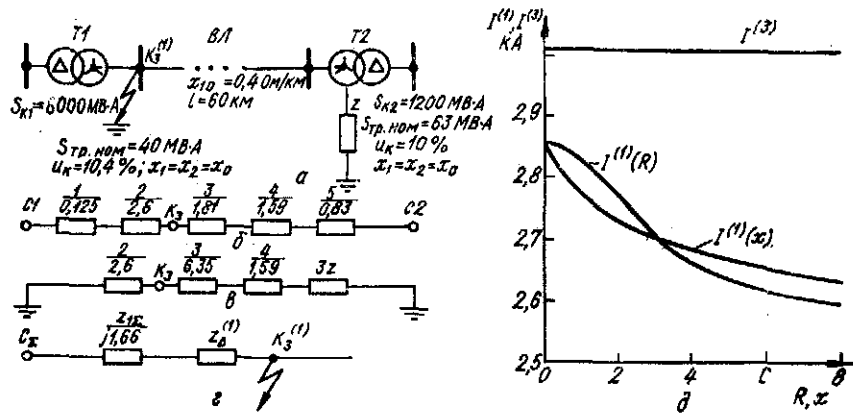


Рис. 10.20. К примеру 10.5

Пример 10.5. Исследовать эффективность ограничения тока КЗ на землю в одноцепной ВЛ напряжением 110 кВ без тросов с двусторонним питанием (рис. 10.20, а) в зависимости от вида (активное или индуктивное) и значения сопротивления, включаемого в нейтраль силового трансформатора Т2. Параметры элементов сети указаны на рисунке.

Решение. Расчет выполняем в относительных единицах ($S_6 = 1000 \text{ МВ} \times \text{А}$; $U_6 = 115 \text{ кВ}$; $I_6 = 1000/(\sqrt{3} \cdot 115) = 5,02 \text{ кА}$) с использованием метода симметричных составляющих. В качестве расчетного рассматриваем однофазное КЗ в точке К3.

Определяем сопротивления схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательности (рис. 10.20, б и в):

сопротивления связи с системой 1

$$x_{*11} = x_{*21} = S_6/S_{K1} = 1000/8000 = 0,125;$$

сопротивления трансформатора Т1

$$x_{*12} = x_{*22} = x_{*02} = u_k S_6 / (100 S_{\text{тр.ном}}) = 10,4 \cdot 1000 / (100 \cdot 40) = 2,6;$$

сопротивления ВЛ

$$x_{*13} = x_{*23} = x_0 l S_6 / U_6^2 = 0,4 \cdot 60 \cdot 1000 / 115^2 = 1,81;$$

$$x_{*03} = 3,5 x_{*13} = 3,5 \cdot 1,81 = 6,35;$$

сопротивления трансформатора Т2

$$x_{*14} = x_{*24} = x_{*04} = 10 \cdot 1000 / (100 \cdot 63) = 1,59;$$

сопротивления связи с системой 2

$$x_{*15} = x_{*25} = 1000/1200 = 0,83.$$

Результирующие сопротивления относительно точки КЗ:

для схемы замещения прямой последовательности

$$z_{*1\text{рез}} = x_{*1\text{рез}} = (0,125 + 2,6) (1,8 + 1,59 + 0,83) / (0,125 + 5,6 + 1,8 + 1,59 + 0,83) = 1,66;$$

для схемы замещения обратной последовательности

$$x_{*2\text{рез}} = x_{*1\text{рез}} = 1,66;$$

для схемы замещения нулевой последовательности с индуктивным сопротивлением в нейтрали трансформатора Т2

$$z_{*0\text{рез}} = 2,6 (3x + 6,35 + 1,59) / (2,6 + 3x + 6,35 + 1,59) = (7,8x + 20,5) / (3x + 10,5)$$

и с активным сопротивлением в нейтрали того же трансформатора

$$z_{*0\text{рез}} = j2,6 (3R + j7,9) / (j2,6 + j6,35 + j1,59 + 3R) = (j7,8R - 20,5) / (3R + j10,5).$$

Дополнительные сопротивления, обусловленные несимметрией при разных типах сопротивлений в нейтрали трансформатора Т2

$$z_{*\Delta x}^{(1)} = 1,66 + (7,8x + 20,5) / (3x + 10,5) = (12,8x + 37,9) / (3x + 10,5);$$

$$z_{*\Delta R}^{(1)} = j1,66 + (j7,8R - 20,5) / (3R + j10,5) = (j12,8R - 37,9) / (3R + j10,5).$$

Преобразуем комплексную схему замещения однофазного КЗ (рис. 10.20, з) к простейшему виду и найдем ток однофазного КЗ:

при индуктивном сопротивлении в нейтрали трансформатора Т2

$$x_*^{(1)} = 1,66 + (12,8x + 37,9) / (3x + 10,5) = (17,8x + 55,3) / (3x + 10,5);$$

$$I_x^{(1)} = m^{(1)} I_6 / x_*^{(1)} = 3 \cdot 5,02 (3x + 10,5) / (17,8x + 55,3) = (2,54x + 8,88) / (x + 3,11) \text{ кА};$$

при активном сопротивлении в нейтрали того же трансформатора

$$z_*^{(1)} = j1,66 + (j12,8R - 37,9) / (3R + j10,5) = (j17,8R - 55,3) / (3R + j10,5);$$

$$|z_*^{(1)}| = \sqrt{441R^2 + (53,4R^2 + 581)^2 / (9R^2 + 110,3)};$$

$$I_R^{(1)} = 3 \cdot 5,02 (9R^2 + 110,3) / \sqrt{441R^2 + (53,4R^2 + 581)^2} = (2,54R^2 + 31,1) / \sqrt{0,155R^2 + (R^2 + 10,9)^2} \text{ кА}.$$

На рис. 10.20, д изображены графики зависимости тока однофазного КЗ от типа и значения сопротивления, включаемого в нейтраль трансформатора Т2. Видно, что эффективность токоограничения меняется в зависимости от значения сопротивления и параметров сети.

Контрольные вопросы

1. Какими факторами и условиями предопределяются уровни мощностей и токов КЗ в СЭС?
2. Какие способы ограничения мощностей и токов КЗ можно использовать при проектировании СЭС?
3. Какие технические средства применяются для ограничения токов КЗ?
4. Как включаются токоограничивающие реакторы (одноцепные и двучленные) в СЭС?
5. В чем суть постановки задачи оптимизации уровня мощности КЗ в СЭС?
6. В чем суть постановки задачи координации уровней токов КЗ при проектировании и эксплуатации СЭС? Какие технические средства и способы ограничения токов КЗ при этом используются?
7. Как влияют мощность и ток КЗ на технико-экономические показатели элементов СЭС и качество электрической энергии?

Темы рефератов

1. Изменение уровня мощности КЗ на шинах вторичного напряжения ГПП в зависимости от мощности ее понижающих трансформаторов.
2. Разукрупнение подстанций СЭС, питающихся от ЭЭС.
3. Ступенчатое ограничение мощности и тока КЗ в СЭС.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Глава 11

УСТОЙЧИВОСТЬ РЕЖИМА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

11.1. Исходные условия исследования электромеханических переходных процессов

Задачей поддержания требуемого режима СЭС является ограничение изменений параметров узловых точек системы в таких пределах, при которых сохраняется ее устойчивость, т. е. способность системы восстанавливать исходный или близкий к нему режим после его нарушения под воздействием различных возмущений.

Для предвидения характера переходного процесса и управления им необходимо овладеть способами изменения соответствующего режима СЭС в желательном направлении. Устойчивость системы определяется на основании расчета и анализа электромеханических переходных процессов с учетом нормального и послеаварийного установившихся режимов.

В процессе анализа рассматривают существенные изменения режима и степень возмущающих воздействий на режим равновесия СЭС. К изменениям режима относятся отключения генерируемой и передаваемой мощностей, а также изменения частоты вращения генераторов и двигателей. Возмущающие воздействия разделяют на *малые* (слабые), при которых отклонения параметров режима от их установившихся значений несоизмеримо малы, и *большие* (сильные), вызывающие существенные отклонения параметров режима СЭС от их номинальных значений.

В ЭСС и СЭС различают три группы электромеханических переходных процессов:

- 1) при малых отклонениях мощности и небольших изменениях частоты вращения;
- 2) при больших отклонениях мощности и малых изменениях частоты вращения;
- 3) при больших отклонениях мощности и больших изменениях частоты вращения.

Исследования переходных процессов первой группы позволяют судить об устойчивости режима при малых возмущениях. К ним относятся нормальные переходные процессы, сопровождающие эксплуатационные режимы системы, которые связаны с изменениями нагрузки и с реакцией регулирующих устройств. Эти процессы возникают при включениях и отключениях генераторов, трансфор-

маторов, линий, нагрузок и других элементов СЭС. Малые возмущения не должны приводить к прогрессивно возрастающему изменению параметров режима равновесия СЭС.

Восстановление исходного или весьма близкого к нему режима в условиях малых возмущений сохраняет статическую устойчивость СЭС.

Исследования переходных процессов второй группы дают возможность судить об устойчивости режима при больших возмущениях, возникающих вследствие резких и существенных изменений режима системы. Причинами таких изменений являются:

- КЗ в системе и последующие их отключения;
- изменения схемы соединения системы в результате отключений агрегатов или ЛЭП со значительными нагрузками;
- нормальные включения или отключения ЛЭП с большой зарядной мощностью;
- включения генераторов под действием самосинхронизации.

Во всех этих случаях возникают значительные отклонения параметров установившегося режима.

Восстановление исходного состояния системы после большого возмущения или состояния, допустимого для ее эксплуатации по параметрам режима, обеспечивает сохранение динамической устойчивости СЭС.

Исследования переходных процессов третьей группы позволяют определить, будет ли восстановлена синхронная работа части или всей системы после выпадения из синхронизма. Способность системы восстанавливать исходное состояние после нарушения синхронной работы и некоторого, допустимого по условиям эксплуатации, асинхронного хода в результате большого возмущения позволяет обеспечить результирующую устойчивость СЭС.

В практических расчетах устойчивости СЭС принимается ряд допущений, которые, упрощая анализ электромеханических переходных процессов, не приводят к существенным погрешностям их расчета. Полагают, что:

электромеханические переходные процессы протекают при небольших изменениях частоты вращения синхронных машин (2—3 % синхронной частоты);

напряжение и ток генератора, а также ток возбуждения изменяются мгновенно;

изменения режима СЭС можно отразить в ее схеме, если ввести в нее новые значения э. д. с. генераторов, мощностей, собственных и взаимных сопротивлений;

несимметричные режимы с помощью комплексной схемы замещения можно привести к симметричным режимам. При этом считают, что изменения движения ротора вызваны только моментами, создаваемыми токами прямой последовательности;

изменения сопротивлений генераторов и трансформаторов, обусловленные насыщением стали, можно не учитывать или учитывать приближенно уменьшением сопротивления схемы замещения до $(0,6 \div 0,8) x_d'$;

результатирующее потокоцепление обмотки возбуждения в продольной оси в течение всего переходного процесса постоянно, что соответствует постоянству э. д. с. на зажимах генератора.

В процессе эксплуатации СЭС балансы мощности турбин и генераторов, электроприводов и нагрузок периодически нарушаются. Это происходит из-за несовпадения реального графика нагрузки с планируемым. С учетом принятых допущений уравнение баланса мощности для отдельного агрегата турбина — генератор в относительных единицах можно записать в виде

$$P_T = P_{эл} + P_{пот} + T_J (d^2\delta/dt^2) + P_d (d\delta/dt), \quad (11.1)$$

где P_T — мощность турбины, определяющая исходный установившийся режим системы ($P_T = P_0$); $P_{эл}$ — электромагнитная мощность генератора; $P_{пот}$ — потери в агрегате; P_d — демпферный коэффициент; δ — угол, определяющий пространственное положение продольной оси ротора; T_J — постоянная инерции вращающихся масс турбины и генератора, причем

$$T_J = GD_{\Sigma}^2 n_{ном} / (91 \cdot 4 P_{ном}) \approx GD_{\Sigma}^2 n_0^2 / (364 P_{ном}). \quad (11.2)$$

Здесь G — масса подвижных элементов; D_{Σ} — суммарный диаметр подвижных масс; n_0 и $n_{ном}$ — синхронная и номинальная частоты вращения; $P_{ном}$ — номинальная мощность агрегата; $GD_{\Sigma}^2/4$ — маховый момент.

Выражение (11.1) называют *уравнением электромеханических переходных процессов*. Если потерями мощности в агрегате и потерями в демпферных контурах пренебречь, то это уравнение примет вид

$$P_T - P_{эл} = T_J (d^2\delta/dt^2), \quad (11.3)$$

или

$$P_T - P_{эл} = T_J (d\omega/dt) = T_J \alpha, \quad (11.4)$$

где ω — угловая скорость; α — угловое ускорение вращающихся масс.

Таблица 11.1. Выражение величин, входящих в уравнение (11.1)

Уравнение	Величины			
	Угол δ	Время t	Постоянная инерции T_J	Мощности $P_{эл}, P_T$
$P_T - P_{эл} = T_J (d^2\delta/dt^2)$	рад	рад	рад	отн. ед.
$P_T - P_{эл} = T_J \omega_0 (d^2\delta/dt^2)$	рад	рад	с	отн. ед.
$P_T - P_{эл} = T_J \omega_0 P_d (d^2\delta/dt^2)$	рад	рад	с	кВт
$P_T - P_{эл} = T_J P_d (d^2\delta/dt^2) / \omega_0$	рад	с	с	кВт
$P_T - P_{эл} = T_J P_d (d^2\delta/dt^2) / (360 f_0)$	эл. град	с	с	кВт
$P_T - P_{эл} = T_J (d^2\delta/dt^2) / (360 f_0)$	эл. град	с	с	отн. ед.
$P_T - P_{эл} = T_J (d^2\delta/dt^2) / \omega_0$	рад	с	с	отн. ед.
$P_T - P_{эл} = T_J \omega_0 (d^2\delta/dt^2) / P_d$	рад	рад	кВт·с	отн. ед.
$(P_T - P_{эл}) \omega_0 = T_J (d^2\delta/dt^2)$	рад	с	с	отн. ед.

Форма записи уравнения (11.3) зависит от того, в каких единицах выражаются входящие в него величины (табл. 11.1).

При $P_T - P_{эл} < 0$ имеет место тормозящий момент, а при $P_T - P_{эл} > 0$ — ускоряющий момент. Торможения или ускорения роторов генераторов являются следствием набросов и сбросов нагрузки. Возникающий при этом небаланс мощности покрывается за счет энергии вращающихся масс.

На устойчивость нагрузки существенное влияние оказывает изменение частоты вращения. Потребляемая электродвигателями

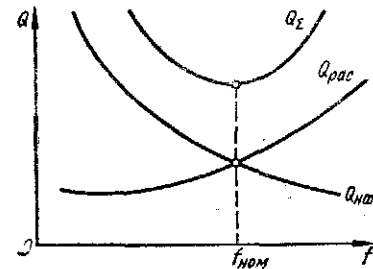


Рис. 11.1. Зависимость реактивной мощности электродвигателей от частоты

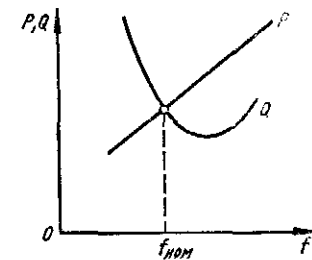


Рис. 11.2. Статические характеристики нагрузки энергетической системы

активная (тормозная) мощность при номинальных значениях скольжения, коэффициента загрузки и без учета потерь зависит от частоты:

$$P_1/P_2 = f_1/f_2. \quad (11.5)$$

Физически это означает, что при отклонениях частоты вращения двигателей с измененной угловой скоростью ($\omega = \text{var}$) нужно изменять активную мощность.

Зависимость реактивной мощности двигателей от частоты вращения определяется выражением

$$Q_1/Q_2 = (f_1/f_2)^n, \quad n = 1 \div 2. \quad (11.6)$$

С повышением частоты намагничивающая мощность $Q_{нам}$ падает, так как уменьшается насыщение, а мощность рассеяния $Q_{рас}$ увеличивается (рис. 11.1).

Для энергетической системы в целом зависимость активной P и реактивной Q мощностей от частоты вращения генераторов выражается посредством статических характеристик (рис. 11.2).

Мощность, развиваемая турбиной, зависит от массы пропускаемого через нее пара или воды в единицу времени и может изменяться с помощью первичных регуляторов, которые обладают статической или астатической характеристикой (рис. 11.3). Статизм регулятора характеризуется коэффициентом статизма

$$K_{ст} = \Delta f / \Delta P = \Delta n / \Delta P = \text{tg } \alpha. \quad (11.7)$$

Первичные регуляторы частоты вращения имеют естественную статическую характеристику. С помощью дополнительных устройств

Из определения устойчивости следует, что условием сохранения устойчивости системы (критерием устойчивости) является соотношение

$$\Delta W / \Delta \Pi > \Delta W_r / \Delta \Pi, \quad (11.10)$$

или в дифференциальной форме

$$d(W_r - W) / d\Pi < 0. \quad (11.11)$$

Величину $W_r - W = \Delta W_\Sigma$ называют *избыточной энергией*. Эта энергия положительна, если дополнительная генерируемая энергия, появившаяся при возмущении, возрастает интенсивнее, чем нагрузка системы с учетом потерь в ней. При этом условия критерий устойчивости запишется в виде

$$d(\Delta W_\Sigma) / d\Pi < 0, \quad (11.12)$$

т. е. режим устойчив, если производная от избыточной энергии по определяющему параметру Π отрицательна.

Для обеспечения статической устойчивости системы существенное значение имеет запас статической устойчивости, который определяет допустимые пределы ухудшения режима до нарушения статической устойчивости. Запас статической устойчивости может характеризоваться углами сдвига роторов генераторов и напряжениями в узловых точках системы.

Большое значение имеет наличие запаса статической устойчивости в послеаварийном режиме, который уменьшается по сравнению с запасом статической устойчивости в нормальном режиме, причем в последнем запас устойчивости по увеличению мощности электрической передачи должен составлять 15—20 %, а в послеаварийном режиме — 5—10 %, но эти значения строго не лимитируются.

Чтобы проверить статическую устойчивость системы, необходимо составить дифференциальные уравнения малых колебаний для всех ее элементов и регулирующих устройств, а затем исследовать корни характеристического уравнения на устойчивость. Поскольку строгое решение такой задачи очень сложно, в инженерных расчетах применяются приближенные методы исследования устойчивости, которые основываются на использовании практических критериев устойчивости.

Рассмотрим простейшую схему электрической передачи, в которой генератор работает через трансформатор и линию на шины неизменного напряжения, т. е. на шины системы, мощность которой настолько велика по сравнению с мощностью рассматриваемой электрической передачи, что напряжение на ее шинах можно считать неизменным по амплитуде и фазе при любых режимах (рис. 11.7, а).

При исследовании характера переходного процесса удобно пользоваться угловой характеристикой $P = f(\delta)$, где P — электромагнитная мощность генератора; δ — угол сдвига по фазе между синхронной э. д. с. генератора E_q и напряжением на шинах приемной системы U_c .

Из схем замещения рассматриваемой электропередачи (рис. 11.7, б, в) следует, что результирующее сопротивление

$$x_{дрез} = x_d + x_{тр1} + x_n/2 + x_{тр2}. \quad (11.13)$$

Векторная диаграмма для нормального режима работы этой электропередачи показана на рис. 11.8, откуда видно, что $bc = E_q \times \sin \delta$, или $bc = I_a x_{дрез} \cos \varphi = I_a x_{дрез}$. При этом

$$E_q \sin \delta = I_a x_{дрез}. \quad (11.14)$$

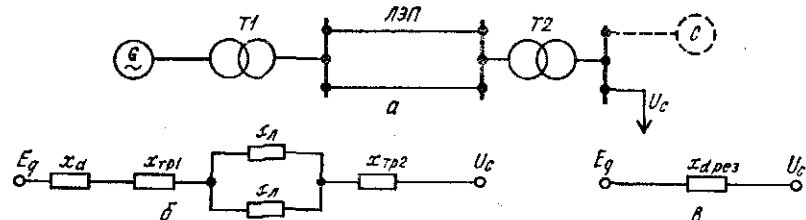


Рис. 11.7. Схема электропередачи (а) и схемы ее замещения (б, в)

Умножив обе части равенства (11.14) на $U_c / x_{дрез}$, получим активную мощность, передаваемую приемной системе:

$$P = E_q U_c \sin \delta / x_{дрез}, \quad (11.15)$$

где

$$E_q = \sqrt{(U_c + I_p x_{дрез})^2 + (I_a x_{дрез})^2},$$

или

$$E_q = \sqrt{(U_c + Q x_{дрез} / U_c)^2 + (P x_{дрез} / U_c)^2}.$$

Из выражения (11.15) следует, что при постоянстве э. д. с. генераторов E_q и напряжения на шинах приемной системы U_c изменение передаваемой мощности P зависит лишь от изменения угла δ .

Мощность, отдаваемую генератором в сеть, можно изменить также воздействием на регулирующие клапаны турбины. В исходном режиме мощность турбины уравнивается мощностью генератора, работающего с неизменной частотой вращения. По мере открытия регулирующих клапанов (или направляющего аппарата у гидротурбин) мощность турбины возрастает, в результате чего равновесие вращающего и тормозящего моментов турбины и генератора нарушается, что вызывает ускорение вращения генератора.

При ускорении генератора вектор э. д. с. \vec{E} перемещается относительно вращающегося с неизменной скоростью вектора напряжения приемной системы \vec{U}_c . Связанное с этим увеличение угла δ приводит к соответствующему повышению мощности генератора по синусоидальному закону до тех пор, пока она вновь не уравни-

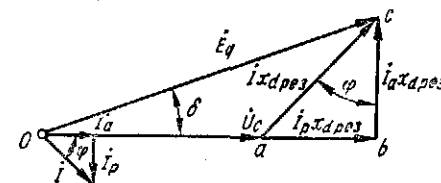


Рис. 11.8. Векторная диаграмма для нормального режима работы электропередачи

сит возросшую мощность турбины. Поскольку зависимость $P = f(\delta)$ носит синусоидальный характер, с увеличением угла δ мощность P сначала возрастает, а затем, достигнув максимального значения, начинает падать.

При заданных значениях э. д. с. генератора E_q и напряжения приемника U_c существует определенный максимум передаваемой мощности, который называется *идеальным пределом мощности*. Он наступает при $\delta = 90^\circ$ и определяется выражением

$$P_{\max} = E_q U_c / x_{\text{дрез}}. \quad (11.16)$$

Графическая зависимость активной мощности P от угла δ показана на рис. 11.9.

В установившемся режиме мощность турбины P_0 равна мощности генератора P , т. е. между неизменной мощностью первичного двигателя и мощностью генератора существует равновесие. При этом каждому значению мощности турбины P_0 соответствует две точки равновесия на угловой характеристике мощности генератора (см. рис. 11.9) и, следовательно, два значения угла (δ_a и δ_b). Однако устойчивый режим работы возможен лишь в точке a , что легко показать, рассмотрев характер движения ротора генератора при небольшом отклонении от точек равновесия (рис. 11.10).

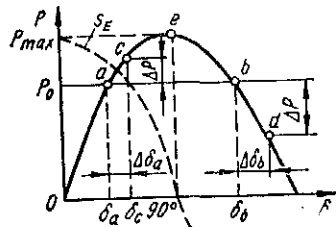


Рис. 11.9. Угловая характеристика и характеристика синхронизирующей мощности генератора

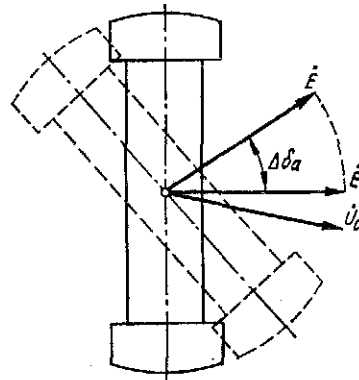


Рис. 11.10. Изменение положения ротора генератора при малом возмущении

Предположим, что вследствие небольшого возмущения угол δ_a увеличился на $\Delta\delta_a$. Этому случаю соответствуют переход рабочей точки на угловой характеристике из a в c и увеличение мощности генератора на ΔP , т. е. положительному приращению угла соответствует положительное приращение мощности.

В результате увеличения мощности генератора при неизменной мощности турбины равновесие вращающего и тормозящего моментов турбины и генератора нарушается, и на валу машины возникает тормозящий момент. Под его влиянием ротор генератора начинает замедляться, что обуславливает перемещение связанного с ротором вектора э. д. с. генератора \vec{E} в сторону уменьшения угла δ . С уменьшением угла δ вновь восстанавливается исходный

режим в точке a . Следовательно, данный режим системы является устойчивым. К этому же выводу можно прийти и при отрицательном приращении угла $\Delta\delta$ в точке a .

В точке b на рис. 11.9 положительное приращение угла $\Delta\delta$ сопровождается отрицательным изменением мощности генератора ΔP . Уменьшение мощности генератора вызывает появление ускоряющего момента, под влиянием которого угол δ не уменьшается, а возрастает. С увеличением угла δ мощность генератора продолжает падать, что обуславливает дальнейшее увеличение угла δ и т. д. Процесс протекает прогрессивно и генератор выпадает из синхронизма, т. е. режим работы в точке b статически неустойчив.

Таким образом, состояние генератора, соответствующее точке a и любой другой точке на возрастающей части синусоидальной характеристики мощности, статически устойчиво, а состояние генератора, соответствующее всем точкам спадающей части характеристики, статически неустойчиво. Отсюда вытекает следующий критерий статической устойчивости системы:

$$\Delta P / \Delta \delta > 0,$$

или

$$dP/d\delta > 0. \quad (11.17)$$

Из (11.17) следует, что статическая устойчивость системы обеспечивается, если приращения угла δ и мощности генератора P имеют один и тот же знак.

Производную $dP/d\delta = S_E$ принято называть *синхронизирующей мощностью*. Эта мощность характеризует реакцию генератора на увеличение угла сдвига ротора. Положительный знак ее является критерием статической устойчивости. Если ΔP отсутствует, то синхронизирующая мощность определяется выражением

$$S_E = (dP/d\delta)_{E=\text{const}} = E_q U_c \cos \delta / x_{\text{дрез}}. \quad (11.18)$$

При $\delta < 90^\circ$ синхронизирующая мощность положительна и обеспечиваются устойчивые стационарные режимы работы системы (см. рис. 11.9). Количественно статическая устойчивость характеризуется коэффициентом запаса

$$K_s = (P_{\max} - P_0) / P_0,$$

где P_{\max} и P_0 — максимальная и номинальная мощности системы.

11.3. Динамическая устойчивость

Электроэнергетическая система динамически устойчива, если при каком-либо сильном возмущении сохраняется синхронная работа всех ее элементов. При исследовании устойчивости необходимо определить, как поведет себя система в экстремальных условиях и какие меры следует принять, чтобы избежать нежелательных последствий.

Для выяснения принципиальных положений динамической устойчивости рассмотрим явления, проходящие при внезапном отключении одной из двух параллельных цепей ЛЭП (рис. 11.11, а).

Схемы замещения электропередачи в нормальном режиме при работе с двумя включенными цепями и в режиме с одной отключенной цепью показаны на рис. 11.11, б и в соответственно. Результирующее сопротивление в нормальном режиме определяется выражением

$$x'_{дрез1} = x'_d + x_{тp1} + x_n/2 + x_{тp2}, \quad (11.19)$$

а после отключения одной из цепей — выражением

$$x'_{дрез2} = x'_d + x_{тp1} + x_n + x_{тp2}. \quad (11.20)$$

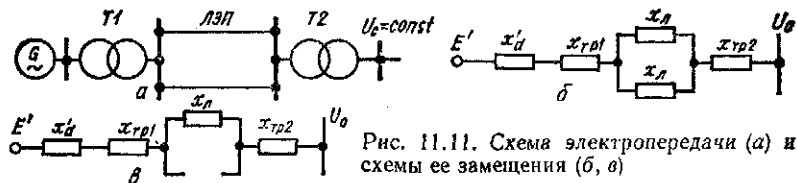


Рис. 11.11. Схема электропередачи (а) и схемы ее замещения (б, в)

Так как $x'_{дрез2} > x'_{дрез1}$, то справедливо соотношение

$$P_{max2} = E'U_c/x'_{дрез2} < P_{max1} = E'U_c/x'_{дрез1}. \quad (11.21)$$

Из (11.21) следует, что при неизменных E' , U_c и изменении $x'_{дрез}$ максимальное значение передаваемой мощности меняется.

При внезапном отключении одной из цепей ЛЭП ротор не успевает из-за инерции мгновенно изменить угол δ . Поэтому режим будет характеризоваться точкой *b* на другой угловой характеристике генератора — характеристике 2 на рис. 11.12. После уменьшения его мощности возникает избыточный ускоряющий момент, под действием которого угловая скорость ротора, а следовательно, и угол δ увеличиваются. С увеличением угла мощность генератора возрастает по характеристике 2.

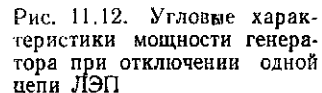


Рис. 11.12. Угловые характеристики мощности генератора при отключении одной цепи ЛЭП

В процессе ускорения ротор генератора по инерции проходит точку *c*, после которой его вращающий момент становится опережающим.

Ротор начинает затормаживаться и, начиная с точки *d*, его угловая скорость уменьшается. При этом возникают затухающие колебания вокруг нового установившегося режима, соответствующего точке *e*. Если угловая скорость ротора возрастает до значения, соответствующего точке *e* или другим точкам на нисходящей части характеристики $P = f(\delta)$, то генератор выпадает из синхронизма.

Следовательно, об устойчивости системы можно судить по изменению угла δ во времени. Изменение δ , показанное на рис. 11.13, а, соответствует устойчивой работе системы. При изменении δ по кривой, изображенной на рис. 11.13, б, система неустойчива.

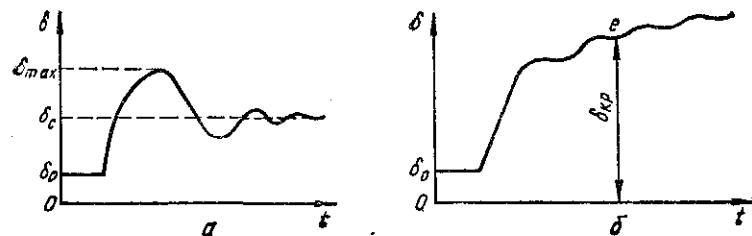


Рис. 11.13. Устойчивый (а) и неустойчивый (б) режимы работы системы

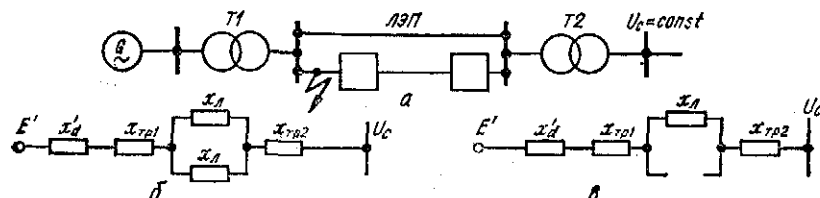


Рис. 11.14. Схема электропередачи (а) и схемы ее замещения для нормального (б) и послеаварийного (в) режимов

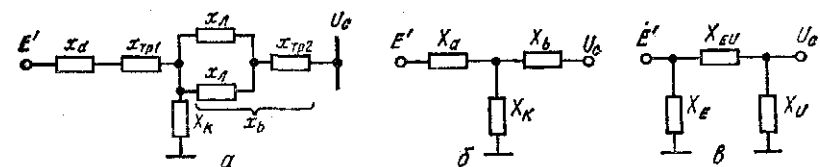


Рис. 11.15. Схема замещения электропередачи для аварийного режима (а) и ее преобразования (б, в)

Рассмотрим переходный процесс при КЗ одной из цепей ЛЭП с последующим ее отключением (рис. 11.14, а). Схемы замещения электропередачи для нормального и послеаварийного режимов показаны соответственно на рис. 11.14, б и в.

Угловая характеристика мощности генератора для нормального режима определяется выражением

$$P_I = E'U_c \sin \delta / X_I, \quad (11.22)$$

где

$$X_I = x'_{дрез1} = x'_d + x_{тp1} + x_n/2 + x_{тp2},$$

а для послеаварийного режима — выражением

$$P_{III} = E'U_c \sin \delta / X_{III}, \quad (11.23)$$

где

$$X_{III} = x'_{дрез2} = x'_d + x_{тp1} + x_n + x_{тp2}.$$

Схему замещения электропередачи для аварийного режима можно получить, если в точку КЗ включить шунтирующее сопротивление X_k (рис. 11.15, а), значение которого зависит от вида КЗ: $X_k = 0$ при трехфазном КЗ; $X_k = X_2$ при двухфазном КЗ; $X_k = -X_2 + X_0$ при однофазном КЗ и $X_k = X_2 X_0 / (X_2 + X_0)$ при двух-

фазном КЗ на землю, где X_0 и X_2 — суммарные сопротивления схем нулевой и обратной последовательностей относительно точки КЗ.

Схему замещения, показанную на рис. 11.15, а, можно последовательно преобразовать из звезды (рис. 11.15, б) в треугольник (рис. 11.15, в), в котором

$$\left. \begin{aligned} X_E &= X_a + X_k + X_a X_k / X_b; \\ X_U &= X_b + X_k + X_b X_k / X_a; \\ X_{EU} &= X_a + X_b + X_a X_b / X_k. \end{aligned} \right\} (11.24)$$

Сопротивления X_E и X_U , подключенные непосредственно к э. д. с. E' и к напряжению U_c , на активную мощность генератора в аварийном режиме существенно не влияют и могут не учитываться. При этом вся активная мощность генератора передается через сопротивление $X_{EU} = X_{II}$, связывающее э. д. с. генератора E' с напряжением приемной системы U_c , а угловая характеристика мощности генератора определяется выражением

$$P_{II} = E' U_c \sin \delta / X_{II}. \quad (11.25)$$

Амплитуда угловой характеристики мощности для аварийного режима зависит от сопротивления X_{EU} . Это сопротивление является взаимным сопротивлением между э. д. с. E' и U_c . С уменьшением сопротивления шунта сопротивление X_{EU} увеличивается, что приводит к снижению амплитуды угловой характеристики мощности. Наиболее тяжелый аварийный режим будет при трехфазном КЗ в начале ЛЭП, когда сопротивление X_{EU} бесконечно велико, а амплитуда угловой характеристики мощности равна нулю. Самый легкий аварийный режим соответствует однофазному КЗ, при котором сопротивление шунта КЗ будет максимальным.

Угловые характеристики мощности генератора для нормального $P_I(\delta)$, аварийного $P_{II}(\delta)$ и послеаварийного $P_{III}(\delta)$ режимов показаны на рис. 11.16. Отдаваемая генератором мощность и угол между э. д. с. E' и напряжением U_c в нормальном режиме обозначены соответственно P_0 и δ_0 . В начальный момент КЗ из-за инерции ротора генератора угол δ мгновенно измениться не может. Это приводит к внезапному уменьшению мощности от точки a на характеристике $P_I(\delta)$ до точки b на характеристике $P_{II}(\delta)$. В результате на валу генератора возникает некоторый избыточный ускоряющий момент, обусловленный разностью мощностей первичного двигателя и генератора, под влиянием которого ротор генератора начинает перемещаться относительно вектора напряжения приемной системы (угол δ увеличивается). Этому перемещению соответствует увеличение мощности по характеристике $P_{II}(\delta)$ в направлении к точке c .

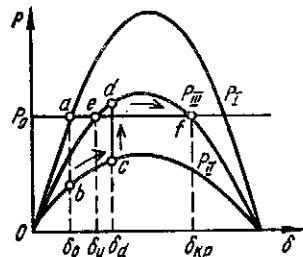


Рис. 11.16. Угловые характеристики мощности генератора для разных режимов

Если при каком-либо значении угла $\delta_{откл} = \delta_d$ поврежденная цепь отключится, то в этот момент произойдет изменение мощности генератора из точки c характеристики $P_{II}(\delta)$ в точку d характеристики $P_{III}(\delta)$. Мощность же первичного двигателя генератора во время переходного процесса, ввиду инерционности системы регулирования частоты вращения турбины, останется неизменной и равной P_0 .

После отключения КЗ электромагнитная мощность генератора будет больше механической мощности турбины и на его валу появится тормозящий момент. Несмотря на это, ротор генератора еще некоторое время продолжает движение в сторону увеличения угла δ , пока не израсходуется запасенная им на пути от δ_0 до $\delta_{откл}$ кинетическая энергия. В этот период генератор покрывает избыток отдаваемой им электромагнитной мощности за счет кинетической энергии, запасенной им во время ускорения.

Если вся кинетическая энергия будет израсходована до достижения ротором генератора угла $\delta_{кр}$ (точка f на характеристике $P_{III}(\delta)$), то под действием избыточного тормозящего момента ротор начнет перемещаться в обратном направлении по характеристике $P_{III}(\delta)$ и после нескольких колебаний перейдет в новый установившийся режим с углом δ_y . Если ротор пройдет угол $\delta_{кр}$, то избыточный момент вновь станет ускоряющим. С увеличением угла δ ускоряющий момент ротора будет прогрессивно возрастать и генератор выйдет из синхронизма. Таким образом, в первом случае система динамически устойчива, а во втором — неустойчива.

Рассмотренные переходные режимы системы при разных возмущениях позволяют сформулировать отличительные признаки статической и динамической устойчивости:

при статической устойчивости в процессе появления возмущений мощность генератора изменяется по одной и той же угловой характеристике, а после их исчезновения параметры системы остаются такими же, как и до появления возмущений;

при динамической устойчивости система переходит на другую угловую характеристику, причем после исчезновения возмущений ее параметры отличаются от первоначальных, но остаются в допустимых пределах.

11.4. Результирующая устойчивость

Результирующая устойчивость характеризует способность системы самопроизвольно восстанавливать синхронную работу после кратковременного нарушения устойчивости.

Если выпавшая из синхронизма система после устранения причины нарушения устойчивости вновь втягивается в синхронизм, то считают, что система с подключенными к ней генераторами обладает результирующей устойчивостью. При расчете переходных процессов, вызванных нарушением устойчивости, пользуются понятиями асинхронного режима и асинхронного момента.

Асинхронным называется режим работы системы при больших отклонениях частоты вращения роторов генераторов или двигателей

от синхронной частоты. Выпадение генератора из синхронизма сопровождается резким повышением частоты вращения ротора.

При асинхронном ходе и частоте, большей чем синхронная, генератор работает как асинхронный и генерирует активную мощность, которая называется *асинхронной*.

Причинами появления асинхронного режима могут быть: исчезновение тока возбуждения; нарушение динамической устойчивости после резкого возмущения; нарушение статической устойчивости сильно перегруженной системы при слабом возмущении.

Возникновение асинхронного режима приводит к различным нарушениям нормальной работы СЭС:

могут появляться периодические понижения напряжения, при которых затормаживаются двигатели и отключаются пускатели в сети напряжением 0,4 кВ, а также понижается устойчивость параллельной работы генераторов в синхронно работающих частях ЭЭС;

из-за снижения напряжения и увеличения тока может нарушиться селективная работа релейной защиты;

возникают колебания активной мощности, при которых появляется знакопеременный момент на валу турбины, приводящий к дополнительным механическим усилиям;

возможно возникновение резонансных колебаний, опасных для оборудования и синхронной работы частей ЭЭС;

при наличии между отдельными частями ЭЭС большого активного сопротивления увеличивается дефицит активной мощности в приемной части системы.

В асинхронном режиме генератор, кроме момента, обусловленного его возбуждением, развивает еще и асинхронный момент под действием свободных токов, которые возникают в его обмотке возбуждения и демпферных контурах из-за движения ротора по отношению к полю, созданному внешними э. д. с.

Наличие несимметрии генератора (явнополюсность, одноосность обмотки возбуждения и т. д.) приводит к тому, что его асинхронная мощность пульсирует около некоторого среднего значения (рис. 11.17). Аналогично изменяются реактивная мощность и напряжение.

Таким образом, асинхронный момент генератора может быть представлен в виде двух составляющих: среднего асинхронного момента и знакопеременного. Первый зависит от типа и конструкции генератора, а также от среднего скольжения; второй не оказывает существенного влияния на протекание асинхронного режима и им в расчетах пренебрегают.

Средний асинхронный момент генератора, подключенного непосредственно к шинам неизменного напряжения, определяется выражением

$$M_{ac} = U_c^2 \{ sT'_d(x_d - x'_d) / (1 + (sT'_d)^2) x_d x'_d + sT''_d(x'_d - x''_d) / (1 + (sT''_d)^2) x'_d x''_d + sT''_q(x_q - x''_q) / (1 + (sT''_q)^2) x_q x''_q \} / 2, \quad (11.26)$$

где s — скольжение (в отличие от асинхронных двигателей здесь за положительное принято скольжение при частоте вращения ротора, большей чем синхронная); T'_d — постоянная времени обмотки возбуждения при замкнутой обмотке статора; T''_d и T''_q — сверхпереходные постоянные времени генератора в продольной и поперечной осях; x_d, x'_d, x''_d — синхронное, переходное и сверхпереходное сопротивления генератора по продольной оси; x_q и x''_q — синхронное и сверхпереходное сопротивления генератора по поперечной оси.

Из (11.26) следует, что асинхронный момент генератора имеет три составляющие:

$$M_{ac} = M'_d + M''_d + M''_q, \quad (11.27)$$

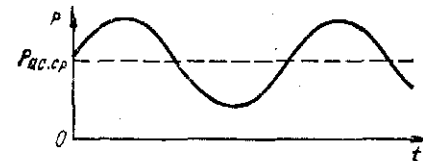


Рис. 11.17. Пульсация асинхронной мощности генератора

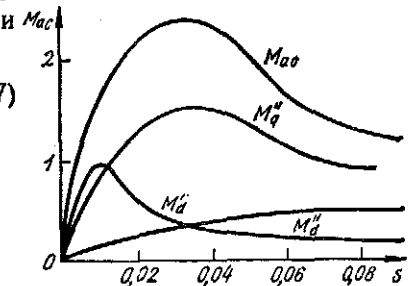


Рис. 11.18. Зависимость асинхронного момента генератора и его составляющих от скольжения

которые обусловлены действием обмотки возбуждения (M'_d), а также демпферных продольной (M''_d) и поперечной (M''_q) обмоток.

Зависимость асинхронного момента генератора и его составляющих от скольжения изображена на рис. 11.18. Видно, что наибольший вклад в M_{ac} вносит составляющая M''_q .

Скольжения, соответствующие максимальным значениям отдельных составляющих асинхронного момента, можно определить, если продифференцировать выражения $sT'_d / [1 + (sT'_d)^2]$, $sT''_d / [1 + (sT''_d)^2]$ и $sT''_q / [1 + (sT''_q)^2]$ по скольжению и приравнять производные к нулю.

Тогда из равенства

$$\partial M'_d / \partial s = \{ T'_d [1 + (sT'_d)^2] - sT'_d \cdot 2sT'^2_d \} / [1 + (sT'_d)^2]^2 = 0$$

находим

$$s = 1/T'_d, \quad (11.28)$$

а из аналогичных равенств $\partial M''_d / \partial s = 0$ и $\partial M''_q / \partial s = 0$ получаем

$$s = 1/T''_d \text{ и } s = 1/T''_q.$$

Из (11.28) следует, что чем больше постоянная времени контура, в котором находятся свободные токи, тем меньше скольжение, соответствующее максимуму асинхронного момента.

Пример 11.1. Для СЭС, схема которой изображена на рис. 11.19, а, определить коэффициент запаса статической устойчивости по идеальному пределу мощности. Система состоит из гидроэлектростанции (ГЭС) с генераторами G1, G2 и ТЭС с эквивалентным турбогенератором G3.

Параметры гидрогенераторов: $U_{ном} = 10,5$ кВ, $P_{г1} = P_{г2} = 200$ МВт, $\cos \varphi_{г1} = \cos \varphi_{г2} = 0,85$, $x_{d1} = x_{d2} = 90$ %, $x'_{d1} = x'_{d2} = 25$ %; параметры повышающих трансформаторов: $K = 10,5/242$, $S_{тр1} = S_{тр2} = 240$ МВ · А, $u_{к1} = u_{к2} = 12$ %; параметры ЛЭП: $l = 300$ км, $x_0 = 0,41$ Ом/км, $P_{л} = 350$ МВт, $\cos \varphi_{л} = 0,9$; параметры понижающего трансформатора: $K = 10,5/233$, $S_{тр3} = 1800$ МВ · А; $u_{к3} = 14$ %; параметры турбогенератора: $U_{ном3} = 10,5$ кВ, $P_{г3} = 1500$ МВт, $\cos \varphi_{г3} = 0,8$, $x_{d3} = 180$ %; параметры потребителей: $P_{н} = 1200$ МВт, $\cos \varphi_{н} = 0,8$, $U_{н} = 220$ кВ.

Решение. Так как мощность ТЭС значительно превышает мощность ГЭС, то можно принять, что генераторы G1 и G2 подключены к системе неограниченно большой мощности и напряжение на шинах потребителя постоянно ($U_{н} = 220$ кВ). При этом условия схему замещения СЭС можно представить в виде,

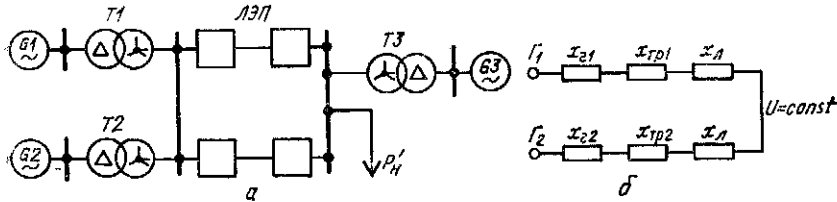


Рис. 11.19. К примеру 11.1

показанном на рис. 11.19, б. Принимая за базисную мощность $S_6 = 350$ МВ · А, а за базисное напряжение $U_6 = 220$ кВ, приводим реактивные сопротивления элементов к базисным условиям и находим их результирующие значения:

для генераторов

$$x_{г1} = x_{г2} = x_d U_{ном}^2 S_6 K^2 / (S_{ном} U_6^2 \cdot 100) = 90 \cdot 10,5^2 \cdot 350 \cdot 242^2 / ((200/0,85) \cdot 220^2 \cdot 100 \cdot 10,5^2) = 1,61;$$

для повышающих трансформаторов

$$x_{тр1} = x_{тр2} = x_{тр} U_{ном}^2 S_6 / (100 S_{ном} U_6^2) = 12 \cdot 242^2 \cdot 350 / (100 \cdot 240 \cdot 220^2) = 0,212;$$

для ЛЭП

$$x_{л} = x_0 l S_6 / U_6^2 = 0,41 \cdot 300 \cdot 350 / 220^2 = 0,89.$$

Результирующее реактивное сопротивление СЭС

$$x_{дрез} = (x_{г1} + x_{тр1} + x_{л}) / 2 = (0,212 + 1,61 + 0,89) / 2 = 1,36.$$

Внешнее реактивное сопротивление СЭС

$$x_c = (x_{тр1} + x_{л}) / 2 = (0,212 + 0,89) / 2 = 0,55.$$

Переходное реактивное сопротивление генератора ГЭС

$$x'_d = x'_d \% U_{ном}^2 S_6 K^2 / (100 S_{ном} U_6^2) = 25 \cdot 10,5^2 \cdot 350 \cdot 242^2 / (100(200/0,85) \cdot 220^2 \cdot 10,5^2) = 0,45.$$

Результирующее переходное сопротивление СЭС

$$x_I = x'_{дрез} = (0,45 + 0,212 + 0,89) / 2 = 0,775.$$

Напряжение на шинах потребителя в относительных единицах

$$u_* = U / U_6 = 220 / 220 = 1.$$

Активная мощность в относительных единицах, передаваемая по ЛЭП,

$$P_* = P_{л} / S_6 = 350 / 350 = 1.$$

Реактивная мощность при $\cos \varphi_{л} = 0,9$ ($\operatorname{tg} \varphi_{л} = 0,485$), передаваемая по ЛЭП,

$$Q_{*л} = P_{*л} \operatorname{tg} \varphi_{л} = 1 \cdot 0,485 = 0,485.$$

Полная мощность, передаваемая по ЛЭП,

$$S_{*л} = P_{*л} + jQ_{*л} = 1 + j0,485.$$

Для определения коэффициента запаса статической устойчивости СЭС по идеальному пределу мощности находим э. д. с. холостого хода генератора

$$E_q = \sqrt{(U + Q_0 x_{дрез} / U)^2 + (P_0 x_{дрез} / U)^2} = \sqrt{(1 + 0,485 \cdot 1,36 / 1)^2 + (1 \cdot 1,36 / 1)^2} = 2,15$$

и составляем уравнение угловой характеристики его мощности

$$P = E_q U \sin \delta / x_{дрез} = 2,15 \cdot 1 \sin \delta / 1,36 = 1,58 \sin \delta.$$

Изменяя угол δ от 0 до 180°, можно определить мощность генераторов ГЭС, которая должна передаваться в СЭС без нарушения ее статической устойчивости. Результаты расчета приведены в табл. 11.2.

Идеальный предел мощности, соответствующий $\delta = 90^\circ$,

$$P_{\max \text{ ид}} = 2,15 \cdot 1 / 1,36 = 1,58.$$

Угол сдвига фаз между э. д. с. генераторов и напряжением на зажимах потребителя

$$\delta_0 = \arcsin (P_0 / P_{\max \text{ ид}}) = \arcsin (1 / 1,58) = 39^\circ 20'.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости СЭС по идеальному пределу мощности

$$K_3 = (1,58 - 1) \cdot 100 / 1 = 58 \text{ \%}.$$

Таблица 11.2. Результаты расчета угловой характеристики мощности генераторов ГЭС

δ , град	$\sin \delta$	P
0	0	0
20	0,34	0,537
40	0,64	1,02
60	0,87	1,37
80	0,98	1,56
90	1	1,58
100	0,98	1,56
120	0,87	1,37
140	0,64	1,02
160	0,34	0,537
180	0	0

Контрольные вопросы

1. На какие группы подразделяются электромеханические переходные процессы?
2. Какие допущения принимаются при анализе устойчивости СЭС?
3. Какие физические процессы описываются уравнениями электромеханических переходных процессов?
4. Какие схемы замещения синхронных генераторов используются в расчетах устойчивости?
5. Как формулируется критерий статической устойчивости системы в общем виде?
6. С какой целью выполняется исследование статической устойчивости СЭС?
7. Как формулируются особенности исследования динамической устойчивости СЭС при различных видах КЗ?
8. Какие отличительные признаки статической и динамической устойчивости СЭС?
9. Какой режим генератора называется асинхронным?
10. Что представляет собой асинхронный момент генератора?

Темы рефератов

1. Особенности электромеханических переходных режимов и их влияние на работу СЭС.
2. Математическое описание электромеханических переходных процессов в СЭС.
3. Отличительные особенности статической, динамической и результирующей устойчивости СЭС.

Глава 12

ПРАКТИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

12.1. Модели элементов при анализе устойчивости

Математическое описание СЭС для исследования их устойчивости основывается на теории дифференциальных уравнений. При этом анализ устойчивости режимов реальных СЭС сводится к исследованию устойчивости решений систем дифференциальных уравнений.

В общем виде СЭС описываются системами дифференциальных уравнений высокого порядка. Для практических расчетов порядок системы уравнений обычно не превышает шести. При ручном счете можно анализировать до десяти уравнений, а при использовании ЭВМ решающие системы уравнений более высоких порядков.

Для оценки устойчивости применяют линеаризацию систем дифференциальных уравнений и понижение их порядка с целью получения простых универсальных методов и алгоритмов расчета. В линейных системах уравнений и системах с несущественной нелинейностью устойчивость анализируется методом малых колебаний. Для больших возмущений при анализе устойчивости используется второй метод Ляпунова или численное интегрирование.

Понижение порядка систем уравнений, описывающих исследуемые процессы, может быть достигнуто их упрощением:

разделением процессов на быстрые и медленные с обособленным их рассмотрением;

заменой групп источников или двигателей одним эквивалентным; представлением нагрузки обобщенными характеристиками;

выделением существенных факторов в протекающих процессах и пренебрежением второстепенными факторами и малыми параметрами;

линеаризацией характеристик элементов СЭС;

разделением сложной системы на простые подсистемы, которые можно рассматривать независимо.

Трудоемкость решения задачи устойчивости зависит также от уровня аналитического описания математических моделей основных элементов СЭС. Для решения задач устойчивости применительно к СЭС промышленных предприятий приемлемы упрощенные матема-

тические описания синхронных и асинхронных машин, элементов сети и узлов нагрузки.

Упрощенное уравнение движения синхронной машины (генератора, компенсатора) может использоваться в виде (11.4), где электрическая (внутренняя) мощность одиночной машины

$$P = E(t) I(t) \cos \varphi(t). \quad (12.1)$$

Здесь $E(t)$ — линейная э. д. с. машины; $I(t)$ — ток в обмотке ее статора.

Для электрической системы, которая содержит не одну машину, при определении внутренней мощности необходимо учитывать влияние других машин через их э. д. с. и взаимные углы положения роторов $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$. Уравнение внутренней мощности i -й синхронной машины, которая работает параллельно с $n - 1$ другими синхронными машинами, имеет вид

$$P_i = E_{qi}^2 y_{ii} \sin \alpha_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_{qi} E_{qj} y_{ij} \sin(\delta_{ij} - \alpha_{ij}), \quad (12.2)$$

где E_{qi} , E_{qj} — модули э. д. с. синхронных машин; y_{ii} — модуль собственной эквивалентной проводимости; y_{ij} — модуль взаимной эквивалентной проводимости между источниками; $\alpha_{ii} = \pi/2 - \arctg(x_{ii}/r_{ii})$ и $\alpha_{ij} = \pi/2 - \arctg(x_{ij}/r_{ij})$ — углы, характеризующие соотношения между составляющими полных собственных и взаимных сопротивлений электрической сети.

Системы электроснабжения предприятий обычно подключаются к шинам центров питания, находящимся под напряжением U . Уравнения внутренних активной и реактивной мощностей синхронного генератора в этом случае имеют вид

$$P = E_q^2 y \sin \alpha + E_q U y \sin(\delta - \alpha); \quad (12.3)$$

$$Q = E_q^2 y \cos \alpha - E_q U y \cos(\delta - \alpha), \quad (12.4)$$

где y — модуль проводимости сети между источником и шинами ЭЭС.

Эти же мощности на шинах ЭЭС описываются выражениями

$$P' = -U^2 y \sin \alpha + E_q U y \sin(\delta + \alpha); \quad (12.5)$$

$$Q' = -U^2 y \cos \alpha + E_q U y \cos(\delta + \alpha). \quad (12.6)$$

Синхронный генератор при частоте вращения, отличной от синхронной, можно приближенно рассматривать состоящим из двух машин — синхронной и асинхронной. Это позволяет рассматривать при анализе наложение их синхронного и асинхронного моментов.

Уравнение вращающего момента турбины можно составить на основании статических характеристик $M_T = \Psi(\omega, \mu)$, где μ — степень открытия регулирующего клапана энергоносителя турбины. Нелинейно спадающие характеристики M_T зависят от угловой скорости турбины и степени открытия регулирующего клапана. При

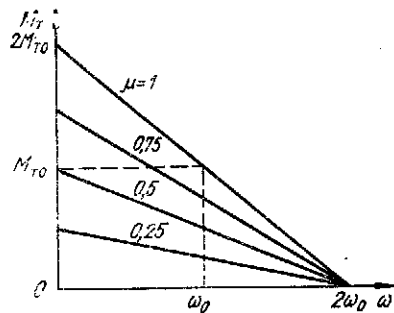


Рис. 12.1. Идеализированные характеристики вращающего момента турбины

медленных изменениях угловой скорости и открытия клапана приближенно их представляют семейством прямых (рис. 12.1):

$$M_T = \mu [M_{T0} - \eta_T (\omega - \omega_0)], \quad (12.7)$$

где M_{T0} , ω_0 — параметры, соответствующие номинальному режиму; η_T — коэффициент саморегулирования турбины.

Уравнение движения синхронного двигателя при $E' = \text{const}$ совпадает по составляющим с уравнением (11.4)

$$T_J d^2 \delta / dt^2 + M_{\text{мх}} = M, \quad (12.8)$$

где $M_{\text{мх}}$ — момент сопротивления рабочего механизма, и может использоваться в расчетах кратковременных (до одного цикла качаний) переходных процессов. Допущение $E' = \text{const}$ приемлемо для синхронных двигателей, которые электрически удалены от места возмущения, сохраняют устойчивость и слабо влияют на режим других машин. Расчетная э. д. с. E' включена за переходным сопротивлением двигателя x'_d и определяется выражением [27]

$$E' = \sqrt{U^4 - 2U^2 Q x'_d + (P^2 + Q^2) x'^2_d} / U, \quad (12.9)$$

где активная и реактивная мощности двигателя равны:

$$P = E' U \sin \delta / x'_d; \quad Q = (U^2 - E' U \cos \delta) / x'_d. \quad (12.10)$$

При расчете переходных процессов большой длительности следует иметь в виду, что переходные режимы генераторов характеризуются малыми скольжениями, тогда как скольжение синхронных двигателей может изменяться от нуля до единицы. В этом случае нужно использовать уравнение движения синхронного двигателя

$$T_J d^2 \delta / dt^2 + p_d d\delta / dt = M - M_{\text{мх}}, \quad (12.11)$$

где $p_d d\delta / dt$ — линеаризованный асинхронный момент; p_d — коэффициент демпфирования, определяемый по линейной части асинхронной характеристики синхронной машины как $p_d = dM/ds$, а $s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0 = d\delta / (\omega_0 dt)$ — скольжение двигателя.

Электромеханический переходный процесс для асинхронного двигателя описывается уравнением движения

$$T_J ds / dt = M(s) - M_{\text{мх}}. \quad (12.12)$$

Здесь электромагнитный момент двигателя в относительных единицах

$$M(s) = 2m_{\text{max}} U_{\text{дв}}^2 / (s/s_{\text{кр}} + s_{\text{кр}}/s), \quad (12.13)$$

где критическое скольжение

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{ном}} (m_{\text{max}} + \sqrt{m_{\text{max}}^2 - 1}), \quad (12.14)$$

а $m_{\text{max}} = M_{\text{max}} / M_{\text{ном}}$ — кратность максимального момента.

В приближенных расчетах устойчивости электромагнитные переходные процессы в асинхронном двигателе можно не учитывать, что позволяет составляющие его мощности описывать уравнениями, действительными для установившегося режима. Последние применительно к упрощенной схеме замещения двигателя (рис. 12.2, а) имеют вид

$$\left. \begin{aligned} Q &= U^2 r_2 s / (r_2^2 + x_s^2 s^2); \\ Q &= P x_s s / r_2 + U^2 (1 - \alpha + \alpha U^4) / x_{\mu}. \end{aligned} \right\} \quad (12.15)$$

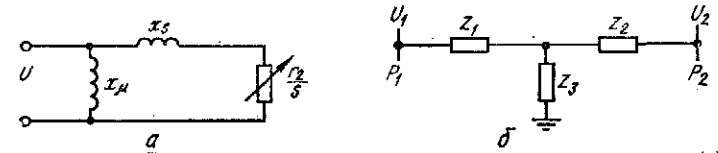


Рис. 12.2. Г-образная схема замещения асинхронного двигателя (а) и схема замещения участка электрической сети (б)

Параметры двигателя для Г-образной схемы замещения определяются по каталожным данным с использованием нижеприведенных выражений.

Активное сопротивление, пропорциональное механическому моменту на валу двигателя и определяемое при равном числе витков обмоток ротора и статора,

$$r_2 = \begin{cases} r_{20}, & s \leq s_1; \\ [r_{20}(1-s) + r_{21}(s-s_1)] / (1-s_1), & s > s_1. \end{cases}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния статора и ротора

$$x_s = \begin{cases} x_{s0}, & s \leq s_1; \\ [x_{s0}(s_2-s) + x_{s1}(s-s_1)] / (s_2-s_1), & s_1 < s < s_2; \\ x_{s1}, & s \geq s_2. \end{cases}$$

Поправочным коэффициентом α учитывают насыщение главной магнитной цепи двигателя. С учетом насыщения $\alpha = 0,3$, без учета $\alpha = 0$.

Ориентировочные «опорные» значения скольжения $s_1 \approx s_{\text{кр}}$, $s_2 = 0,5 \div 0,9$ при кусочно-линейной аппроксимации характеристик двигателя $x_s(s)$ и $r_2(s)$.

Координаты «опорных» точек аппроксимируемых характеристик (x_{s0}, s_1) , (x_{s1}, s_2) , (r_{20}, s_1) и (r_{21}, s_2) определяются выражениями

$$x_{s0} = 1 / (2m_{\text{max}} \cos \varphi_{\text{ном}});$$

$$x_{s1} = x_{\mu} / (I_{\text{пуск}} x_{\mu} - 1);$$

$$r_{20} = s_{ном} (1 + \sqrt{1 - 1/m_{макс}^2}) / (2 \cos \varphi_{ном});$$

$$r_{21} = (1 - \sqrt{1 - 4x_{s1}^2 m_{пуск}^2 \cos^2 \varphi_{ном}}) / (2m_{пуск} \cos \varphi_{ном}),$$

где $I_{пуск}$, $m_{пуск} = M_{пуск}/M_{ном}$ — кратность пускового тока и момента соответственно.

Сопротивление намагничивания можно рассчитать по формуле

$$x_{\mu} = 1 / (\sin \varphi_{ном} - (1 - \sqrt{1 - 4x_{s0}^2 \cos^2 \varphi_{ном}}) / (2x_{s0})).$$

Момент сопротивления для большинства вращающихся рабочих механизмов выражается зависимостью [24]

$$M_{мх} = M_{мх.ст} + (M_{мх0} - M_{мх.ст}) ((1 - s)/(1 - s_{ном}))^p, \quad (12.16)$$

где $M_{мх.ст}$ — пачальный (статический, $\omega = 0$) момент сопротивления; $M_{мх0}$ — номинальный момент сопротивления механизма; p — показатель степени, зависящий от типа оборудования [27].

В уравнениях движения элементы электрической сети (узлы, ветви из ЛЭП, трансформаторов и т. п.) описываются по-разному. Для узла сети с n ветвями должен выполняться баланс активных и реактивных мощностей:

$$\sum_{i=1}^n P_i = 0; \quad \sum_{i=1}^n Q_i = 0. \quad (12.17)$$

Элементы ветвей сети в схемах замещения представляются в виде последовательно-параллельно включенных активных и реактивных сопротивлений. Параметры режима электрической сети определяются с учетом потерь напряжения и мощности. Например, участок электрической сети на рис. 12.2, б описывается следующими уравнениями:

в начале участка

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= U_1^2 y_{11} \sin \alpha_{11} + U_1 U_2 y_{12} \sin (\delta_{12} - \alpha_{12}); \\ Q_1 &= U_1^2 y_{11} \cos \alpha_{11} - U_1 U_2 y_{12} \cos (\delta_{12} - \alpha_{12}); \end{aligned} \right\} \quad (12.18, \text{ а})$$

в конце участка

$$\left. \begin{aligned} P_2 &= -U_2^2 y_{22} \sin \alpha_{22} + U_1 U_2 y_{12} \sin (\delta_{12} + \alpha_{12}); \\ Q_2 &= -U_2^2 y_{22} \cos \alpha_{22} + U_1 U_2 y_{12} \cos (\delta_{12} + \alpha_{12}). \end{aligned} \right\} \quad (12.18, \text{ б})$$

Здесь собственные и взаимная проводимости определяются выражениями

$$Y_{11} = 1/(z_1 + z_2 z_3 / (z_2 + z_3)) = y_{11} \exp \varphi_{11};$$

$$Y_{22} = 1/(z_2 + z_1 z_3 / (z_1 + z_3)) = y_{22} \exp \varphi_{22};$$

$$Y_{12} = 1/(z_1 + z_2 + z_1 z_2 / z_3) = y_{12} \exp \varphi_{12},$$

а дополнительные углы

$$\alpha_{11} = 90^\circ - \varphi_{11}; \quad \alpha_{22} = 90^\circ - \varphi_{22}; \quad \alpha_{12} = 90^\circ - \varphi_{12}.$$

Вид уравнений движения нагрузки зависит от принимаемой расчетной модели ее узла — группы разнородных электроприемников, присоединенных к узловой точке сети. Расчетная модель нагрузки предприятия определяется составом потребителей и его распределительной сетью. В общем случае она многоэлементная, где каждый узел нагрузки содержит математическое описание эквивалентных параметров асинхронного и синхронного двигателей, а также статической нагрузки z_n (освещение, выпрямители, инверторы, электропечи, нагревательные приборы, коммунально-бытовые электроприемники, конденсаторные батареи и т. п.).

В математическом описании расчетной модели нагрузки используют *статические* и *динамические* характеристики. Они представляют собой зависимости потребляемой узлом нагрузки активной и реактивной мощностей, вращающего момента или тока от напряжения и частоты.

Статические характеристики нагрузки

$$P_n = F_1(U, \omega); \quad Q_n = F_2(U, \omega) \quad (12.19)$$

определяют вариации P_n , Q_n при медленных изменениях напряжения и угловой скорости. Задание нагрузок в виде постоянных сопротивлений $z_n = \text{const}$ следует рассматривать как частный случай статических характеристик.

Динамические характеристики нагрузки — это зависимости от тех же аргументов и, дополнительно, от скоростей их изменения:

$$\left. \begin{aligned} P &= F_3(U, \omega, t, dU/dt, d\omega/dt, \dots); \\ Q &= F_4(U, \omega, t, dU/dt, d\omega/dt, \dots). \end{aligned} \right\} \quad (12.20)$$

Эти характеристики позволяют отразить быстрые изменения режима нагрузки.

Выбор вида характеристики нагрузки предопределяется необходимой точностью решения задачи устойчивости. В приближенных расчетах устойчивости СЭС наиболее часто используется модель нагрузки в виде комплексного сопротивления. С использованием математических моделей элементов строится модель всей СЭС.

С точки зрения выполняемых упрощений математические модели системы можно подразделить на *консервативные позиционные* и *диссипативные* [7]. Описание системы консервативной позиционной моделью соответствует допущениям, в соответствии с которыми в системе отсутствуют потери энергии, зависящие от частоты вращения машин (значит, любые возмущения режима приводят к незатухающим колебаниям), а все действующие моменты не зависят от изменения частоты вращения машин, за исключением тех, которые связаны с инерционностью роторов. Поэтому при позиционной идеализации в уравнениях движения моменты в относительных единицах можно заменить мощностями. Мощности турбин, э. д. с. машин, частота и сопротивления пассивных элементов электрической сети принимаются постоянными, а электромагнитная мощность зависит только от положения роторов синхронных машин.

В диссипативной модели системы учитывается, что моменты машины зависят от положения роторов и скорости их изменения, а также от показателей, определяемых различными системами регулирования, электромагнитными и электромеханическими переходными процессами в элементах.

Упрощенный подход к расчету электромеханических переходных процессов на основе позиционной модели приемлем для анализа устойчивости ЭЭС предприятий. При централизованном электропитании в ЭЭС всегда есть шины бесконечной мощности (условие неизменности напряжения и частоты). Кроме того, задача устойчивости решается на малом интервале времени (до 0,2—0,5 с) от начала действия возмущения. При этом определяющими в отношении устойчивости являются синхронизирующие моменты, а инерционные моменты, зависящие от частоты вращения, проявляются незначительно.

12.2. Практические критерии оценки статической устойчивости

Анализ статической устойчивости по его возрастающей сложности можно разбить на несколько этапов. Вначале следует установить факт наличия устойчивости или неустойчивости установившегося режима, а затем по виду кривой или другим признакам различить характер переходного процесса (апериодический или колебательный).

Физически апериодическая неустойчивость возникает при нарушении баланса моментов на валу генератора, когда механический момент турбины превышает максимально возможный при данных условиях электромагнитный момент генератора. Анализ устойчивости заключается в определении предельных по устойчивости режимов на основе сползания или текучести параметров нормального режима с использованием уравнений установившегося режима.

На следующем этапе для установленной области устойчивых режимов выявляются условия колебательной неустойчивости, которая может появиться по следующим причинам:

из-за наличия параметрического самораскачивания или обратной связи в виде АРВ;

при возникновении самовозбуждения, когда синхронный генератор нагружен емкостью или линией с распределенными параметрами;

из-за неустойчивости нагрузки.

Анализ колебательной устойчивости предполагает учет динамики элементов системы посредством ее модели, описываемой дифференциальными уравнениями. При этом ставится и решается задача определения структуры и параметров элементов регулирующих устройств для обеспечения статической устойчивости режимов системы.

Наличие устойчивости или неустойчивости установившегося режима при относительно малых текущих изменениях его парамет-

ров («сползании» показателей установившегося режима) можно определить с помощью практических критериев, основанных на физических представлениях о механизме нарушения устойчивости. Они применяются в тех случаях, когда отсутствуют условия самораскачивания и нет необходимости в исследованиях характера переходного процесса и в выявлении формы нарушения устойчивости (апериодическая или колебательная). Оценка устойчивости по практическим критериям является грубой, завышенной по запасу устойчивости и устанавливает лишь сам факт устойчивости данного режима.

Физическая оценка механизма нарушения устойчивости выполняется на основе силового или энергетического подхода. При энергетическом подходе условия устойчивости определяются согласно теореме Дирихле, в соответствии с которой система будет устойчивой, если потенциальная энергия консервативной системы в положении равновесия имеет минимум. При силовом подходе устойчивость системы определяется условием, согласно которому в положении равновесия сумма приложенных к телу сил должна быть равной нулю. В случае отклонения тела от положения равновесия должна возникнуть сила, стремящаяся вернуть его в положение равновесия. Если в положении равновесия тело имеет скорость, то возникающие при этом силы должны быть направлены против вектора скорости.

В основе применения практических критериев статической устойчивости ЭЭС лежат оценки ее свойств по энергетическому критерию (11.12), который устанавливает соотношение между интенсивностью внешнего воздействия на систему и ее реакцией на это воздействие. Он предусматривает определение избыточной энергии во всей системе в целом.

Оценка статической устойчивости по практическим критериям позволяет установить предельный режим и границу устойчивости при выбранном способе воздействия на ЭЭС. Последний называют способом утяжеления режима. Он может быть выбран только при условии, если заданы схема электропитания и состав электроприемников.

Расчетные схемы электропитания могут приводиться к различным видам:

эквивалентный генератор — ЛЭП — шины неизменного напряжения;

двустороннее питание нагрузки с постоянным сопротивлением;

эквивалентный источник питания — узловая точка сети;

питание асинхронной нагрузки от мощной ЭЭС;

эквивалентный источник, питающий комплексную нагрузку неизмеримой мощности.

Рассмотрим характерные примеры использования практических критериев для анализа статической устойчивости этих схем.

Схема электропитания «эквивалентный генератор — ЛЭП — шины неизменного напряжения». Эта схема с параметрами ее элементов показана на рис. 12.3. В установившемся режиме механи-

ческий момент турбины и электромагнитный момент генератора уравновешены, т. е.

$$M_T - M = 0, \quad (12.21)$$

где электромагнитный момент

$$M = E'U \sin \delta / (\omega_0 (x_d' + x_{вн})) \quad (12.22)$$

имеет только одну существенную переменную δ , так как другие параметры (E' , U , ω_0) по условию неизменны. Механический момент турбины, как следует из (12.7), не зависит от переменной δ .

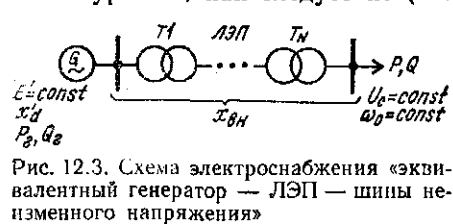


Рис. 12.3. Схема электроснабжения «эквивалентный генератор — ЛЭП — шины неизменного напряжения»

Выражая параметры системы в относительных единицах и считая ее частоту неизменной, можно принять $M \approx P$ и представить уравнение (12.21) в следующем виде:

$$P_T - P = 0. \quad (12.23)$$

Графическое изображение (12.23) в зависимости от переменной δ (см. рис. 11.9) показывает, что существуют две точки равновесия режима системы. Нарушение равенства мощностей (12.23) является признаком изменения ее энергетического баланса и появления избыточной энергии в системе. В этом случае энергетический критерий (11.12) можно записать так:

$$d(P_T - P)/d\delta < 0. \quad (12.24)$$

Поскольку $P_T(\delta) = \text{const}$, неравенство (12.24) принимает вид (11.17).

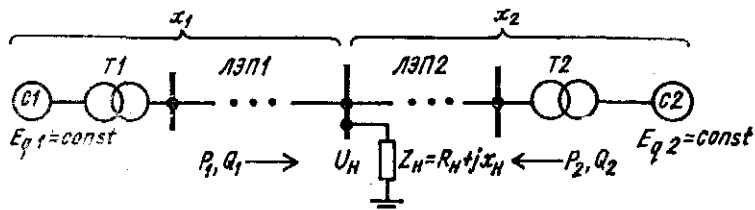


Рис. 12.4. Схема двустороннего питания нагрузки ($z_n = \text{const}$)

Схема с двусторонним питанием нагрузки. Для этой схемы, имеющей постоянное сопротивление нагрузки (рис. 12.4), энергетический критерий (11.12) можно косвенно характеризовать переменной режима — активной мощностью. Если допустить, что генераторные ветви имеют одинаковую нагрузку ($P_1 = P_2 = P$), то установившийся режим будет описываться следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} P - P_T &= 0; \\ P &= E_{q1}^2 \sin \alpha_{11} / |z_{11}| + E_{q1} E_{q2} \sin (\delta_{12} - \alpha_{12}) / |z_{12}|; \\ P_1 + P_2 - U_n^2 / R_n &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (12.25)$$

где

$$z_{11} = jx_1 + jx_2 z_n / (jx_2 + z_n) = |z_{11}| \exp (\pi/2 - \alpha_{11});$$

$$z_{12} = jx_1 + jx_2 + jx_1 jx_2 / z_n = |z_{12}| \exp (\pi/2 - \alpha_{12}) = R_{12} + jx_{12}.$$

В уравнениях (12.25) свободной существенной переменной, от которой зависят изменяющиеся параметры режима (P , U_n), является угол δ_{12} . Поэтому производную $dP/d\delta_{12}$ можно использовать в качестве практического критерия статической устойчивости аналогично выражению (11.17):

$$dP/d\delta_{12} > 0. \quad (12.26)$$

Предельный по сохранению устойчивости режим соответствует условию

$$dP/d\delta_{12} = E_{q1} E_{q2} \cos (\delta_{12} - \alpha_{12}) / |z_{12}|, \quad (12.27)$$

откуда

$$\delta_{12\text{кр}} = \pi/2 + \text{arctg} (R_{12}/x_{12}). \quad (12.28)$$

Подставив (12.28) в уравнение активной мощности генераторной станции (12.25), получим критическое значение переменной режима для угловой характеристики мощности:

$$P_{\text{max}} = E_{q1}^2 \sin \alpha_{11} / |z_{11}| + E_{q1} E_{q2} / |z_{12}|. \quad (12.29)$$

Коэффициент запаса статической устойчивости определяется выражением

$$K_s = (P_{\text{max}} - P_n) / P_n. \quad (12.30)$$

Схема замещения электрической системы, содержащая узловую точку. Анализ этой схемы (рис. 12.5) упрощается. Объясняется это тем, что нагрузки, подключенные к узловым точкам сложных СЭС, могут замещать части системы и задаваться статическими (12.19) или динамическими (12.20) характеристиками. Узлы характеризуются векторами напряжения, которые играют роль эквивалентных э. д. с. неявных источников и нагрузок и отличаются от явных тем, что они не обладают инерционностью генераторов и нагрузок двигателей.

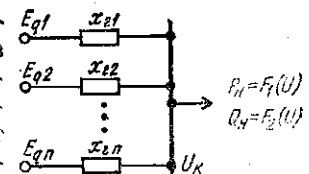


Рис. 12.5. Схема замещения электрической системы с узловой точкой

Практический критерий статической устойчивости режима рассматриваемой системы можно сформулировать при неизменной частоте, сохранении баланса активной мощности в узле и постоянстве активной мощности, передаваемой из генераторных ветвей (E , $P = \text{const}$). Из анализа множества изменяющихся параметров режима (E , P , Q , U_n , δ) следует, что существенной независимой переменной, определяющей состояние всех элементов системы, является напряжение в узловой точке $U_n = \text{var}$ (переменная δ в данном случае не существенна, так как она не определяет состояние нагрузки).

Избыточная энергия системы, возникающая из-за возмущающих воздействий, проявляется как изменение баланса реактивной

мощности (12.17) узла:

$$\Delta Q = Q_{г\sigma} - Q_n, \quad (12.31)$$

где $Q_{г\sigma} = \sum_{i=1}^n Q_{гi}$ — суммарная генерируемая реактивная мощность в узле.

Взаимосвязь этих существенных переменных в установившемся режиме определяется уравнением

$$E_{q\sigma k} = \sqrt{(U_k^2 + Q_{г\sigma} x_{г, пез})^2 + (P x_{г, пез})^2} / U_k, \quad (12.32)$$

где

$$x_{г, пез} = \sum_{i=1}^n x_{гi}; \quad E_{q\sigma k} = \sum_{i=1}^n E_{qi} x_{гi} / x_{г, пез}; \quad P = \sum_{i=1}^n P_{гi}.$$

Практический критерий устойчивости такой системы в соответствии с (11.12) можно записать в виде

$$d(Q_{г\sigma} - Q_n) / dU_k < 0. \quad (12.33)$$

Он характеризует реакцию системы на изменение напряжения в узле. Появление небаланса реактивной мощности в узле рассматривается как малое возмущение, под воздействием которого изменяется напряжение.

Исследование системы по этому критерию заключается в анализе по переменной U_k уравнений установившегося режима:

$$\left. \begin{aligned} Q_{г\sigma} &= (-U_k^2 + \sqrt{E_{q\sigma k}^2 U_k^2 - P^2 x_{г, пез}^2}) / x_{г, пез}; \\ Q_n &= F_2(U_k). \end{aligned} \right\} \quad (12.34)$$

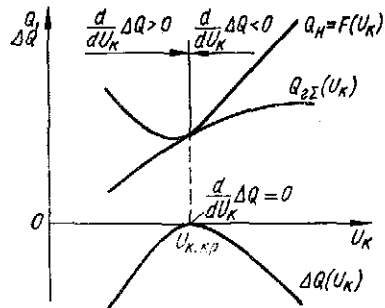


Рис. 12.6. Графическое решение системы уравнений (12.34) и (12.31)

Здесь уравнение генерируемой реактивной мощности получено преобразованием уравнения (12.32).

Систему уравнений (12.34) решают аналитически или графически в зависимости от способа задания статической характеристики нагрузки (12.19). Решение соответствует следующим критическим значениям существенных параметров режима: $U_{к, кр}$ и $d\Delta Q/dU_k = 0$ (рис. 12.6). Знак производной (12.33) проверяют, начиная с заведомо устойчивого состояния, с постепенным пошаговым его утяжелением по показателю U_k .

На основе результатов вычислений по уравнениям (12.31) и (12.34) строят кривую небаланса реактивной мощности $\Delta Q(U_k)$, на которой выявляют экстремальную точку критического напряжения.

Коэффициент запаса статической устойчивости определяют через показатели установившегося и предельного режимов:

$$K_{\sigma U} = (U_k - U_{к, кр}) \cdot 100 / U_k. \quad (12.35)$$

Питание асинхронной нагрузки от мощной ЭЭС. В этом случае предполагается, что последняя обладает бесконечной мощностью;

имеет узловую точку неизменного напряжения или точку, питающуюся от эквивалентного источника с неизменной э. д. с. Ее схема замещения показана на рис. 12.7, а, где нагрузка представлена в виде эквивалентного асинхронного двигателя согласно рис. 12.2.

Выполним анализ статической устойчивости асинхронной нагрузки для данного случая при переменной и постоянной потребляемой активной мощности.

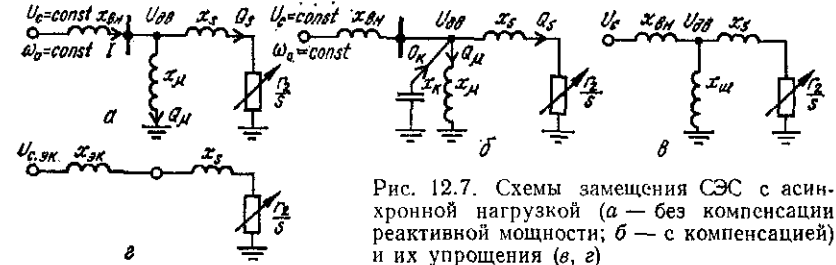


Рис. 12.7. Схемы замещения ЭЭС с асинхронной нагрузкой (а — без компенсации реактивной мощности; б — с компенсацией) и их упрощения (в, г)

При изменении активной мощности, потребляемой нагрузкой, состояние равновесия установившегося режима для данной схемы описывается уравнениями

$$P - P_{мх} = 0; \quad (12.36)$$

$$U_c r s / (r^2 + (x_{\sigma k} + x_s)^2 s^2) - \omega M_{мх} = 0, \quad (12.37)$$

где первое слагаемое — потребляемая асинхронным двигателем активная мощность (12.15), а второе слагаемое определяется моментом сопротивления рабочего механизма (12.16).

Уравнение (12.37) содержит только одну существенную переменную — скольжение s , а другие параметры и показатели в установившемся режиме постоянны. Действие возмущений влияет только на баланс активной мощности в точке включения нагрузки, нарушение которого можно оценить по критерию

$$d(P_{мх} - P) / ds < 0, \quad (12.38)$$

откуда при $P_{мх}(s) = \text{const}$ получаем

$$dP/ds > 0. \quad (12.39)$$

При положительном значении критерия (12.39) работа асинхронной нагрузки устойчива. Предел сохранения устойчивости имеет место при $dP/ds = 0$ (рис. 12.8). Физически производная dP/ds характеризует реакцию ЭЭС на увеличение скольжения s асинхронной нагрузки.

При положительном знаке производной случайному повышению скольжения соответствует электромагнитная мощность, которая отбирается из электрической сети и которая возрастает быстрее, чем тормозящая статическая мощность рабочего механизма. Избыток мощности

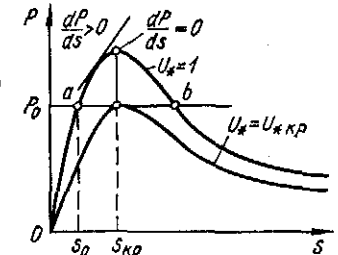


Рис. 12.8. Характеристики эквивалентного асинхронного двигателя

при этом приводит к ускорению двигателей, в результате чего рабочая точка режима возвращается к скольжению, которое соответствует исходному состоянию.

Из уравнения установившегося равновесия (12.37) и утяжеления режима по переменной s можно определить по критерию (12.39) критические значения изменяющихся параметров P , s для предельного по устойчивости состояния (см. рис. 12.8). При $dP/ds = 0$ имеем

$$s_{кр} = r_2 / (x_s + x_{экр}). \quad (12.40)$$

Подставив $s_{кр}$ в уравнение (12.15), получим наибольшее значение активной мощности, потребляемой нагрузкой,

$$P_{\max} = U_c^2 / (2(x_s + x_{экр})), \quad (12.41)$$

которое соответствует опрокидывающему моменту эквивалентного асинхронного двигателя.

Поскольку опрокидывающий момент пропорционален квадрату напряжения на зажимах двигателя, со снижением напряжения он уменьшается. Напряжение, при котором опрокидывающий момент становится равным нагрузке двигателя, называется *критическим* (см. рис. 12.8). Определяется оно выражением

$$U_{с.кр} = \sqrt{2mP_{ном}(x_{экр} + x_s)}, \quad (12.42)$$

где $P_{ном}$ — номинальная мощность эквивалентного двигателя; m — коэффициент его загрузки.

При напряжении, меньшем чем критическое, двигатели узла нагрузки загормаживаются. Значение критического напряжения совместно с $s_{кр}$ и $P_{кр}$ для предельного режима характеризует степень устойчивости асинхронной нагрузки, причем чем выше критическое напряжение, тем ниже устойчивость двигателей.

Согласно (12.42) запас устойчивости зависит от загрузки двигателей m , их электрической удаленности $x_{вн}$ от шин неизменного напряжения и компенсации реактивной мощности в точке включения нагрузки. Эквивалентное сопротивление $x_{экр}$ определяется условиями связи рассматриваемой точки системы с шинами неизменного напряжения; $x_{экр} = x_{вн}$ при $x_{вн} \ll (0,1 \div 0,15) x_s$.

В случае больших внешних сопротивлений необходимо перейти к эквивалентной схеме замещения, показанной на рис. 12.7, г, где

$$U_{с.экр} = U_c x_{\mu} / (x_{вн} + x_{\mu}); \quad x_{экр} = x_{\mu} x_{вн} / (x_{вн} + x_{\mu}). \quad (12.43)$$

При включении в узле нагрузки статических компенсирующих конденсаторов мощностью Q_k и сопротивлением $x_k = U^2 / Q_k$ (см. рис. 12.7, б) вначале определяют сопротивление эквивалентного шунта (см. рис. 12.7, в) по формуле

$$jx_{ш} = -jx_k jx_{\mu} / (jx_{\mu} - jx_k),$$

а затем осуществляют переход к схеме замещения (см. рис. 12.7, г) по (12.43) при условии $x_{\mu} \equiv x_{ш}$.

Напряжение в точке включения нагрузки не является независимой переменной, так как оно определяется режимом работы узла нагрузки:

$$U_{дв} = I \sqrt{x_s^2 + (r_2/s)^2}; \quad I = U_c / \sqrt{(x_{экр} + x_s)^2 + (r_2/s)^2},$$

откуда

$$U_{дв} = U_c \sqrt{(x_s^2 s^2 + r_2^2) / ((x_{экр} + x_s)^2 s^2 + r_2^2)}. \quad (12.44)$$

В данном случае критические значения показателей предельного режима нельзя рассчитывать с учетом напряжения, определяемого по (12.44). Они могут быть найдены только по напряжению в системе U_c , которое по условию от изменений режима не зависит.

При постоянной потребляемой активной мощности ($P = \text{const}$) избыточная энергия электрической системы может быть оценена по балансу реактивной мощности:

$$Q = Q_{\mu} + Q_s. \quad (12.45)$$

Составляющие (12.45) описываются уравнениями (12.15), где независимой переменной режима является напряжение в системе:

$$Q_{\mu} = U_c^2 / x_{\mu} \text{ при } \alpha = 0; \quad (12.46)$$

$$Q_s = U_c^2 (x_{экр} + x_s) / [(x_{экр} + x_s)^2 + r_2^2 / s^2]. \quad (12.47)$$

Критические параметры системы определяются на основе анализа (12.45), который выполняют в такой последовательности:

задаются скольжениями s и находят значения тока, соответствующие неизменной нагрузке $P = \text{const}$, по формуле

$$P = I^2 (r_2/s);$$

по полученным значениям тока вычисляют ряд напряжений

$$U_c = I \sqrt{(x_{экр} + x_s)^2 + (r_2/s)^2};$$

по найденным значениям напряжения определяют составляющие (12.45).

Графический анализ зависимости $Q(U_c)$ по составляющим Q_{μ} и Q_s (рис. 12.9) показывает, что предельный режим с критическими значениями параметров $U_{с.кр}$, $Q_{кр}$ соответствует критерию $dQ/dU_c = -\infty$.

Схема электроснабжения с эквивалентным источником, питающим комплексную нагрузку соизмеримой мощности. Эту схему и схему электроснабжения крупного узла нагрузки можно представить схемой замещения, показанной на рис. 12.10, а. В точке включения нагрузки состояние равновесия характеризуется изменяющимися параметрами режима U , $P_H = F_1(U)$, $Q_H = F_2(U)$. В данном

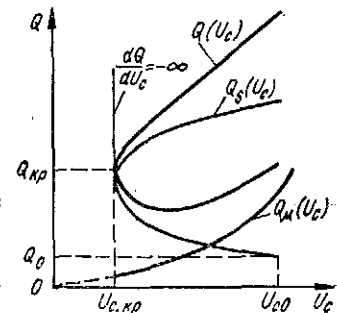


Рис. 12.9. Зависимость реактивной мощности от независимо изменяющегося напряжения в системе

случае свободной существенной переменной является напряжение в узле подключения нагрузки, которое отражает состояние всех элементов системы. Изменение всех переменных параметров режима можно зафиксировать по показателям режима $E_{эк}$ и $Q_{эк}$, по которым косвенно судят об избыточной энергии системы при ее возмущении.

Графический анализ зависимости

$$E_{эк} = \sqrt{(U^2 + P_{н^2} r_{эк} + Q_{н^2} x_{эк})^2 + (P_{н^2} x_{эк} - Q_{н^2} r_{эк})^2} / U \quad (12.48)$$

с утяжелением режима по переменной U показывает, что она имеет минимум при $dE_{эк}/dU = 0$ с координатами, соответствующими предельному режиму $E_{эк.min}$, $U_{кр}$ (рис. 12.10, б).

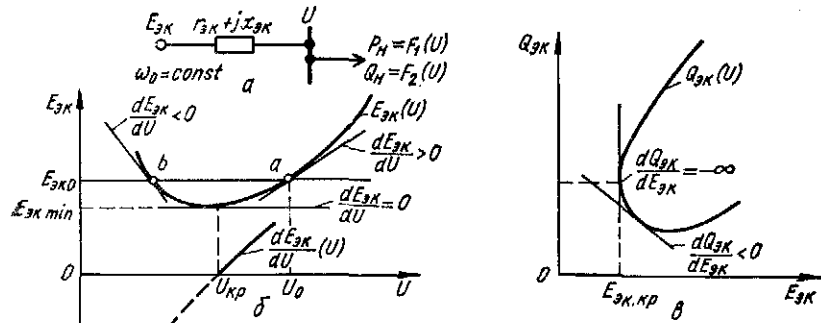


Рис. 12.10. Схема замещения СЭС с комплексной нагрузкой (а) и зависимости ее существенных переменных (б, в)

Можно провести параллель идентичности физической картины процессов сохранения устойчивости комплексной нагрузки и асинхронной нагрузки, описываемой рис. 12.8. При $E_{эк} = E_{эк0}$ равновесие установившегося режима возможно в точках а и б (см. рис. 12.10, б) аналогично точкам равновесия режима на рис. 12.8. В точке а производная $dE_{эк}/dU > 0$, что на угловой характеристике мощности соответствует устойчивому равновесию режима.

С утяжелением режима по переменной U каждой точке кривой $E_{эк}(U)$ соответствует увеличивающееся скольжение по рис. 12.8. При критическом значении скольжения имеет место критическое напряжение $U_{кр}$. Точка б, где производная $dE_{эк}/dU < 0$, соответствует по угловой характеристике мощности неустойчивому равновесию установившегося режима.

Следовательно, знак производной dE/dU позволяет судить об устойчивости системы. Критерий устойчивости

$$dE/dU > 0 \quad (12.49)$$

впервые был предложен проф. П. С. Ждановым и называется *критерием устойчивости Жданова*.

Если оценивать координаты предельного режима сохранения статической устойчивости по (12.48) и зависимости

$$Q_{эк} = Q_{н^2} + (P_{н^2}^2 + Q_{н^2}^2) x_{эк} / U^2, \quad (12.50)$$

то они соответствуют экстремальной точке $(E_{эк.кр}, Q_{эк.кр})$ критерия (12.49) при (рис. 12.10, в)

$$dQ_{эк}/dE_{эк} = -\infty. \quad (12.51)$$

При проверке устойчивости по (12.51) также выполняется утяжеление режима по переменной U и состоянию устойчивости соответствует участок кривой, представляющей зависимость $Q_{эк}(E_{эк})$, с критерием

$$dQ_{эк}/dE_{эк} < 0. \quad (12.52)$$

Коэффициент запаса статической устойчивости для узла включения нагрузки определяется выражениями

$$K_{зU} = (U_0 - U_{кр}) \cdot 100 / U_0; \quad K_{зE} = (E_{эк0} - E_{эк.кр}) \cdot 100 / E_{эк0}.$$

Таким образом, статическая устойчивость СЭС может быть найдена по практическим критериям только для конкретной схемы и при принятых допущениях. При этом анализ устойчивости проводят в несколько этапов:

составляют схему замещения СЭС, устанавливают массив изменяющихся параметров режима и принимают основные допущения;

в массиве переменных выделяют существенную независимую переменную, которая определяет состояние всех элементов СЭС; устанавливают существенные переменные, по которым косвенно можно оценить избыточную энергию системы при ее возмущении;

определяют взаимосвязь существенных переменных для установившегося режима;

по практическим критериям находят координаты предельного режима сохранения устойчивости; выбор существенных переменных определяет путь утяжеления режима;

рассматривают запас статической устойчивости, который сравнивают с нормируемым.

12.3. Исследование статической устойчивости методом малых колебаний

В установившемся режиме СЭС значения ее параметров под воздействием разных факторов, главным образом нагрузки, изменяются около состояния равновесия. Когда параметры режима получают приращения, которые несоизмеримо малы по сравнению с установившимися их значениями, такие воздействия на состояние равновесия относят к слабым возмущениям.

Если СЭС описывается уравнениями невысокого порядка, то для оценки статической устойчивости режима можно использовать метод малых колебаний. В отличие от оценки статической устойчивости по практическим критериям суть этого метода заключается в исследовании уравнений движения, записанных в виде уравнений малых отклонений.

Пусть состояние СЭС в любой момент времени описывается дифференциальным нелинейным уравнением возмущенного движения вида

$$Y(t, y_i, d^k y_i/dt^k) = F(f_i, d^l f_i/dt^l), \quad i = \overline{1, J}, k = \overline{1, K}, l = \overline{1, L}, \quad (12.53)$$

где y_i — совокупность показателей режима СЭС, которые являются функциями времени; f_i — внешние воздействия, изменение которых может быть произвольным.

В состоянии равновесия СЭС характеризуется установившимися значениями (y_{i0}) этих показателей:

$$Y_0(t, y_{i0}, 0) = F_0(f_{i0}, 0). \quad (12.54)$$

При $F_0(f_{i0}, 0) = 0$ возмущающие воздействия являются проходящими (предполагаем, что они прекращаются при $t = t_0$). Тогда уравнение (12.54) описывает невозмущенное движение.

Левую часть уравнения (12.53) можно выразить через малые отклонения $x_i = y_i - y_{i0}$ показателей режима y_i от установившихся значений y_{i0} , записав

$$Y(t, y_{i0} + x_i, d^k (y_{i0} + x_i)/dt^k) = F(f_i, d^l f_i/dt^l). \quad (12.55)$$

Здесь составляющие, которые содержат x_i , характеризуют переходный процесс $X(t)$, вызванный возмущениями. Начальные условия для переходного процесса при $t = t_0$

$$x_i(t_0) = x_{i0} = y_i(t_0) - y_{i0}(t_0). \quad (12.56)$$

В случае невозмущенного движения $x_i \equiv 0$.

Оценка устойчивости на основе систем уравнений вида (12.55) обоснована теоремами А. М. Ляпунова. Невозмущенное движение будет устойчивым по отношению к показателям $y_i(t)$, если при всяком заданном положительном числе ε , как бы мало оно ни было, можно выбрать такое другое положительное число $\eta(\varepsilon)$, при котором для любых начальных условий от возмущений $x_i(t_0)$, удовлетворяющих неравенствам $|x_i(t_0)| \leq \eta$, для $t > t_0$ выполняются неравенства $|x_i(t)| < \varepsilon$.

Если невозмущенное движение устойчиво и дополнительно выполняется условие $\lim_{t \rightarrow \infty} |x_i(t)| = 0$, то его называют *асимптотически устойчивым*.

При решении инженерных задач можно руководствоваться физической трактовкой приведенных определений устойчивости в отношении характера переходного процесса $X(t)$ по его амплитуде. При аperiodической устойчивости переходный процесс по амплитуде затухающий. При колебательном процессе сохранение устойчивости будет при неизменной амплитуде колебаний, а нарушение устойчивости — при увеличении амплитуды колебаний.

Характер переходного процесса можно установить также из анализа системы нелинейных дифференциальных уравнений (12.55). Она линеаризуется методом первого приближения А. М. Ляпуно-

ва, после чего анализируется вид корней характеристического уравнения системы линеаризованных уравнений. В основе линеаризации лежит предположение о таком изменении переменных в переходном процессе, при котором их отклонения от установившихся значений остаются все время достаточно малыми.

Линеаризацию системы уравнений (12.55) выполняют разложением левой части уравнений в степенной ряд (Тейлора или Маклорена) по степеням малых отклонений x_i (все производные от x_i рассматриваются как самостоятельные переменные):

$$Y_0(t, y_{i0}) + (\partial Y/\partial y_i)_{y_{i0}} x_i + \sum_{s=1}^n (\partial Y/\partial (d^s y_i/dt^s))_{y_{i0}} (d^s x_i/dt^s) + s_{xi} = F(f_i, d^l f_i/dt^l). \quad (12.57)$$

Здесь

$$s_{xi} = \sum_{k=2}^K \sum_{s=1}^n (\partial^k Y/\partial (d^s y_i/dt^s)^k)_{y_{i0}} (d^s x_i/dt^s) + \sum_{k=2}^K (\partial^k Y/\partial y_i^k)_{y_{i0}} x_i \quad (12.58)$$

— сумма членов, состоящих из произведений частных производных (второго и высших порядков) от функции Y и малых отклонений, а также их производных; $(\partial Y/\partial y_i)_{y_{i0}} = a_{is}$, $(\partial Y/\partial (d^s y_i/dt^s))_{y_{i0}} = a_{is}$ — коэффициенты при переменных x_i и $d^s y_i/dt^s$ (их значения вычисляются по выражениям частных производных функции Y по y_i в точках y_{i0}).

Если из уравнений (12.57) вычесть уравнения равновесия (12.54) и пренебречь суммой членов степенных рядов s_{xi} , то получим линеаризованные уравнения возмущенного движения (уравнения первого приближения)

$$\sum_{s=1}^n (\partial Y/\partial (d^s y_i/dt^s))_{y_{i0}} (d^s x_i/dt^s) + (\partial Y/\partial y_i)_{y_{i0}} x_i = F(f_i, d^l f_i/dt^l) - F_0(f_{i0}, 0).$$

Приведем их к более компактной записи, используя введенные обозначения коэффициентов a_{is} и оператора дифференцирования $p = d/dt$:

$$\sum_{s=0}^n a_{is} p^{n-s} x_i(t) = F(f_i, d^l f_i/dt^l) - F_0(f_{i0}, 0). \quad (12.59)$$

Об устойчивости нелинейной системы (12.57) судят по затуханию переходного процесса, наличие которого устанавливается по виду корней характеристического уравнения системы (12.59):

$$D(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + a_2 p^{n-2} + \dots + a_{n-1} p + a_n = 0. \quad (12.60)$$

Для устойчивости необходимо и достаточно, чтобы корни характеристического уравнения имели отрицательные вещественные части. При нулевой вещественной части корней нужно дополнительно исследовать отбрасываемые члены в уравнении (12.58). Изменение знака вещественной части корня либо наличие нуле-

вого корня или пары чисто мнимых корней, а также бесконечного корня при остальных корнях с отрицательной вещественной частью определяет границу устойчивости.

Наличие у корней отрицательной вещественной части можно установить прямым решением уравнения (12.60) не выше четвертого порядка. При анализе уравнений более высоких порядков используют математические критерии устойчивости, которые не требуют нахождения значений корней характеристического уравнения.

Применяемые критерии устойчивости делятся на *алгебраические* (Гурвица, Лъенара — Шипара, Рауса) и *частотные* (Михайлова, Найквиста, логарифмический). Используются также метод *D*-разбиения. При этом выполняется анализ взаимосвязей отрицательного знака вещественной части корней характеристического уравнения с его коэффициентами a_s ($s = \overline{0, n}$). Необходимым, но недостаточным признаком устойчивости невозмущенного движения является факт наличия одинакового знака у коэффициентов характеристического уравнения (обычно оговаривают положительный знак коэффициентов, так как в случае отрицательного знака его легко заменить положительным путем умножения на минус единицу). Этот необходимый признак устойчивости является достаточным для уравнений первого и второго порядков.

Если же не все коэффициенты характеристического уравнения имеют одинаковый знак, то невозмущенное движение неустойчиво и дополнительно устойчивость можно не исследовать.

Критерий Гурвица определяет условия устойчивости системы по характеристическому уравнению (12.60). Для этого составляют определитель из n строк и n столбцов:

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n-2} & a_n \end{vmatrix}, \quad (12.61)$$

в котором по главной диагонали записывают коэффициенты от a_1 до a_n в порядке возрастающей нумерации индексов, строки дополняют коэффициентами так, чтобы они чередовались только с четными (включая a_0) и нечетными номерами индексов, а номера индексов в строке возрастали слева направо. Недостающие коэффициенты с номерами индексов меньше нуля и больше n заменяют нулями.

Для устойчивого исходного состояния равновесия по Гурвицу должны выполняться условия

$$\left. \begin{aligned} a_0 > 0; \\ \Delta_s > 0, \quad s = \overline{1, n}. \end{aligned} \right\} \quad (12.62)$$

Здесь диагональные миноры выделяются из главного определителя Гурвица следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \Delta_1 = a_1 > 0; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} > 0; \\ \Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} > 0; \quad \dots \end{aligned} \right\} \quad (12.63)$$

Границу устойчивости системы находят из уравнения

$$\Delta_n = 0 \text{ при } \Delta_s > 0, \quad s = 1, 2, \dots, n-1. \quad (12.64)$$

Так как в определителе (12.61) последний столбец содержит только один коэффициент, неравный нулю, то

$$\Delta_n = a_n \Delta_{n-1}. \quad (12.65)$$

При этом уравнение (12.64) распадается на два равенства: $a_n = 0$ и $\Delta_{n-1} = 0$. Первое определяет границу устойчивости первого типа — *апериодическую границу устойчивости*, а второе позволяет установить границу устойчивости второго типа — *колебательную границу устойчивости*.

Условия устойчивости (12.63) в аналитической форме для уравнений выше четвертого порядка громоздки, что обуславливает практическую сложность использования их в анализе и затрудняет выделение вклада отдельных параметров системы в утяжеление режима и формирование границы устойчивости.

Критерий Лъенара — Шипара для устойчивости системы требует выполнения двух условий:

- 1) коэффициенты характеристического уравнения (12.60) должны быть положительными, т. е. $a_s > 0$ ($s = \overline{0, 1, 2, \dots, n}$);
- 2) диагональные миноры $(n-1)$ и $(n-3)$ определителя (12.61) должны быть положительными, т. е.

$$\Delta_{n-1} > 0; \quad \Delta_{n-3} > 0. \quad (12.66)$$

Критерий Рауса для устойчивости системы также требует выполнения двух условий:

- 1) коэффициенты характеристического уравнения (12.60) должны быть положительными;
- 2) коэффициенты первого столбца таблицы Рауса (табл. 12.1), содержащей $n+1$ строку, должны быть положительными.

В первую строку табл. 12.1 вписывают в порядке возрастания коэффициенты характеристического уравнения с четными номерами индексов (включая a_0), во вторую строку — коэффициенты характеристического уравнения с нечетными номерами индексов, а коэффициенты, вписываемые в последующие строки табл. 12.1, рассчитывают по формуле

$$C_{ki} = C_{k+1, i-2} - \lambda_{i-2} C_{k+1, i-1}, \quad i \geq 3, \quad (12.67)$$

где $\lambda_{i-2} = C_{1, i-2} / C_{1, i-1}$.

Таблица 12.1. Таблица Рауса

Номера i -й строки	Номера k -го		
	1	2	3
1	$c_{11} = a_0$	$c_{21} = a_2$	$c_{31} = a_4$
2	$c_{12} = a_1$	$c_{22} = a_3$	$c_{32} = a_5$
3	$c_{13} = a_2 - \lambda_1 a_3$	$c_{23} = a_4 - \lambda_1 a_5$	$c_{33} = a_6 - \lambda_1 a_7$
4	$c_{14} = a_3 - \lambda_2 c_{23}$	$c_{24} = a_5 - \lambda_2 c_{33}$	$c_{34} = a_7 - \lambda_2 c_{33}$
...

Коэффициенты, записанные в табл. 12.1, получены преобразованием определителя Гурвица (12.61) с использованием свойства, согласно которому значение определителя не изменится, если к коэффициентам любой его строки прибавить коэффициенты другой строки, умноженные на одно и то же число.

Алгоритмическая форма записи критерия Рауса удобна для анализа устойчивости систем с помощью ЭВМ.

Критерий Михайлова при анализе условий устойчивости системы позволяет получить их наглядную геометрическую интерпретацию. Используя корни p_1, p_2, \dots, p_n характеристического уравнения (12.60), последнее можно записать в виде

$$D(p) = a_0(p - p_1)(p - p_2) \dots (p - p_n). \quad (12.68)$$

После замены оператора p угловой скоростью колебаний $j\omega$ уравнение (12.68) можно записать в виде произведения комплексных сомножителей:

$$D(j\omega) = a_0(j\omega - p_1)(j\omega - p_2) \dots (j\omega - p_n), \quad (12.69)$$

в котором представляется возможным выделить вещественную и мнимую части — модуль и аргумент вектора:

$$D(j\omega) = \text{Re } D(j\omega) + j \text{Im } D(j\omega) = |D(j\omega)| \exp(j\varphi(\omega)). \quad (12.70)$$

Выражение (12.70) при фиксированной угловой скорости описывает характеристический радиус-вектор в комплексной плоскости по его полярным координатам с модулем $|D(j\omega)|$ и аргументом $\varphi(\omega)$ или координатами конца радиуса-вектора по оси вещественных чисел

$$\text{Re } D(j\omega) = a_n - a_{n-2}\omega^2 + a_{n-4}\omega^4 - \dots \quad (12.71)$$

и оси мнимых чисел

$$\text{Im } D(j\omega) = a_{n-1}\omega - a_{n-3}\omega^3 + a_{n-5}\omega^5 - \dots \quad (12.72)$$

Если задаваться рядом возрастающих значений угловой скорости, то точки перемещения радиуса-вектора (12.70) описывают кривую, которую называют *кривой Михайлова*.

Графический анализ уравнения (12.70) в комплексной плоскости по независимой переменной ω и зависимым переменным $|D(j\omega)|$, $\varphi(\omega)$ показывает, что характеристический радиус-вектор с изменением угловой скорости в пределах от 0 до $+\infty$ варьирует по моду-

столбца		Коэффициенты λ_{i-2}
1	2	
$c_{41} = a_6$...	—
$c_{42} = a_7$...	—
$c_{43} = a_8 - \lambda_1 a_9$...	$\lambda_1 = a_0/a_1$
$c_{44} = a_9 - \lambda_2 c_{33}$...	$\lambda_2 = a_1/c_{13}$
...

лю и направлению. Изменение направления радиуса-вектора $\varphi(\omega)$ связано со знаком вещественных частей корней p_1, p_2, \dots, p_n , что следует из представления характеристического уравнения в виде произведения комплексных сомножителей (12.69), аргументы которых (углы поворота $\varphi_1,$

$\varphi_2, \dots, \varphi_n$) складываются алгебраически. Каждый из этих сомножителей содержит корень характеристического уравнения и при изменении угловой скорости от нуля до плюс бесконечности соответствует при отрицательной вещественной части корня повороту радиуса-вектора на угол $+\pi/2$, а при его положительной вещественной части — на угол $-\pi/2$.

Тогда для характеристического уравнения n -го порядка его m корням с положительной вещественной частью соответствует угол поворота $-m\pi/2$, $n - m$ корням с отрицательной вещественной частью — угол поворота $(n - m)\pi/2$, а результирующее изменение направления радиуса-вектора будет

$$-m\pi/2 + (n - m)\pi/2 = n\pi/2 - m\pi. \quad (12.73)$$

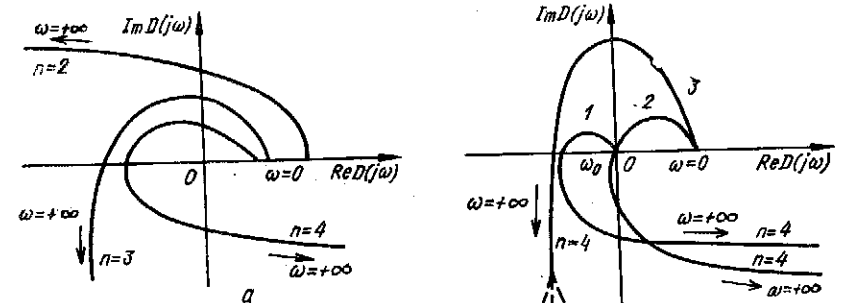


Рис. 12.11. Кривые Михайлова для устойчивых систем уравнений n -го порядка (а) и траектория кривой Михайлова для границ устойчивости первого (1), второго (2) и третьего (3) типов (б)

Выражение (12.73) иллюстрирует сформулированный А. В. Михайловым критерий устойчивости для линейной системы уравнений n -го порядка: *если характеристический радиус-вектор в точке кривой Михайлова при последовательном изменении угловой скорости в пределах от 0 до $+\infty$ имеет результирующий угол поворота $+\pi/2$, то решение системы уравнений устойчиво.*

Из графического анализа условий устойчивости системы по критерию Михайлова вытекают следующие положения (рис. 12.11, а): началом кривой Михайлова является точка на оси вещественных чисел, так как при $\omega = 0$ и $\text{Re } D(0) + j \text{Im } D(0) = \text{Re } D(0)$;

кривая Михайлова проходит последовательно против хода часовой стрелки все квадранты комплексной плоскости и уходит в бесконечность в квадранте, соответствующем порядку системы уравнений (прохождение кривой через начало координат требует дополнительных исследований на устойчивость);

должны чередоваться нули выражений

$$\operatorname{Re} D(j\omega) = 0; \quad \operatorname{Im} D(j\omega) = 0. \quad (12.74, a)$$

Из этих положений следует вторая формулировка критерия устойчивости Михайлова: для устойчивого решения системы уравнений необходимо, чтобы нули выражений вещественной и мнимой частей характеристического радиуса-вектора (12.74, а) чередовались, были действительными и при $\omega_0 = 0$

$$\operatorname{Re} D(j\omega) > 0; \quad d(\operatorname{Im} D(j\omega))/d\omega > 0. \quad (12.74, б)$$

По виду кривой Михайлова могут быть определены границы устойчивости всех трех типов. При $a_n = 0$, что соответствует границе аperiодической устойчивости, кривая Михайлова выходит из начала координат, свидетельствуя о наличии нулевого корня (рис. 12.11, б, кривая 1).

Для границы колебательной устойчивости характеристическое уравнение имеет вид

$$D(j\omega_0) = \operatorname{Re} D(j\omega_0) + j \operatorname{Im} D(j\omega_0) = 0.$$

Это означает, что $\operatorname{Re} D(j\omega_0) = 0$, $\operatorname{Im} D(j\omega_0) = 0$, а кривая Михайлова при угловой скорости незатухающих колебаний проходит через начало координат (рис. 12.11, б, кривая 2).

Границе устойчивости третьего типа соответствует наличие в характеристическом уравнении бесконечного корня. При этом кривая Михайлова изменяет траекторию в зависимости от смены знака с плюса на минус у коэффициента a_0 , как показано на рис. 12.11, б (кривая 3).

Метод *D*-разбиения позволяет выделить область устойчивости в пространстве существенных переменных системы, функционально связанных с коэффициентами характеристического уравнения (12.60), которые при анализе рассматриваются в качестве переменных и позволяют оценить весомость технических параметров в формировании области устойчивости.

Метод заключается в том, что при изменении коэффициентов характеристического уравнения его корни образуют траектории перемещения на комплексной плоскости корней (в общем виде корни представляются комплексными числами). Смена знака вещественной части корня означает пересечение его траекторией мнимой оси комплексной плоскости корней. Координаты точек пересечения образуют так называемую *границу D-разбиения* пространства коэффициентов характеристического уравнения (параметров технической системы). В этих точках характеристическое уравнение имеет корни на мнимой оси комплексной плоскости корней. Замкнутая граница *D*-разбиения отделяет области с различным содержанием

корней с отрицательной вещественной частью, среди которых проверкой для произвольных точек области по ранее рассмотренным критериям устанавливается область устойчивости (в ней все корни имеют отрицательную вещественную часть).

Для нахождения границ области устойчивости используются все три признака их существующих типов, если показатели системы входят в их выражения: для первого типа $a_n = 0$, для второго типа из критерия Гурвица $\Delta_{n-1} = 0$ или критерия Михайлова $D(j\omega_0) = 0$, для третьего типа $a_0 = 0$. Границы *D*-разбиения разделяют области различного числа корней с отрицательной вещественной частью. Это подчеркивают соответствующей их штриховкой. В области, в сторону которой направлены штрихи, число корней с отрицательной вещественной частью больше, чем в смежной области, так как пересечение границы области соответствует переходу траектории корня через мнимую ось плоскости корней.

Для распространенного случая определения границы области устойчивости в плоскости двух показателей *A* и *B* рекомендуется такая последовательность действий:

1. Характеристическое уравнение (12.60) представляют в виде (12.70).

2. Приравняв к нулю вещественную и мнимую части уравнения (12.70), получают

$$\operatorname{Re} D(j\omega, A, B) = 0; \quad (12.75)$$

$$\operatorname{Im} D(j\omega, A, B) = 0. \quad (12.76)$$

3. После совместного решения уравнений (12.75) и (12.76) находят параметрические уравнения

$$A(\omega) = \Delta_A(\omega)/\Delta(\omega); \quad (12.77)$$

$$B(\omega) = \Delta_B(\omega)/\Delta(\omega), \quad (12.78)$$

определяющие координаты точек *A*, *B* границы *D*-разбиения для ряда значений ω в пределах от $-\infty$ до $+\infty$. В (12.77) и (12.78) Δ , Δ_A , Δ_B — соответственно главный и вспомогательные определители системы уравнений (12.75) и (12.76).

4. При $\Delta(\omega_k) = 0$ границей *D*-разбиения являются особые прямые, уравнения которых получают для прямой, соответствующей $\omega = \infty$, из равенства $a_0(A, B) = 0$, а для прямой, соответствующей $\omega = 0$, из равенства $a_n(A, B) = 0$ при $\Delta(\omega_k) = \Delta_A(\omega_k) = \Delta_B(\omega_k) = 0$ подстановкой ω_k в уравнения (12.75) и (12.76).

5. Штрихуют границу *D*-разбиения в направлении возрастания ω слева при $\Delta > 0$ и справа при $\Delta < 0$.

6. Особые прямые штрихуют так, чтобы в месте пересечения (при касании границы области) они были направлены друг к другу только заштрихованными или только незаштрихованными сторонами.

7. Область устойчивости выделяют путем ее проверки в произвольной точке (A_0, B_0) характеристического уравнения $D(j\omega; A_0, B_0) = 0$ на устойчивость по любому критерию. Если данная точка соответствует устойчивому состоянию, то исследуемая область является областью устойчивости.

12.4. Упрощенные методы определения динамической устойчивости

Сильные возмущения в СЭС приводят к резким изменениям режима ее работы. Они возникают в результате изменения состава элементов электрической сети при их включениях и отключениях, КЗ, нарушений баланса генерируемой и потребляемой мощностей в узловых точках СЭС. Наиболее опасны возмущения при КЗ.

Задачами анализа динамической устойчивости СЭС являются оценка характера переходного процесса при сильных возмущениях, установление критических параметров при изменении режима, а также расчет значений существенных параметров режима при переходе из одного состояния в другое. Для решения этих задач используются приближенные методы, поскольку точная оценка динамической устойчивости при учете всех переходных процессов и изменений в СЭС, связанных с сильными возмущениями, весьма сложна.

К числу переходных процессов и изменений в СЭС относятся изменения запаса кинетической и электромагнитной энергии в элементах СЭС, изменения э. д. с. генераторов, генерируемой мощности, сопротивлений магнитных цепей, а также нелинейность угловых характеристик мощности, инерционность механических параметров элементов и т. п.

Приближенные методы анализа динамической устойчивости СЭС основываются на ряде допущений:

разделении электромагнитных и электромеханических переходных процессов по скорости их протекания с мгновенным изменением электрической мощности при смене режимов;

малости отклонений частоты вращения роторов генераторов от синхронной;

неизменности вращающего момента первичных двигателей генераторов и постоянных инерции в течение переходного процесса; замене совокупности генераторов одним эквивалентным;

рассмотрении переходных процессов на ограниченном интервале времени;

сохранении симметрии трехфазной системы источников при ее нарушении в электрической сети;

учете только основных нелинейных характеристик элементов и др.

Уровень принимаемых допущений должен соответствовать конечной цели решаемой задачи анализа динамической устойчивости СЭС. С этой точки зрения приближенные методы анализа можно разделить на *упрощенные* и *уточненные*, отличающиеся уровнем принимаемых допущений и назначением решаемой задачи.

Упрощенные методы позволяют просто и быстро предварительно оценить динамическую устойчивость простейших электрических систем, однако они приемлемы лишь для грубой оценки.

Уточненные методы направлены на конкретизацию расчетов при учете ряда факторов (не принимаемых во внимание в упрощенных методах, но оказывающих существенное влияние на переходный процесс):

автоматического регулирования возбуждения, изменяющего э. д. с. генераторов и, следовательно, их электромагнитный момент;

автоматического регулирования частоты вращения первичных двигателей и их вращающего момента;

учета дополнительных тормозных моментов, возникающих в процессе КЗ от периодической составляющей тока статора и токов, наводимых в успокоительных обмотках ротора;

учета динамических характеристик узлов нагрузки.

Основными упрощенными методами анализа динамической устойчивости СЭС являются: метод площадей, используемый для определения предельных значений угла и времени отключения КЗ; метод последовательных интервалов, применяемый для качественной оценки характера переходного процесса по изменению угла δ во времени.

Предельный угол отключения КЗ можно найти, не устанавливая характер переходного процесса смены режимов. Для этого используется метод площадей, позволяющий оценить соотношение изменения энергии в различных фазах процесса смены режимов работы СЭС. В качестве примера энергетически оценим переход из нормального в аварийный и послеаварийный режимы простейшей системы, которая содержит генератор, работающий через трансформатор и двухцепную ЛЭП на шины бесконечной мощности (см. рис. 11.14, а).

Смена состояний рассматриваемой системы представлена на рис. 12.12 через угловые характеристики активной мощности.

Рабочая точка в нормальном режиме соответствует координатам (P_0, δ_0) , отражающим равенство мощности, развиваемой первичным двигателем генератора, и мощности $P_0 = P_T(\delta_0)$, передаваемой генератором в сеть со сдвигом на угол δ_0 между э. д. с. E' и напряжением U .

При появлении КЗ происходит сброс передаваемой генератором мощности с $P_I(\delta_0)$ до $P_{II}(\delta_0)$, вследствие чего появляется избыточная мощность $\Delta P_{II}(\delta) = P_0 - P_{II}(\delta)$, которая вызывает ускорение ротора генератора. При этом рабочая точка режима перемещается по угловой характеристике мощности $P_{II}(\delta)$ в направлении увеличения угла δ ($\delta > \delta_0$).

Если отключению поврежденной цепи соответствует угол $\delta_{откл}$, то ротор генератора во время ускорения запасет кинетическую энергию

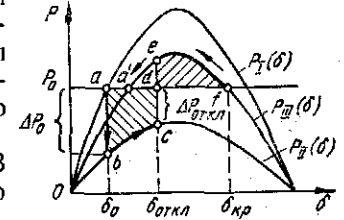


Рис. 12.12. Угловые характеристики мощности для нормального, аварийного и послеаварийного режимов работы системы

$$A_{уск} = \int_{\delta_0}^{\delta_{отк}} \Delta P_{II}(\delta) d\delta \equiv F_{abcd}, \quad (12.79)$$

которая соответствует заштрихованной на рис. 12.12 площади F_{abcd} , называемой *площадью ускорения*.

Отключение поврежденной цепи электропередачи приводит к возрастанию передаваемой в сеть мощности с $P_{II}(\delta_{откл})$ до $P_{III}(\delta_{откл})$. Так как $P_{III}(\delta_{откл}) > P_0$, то появляется тормозной момент для ротора генератора, соответствующий мощности $\Delta P_{III}(\delta) = P_{III}(\delta) - P_0$, где $\delta > \delta_{откл}$. Однако угол δ продолжает увеличиваться до тех пор, пока не будет израсходована запасенная во время ускорения кинетическая энергия ротора генератора.

Во время торможения может быть израсходована энергия, предельное значение которой для интервала изменения угла δ , равного $\delta_{откл} - \delta_{кр}$, определяется выражением

$$A_{торм} = \int_{\delta_{откл}}^{\delta_{кр}} \Delta P_{III}(\delta) d\delta \equiv F_{def}. \quad (12.80)$$

Заштрихованная на рис. 12.12 площадь F_{def} , называемая *площадью торможения*, соответствует кинетической энергии, которая может быть израсходована ротором генератора во время торможения.

Сохранению динамической устойчивости и возвращению рабочей точки режима в точку a' соответствует условие

$$A_{уск} \leq A_{торм}, \quad (12.81)$$

вытекающее из сравнения площадей F_{abcd} и F_{def} .

Математическое выражение условия (12.81) через угловые характеристики мощности режимов записывается следующим образом:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{откл}} (P_0 - P_{II}) d\delta - \int_{\delta_{откл}}^{\delta_{кр}} (P_{III} - P_0) d\delta = 0. \quad (12.82)$$

Из равенства (12.82) можно найти предельное по условию сохранения динамической устойчивости значение угла отключения поврежденной цепи ЛЭП:

$$\delta_{откл.пред} = \arccos \{ [P_0(\delta_{кр} - \delta_0) + P_{maxI} \cos \delta_{кр} - P_{maxII} \cos \delta_0] / (P_{maxIII} - P_{maxII}) \}. \quad (12.83)$$

Предельное время отключения КЗ $t_{откл.пред}$ соответствует получаемому по (12.83) предельному углу отключения. Для произвольного момента времени связь этих величин отражается уравнением движения (11.4). Аналитическое решение его возможно только для частного случая, а именно полного разрыва связи генератора с шинами приемной системы, когда $P = P_{II}(\delta) = 0$, что происходит при трехфазном КЗ на одной из цепей ЛЭП. При этом уравнение (11.4) упрощается и принимает вид

$$T_J (d^2\delta/dt^2) = P_0. \quad (12.84)$$

Решение этого уравнения методом последовательного интегрирования при постоянных $c_1 = (d\delta/dt)_{t=0} = 0$ и $c_2 = \delta_0$ позволяет

получить угол

$$\delta = P_0/(2T_J t^2) + \delta_0, \quad (12.85)$$

откуда можно найти значение предельного времени отключения трехфазного КЗ:

$$t_{откл.пред} = \sqrt{2T_J(\delta_{откл.пред} - \delta_0)/P_0}. \quad (12.86)$$

Если угол δ выразить в градусах, а постоянную времени T_J — в секундах, то формула (12.86) примет вид

$$t_{откл.пред} = \sqrt{T_J(\delta_{откл.пред} - \delta_0)/(9000P_0)}. \quad (12.87)$$

При малой длительности КЗ (0,1—0,2 с) формулой (12.87) пользуются для вычисления предельного времени отключения несимметричных КЗ, когда $P_{II}(\delta) > 0$ (см. рис. 12.12). В этом случае мощность P_0 представляют в виде

$$\Delta P = (\Delta P_0 + \Delta P_{откл})/2 = P_0 - P_{maxII}(\sin \delta_0 - \sin \delta_{откл})/2. \quad (12.88)$$

Качественную оценку переходного процесса смены режимов выполняют по зависимости $\delta = f(t)$, которую получают численным решением уравнения (11.4) методом последовательных интервалов. При этом можно учесть влияние управляющих воздействий на характер переходного процесса от регулирования возбуждения, изменения времени отключения поврежденного элемента, АПВ и т. д.

Переходный процесс, описываемый уравнением (11.4), разбивают на ряд равных интервалов времени Δt . В практических расчетах интервал времени берут в пределах 0,02—0,1 с в зависимости от длительности КЗ и характеристик устройств системной автоматики. Переходный процесс рассматривают последовательно по интервалам. В каждом интервале времени избыток мощности (правая часть уравнения) считают неизменным и при этом допущении вычисляют приращение угла $\Delta\delta$.

В момент сброса мощности (момент КЗ) возникает избыток мощности ΔP_0 (рис. 12.13). Приращение угла в течение первого интервала времени Δt находят при начальных условиях $(d\delta/dt)_{t=0} = 0$ и $\delta = \delta_0$ последовательным интегрированием уравнения (11.4):

$$\Delta\delta_1 = \Delta t^2 \Delta P_0 / (2T_J); \quad \delta_1 = \delta_0 + \Delta\delta_1. \quad (12.89)$$

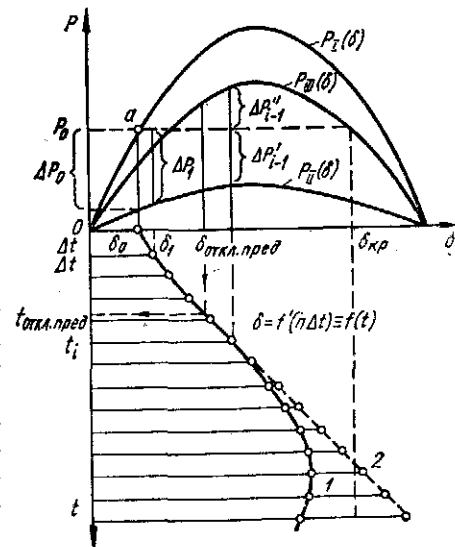


Рис. 12.13. К расчету динамической устойчивости системы методом последовательных интервалов

Во втором интервале времени ротор генератора движется под действием избытка мощности $\Delta P_1 = P_0 - P_{max1} \sin \delta_1$ и некоторой начальной скорости, приобретенной в первом интервале:

$$(d\delta/dt)_1 = \Delta t (\Delta P_0 + \Delta P_1)/(2T_J). \quad (12.90)$$

Решив уравнение (11.4) относительно приращения угла во втором интервале времени, получим

$$\Delta \delta_2 = \Delta t^2 \Delta P_1 / (2T_J) + \Delta t (d\delta/dt)_1. \quad (12.91)$$

После преобразования (12.91) с учетом (12.89) и (12.90) найдем

$$\Delta \delta_2 = \Delta \delta_1 + \Delta t^2 \Delta P_1 / T_J. \quad (12.92)$$

Если постоянную инерции T_J и время Δt выразить в секундах, углы $\Delta \delta_1$ и $\Delta \delta_2$ — в градусах и ввести постоянную

$$k = 18000 \Delta t^2 / T_J,$$

то выражение (12.92) примет вид

$$\Delta \delta_2 = \Delta \delta_1 + k \Delta P_1. \quad (12.93)$$

Для n -го интервала времени по аналогии запишем

$$\Delta \delta_n = \Delta \delta_{n-1} + k \Delta P_{n-1}. \quad (12.94)$$

Если в i -м интервале времени происходит изменение режима с переходом из одной угловой характеристики мощности на другую (см. рис. 12.13), то приращение угла определяется выражением

$$\Delta \delta_i = \Delta \delta_{i-1} + 0,5k (\Delta P_{i-1} + \Delta P'_i). \quad (12.95)$$

Расчет точек кривой $\delta = f(n\Delta t)$ следует выполнять до тех пор, пока угол δ не начнет уменьшаться по кривой 1 (см. рис. 12.13), что соответствует сохранению устойчивости, или пока не будет установлено, что угол δ продолжает возрастать по кривой 2; соответствующей нарушению устойчивости. По кривой $\delta = f(t)$ можно определить также предельное время отключения КЗ, используя вычисленное по (12.83) значение предельного угла отключения поврежденной цепи ЛЭП.

12.5. Оценка динамической устойчивости сложной системы

Обычно СЭС предприятия получает питание от нескольких независимых источников. В этом случае систему внешнего электроснабжения можно рассматривать как сложную систему. Наиболее распространенной является СЭС с двусторонним питанием.

Рассмотрим электрическую систему, содержащую две станции, элементы связи между ними и нагрузки (рис. 12.14, а). Работа генераторов станций описывается уравнениями

$$\left. \begin{aligned} T_{J1} d^2 \delta_1 / dt^2 &= P_{10} - P_1 = \Delta P_1; \\ T_{J2} d^2 \delta_2 / dt^2 &= P_{20} - P_2 = \Delta P_2. \end{aligned} \right\} \quad (12.96)$$

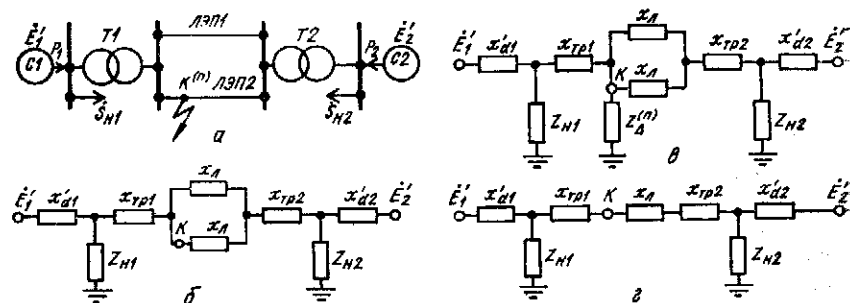


Рис. 12.14. Схема электрической системы с двумя станциями (а) и схемы ее замещения в нормальном (б), аварийном (в) и послеаварийном (г) режимах

В схемы замещения системы для различных режимов введем модель нагрузки в виде неизменных комплексных сопротивлений. При этом связь между источниками электрической энергии создается пассивными элементами и ее можно выразить через собственные и взаимные проводимости ветвей с учетом сопротивлений нагрузки. Тогда угловые характеристики мощности генераторов станций на основании уравнения (12.2) примут вид

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= E_1' E_1' y_{11} \sin \alpha_{11} + E_1' E_2' y_{12} \sin (\delta_{12} - \alpha_{12}); \\ P_2 &= E_2' E_2' y_{22} \sin \alpha_{22} - E_1' E_2' y_{12} \sin (\delta_{12} + \alpha_{12}). \end{aligned} \right\} \quad (12.97)$$

Схемы замещения системы для нормального, аварийного (КЗ) и послеаварийного (отключение ЛЭП) режимов показаны на

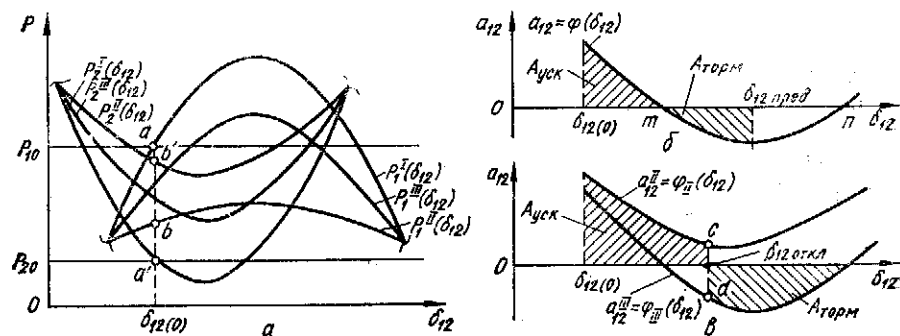


Рис. 12.15. Зависимость мощности и относительного ускорения роторов генераторов станций от взаимного угла перемещения роторов

рис. 12.14, б—г. Они содержат неизменную во всех режимах э. д. с. станций и переменные при смене режимов проводимости ветвей между ними. Угловые характеристики мощности с учетом направления ее передачи от станций в сеть для рассматриваемых режимов изображены на рис. 12.15, а; они построены для общей переменной — взаимного угла δ_{12} перемещения роторов генераторов станций.

В момент КЗ происходит изменение отбираемой от генераторов активной мощности и рабочие точки генераторов перемещаются из a и a' соответственно в b и b' . В данном случае ротор генератора первой станции будет ускоряться под действием избытка мощности $\Delta P_1^{(0)} > 0$, а ротор генератора второй станции замедляться под действием избытка мощности $\Delta P_2^{(0)} < 0$.

Соотношение и знаки избыточных моментов зависят от параметров системы, вида возмущающего воздействия и рассматриваемого момента времени. Выполнить оценку динамической устойчивости по значениям избытков мощности и приращениям углов для каждого генератора невозможно, так как при этом неизвестен знак скорости относительного перемещения роторов генераторов станций (знак скорости изменения взаимного угла δ_{12}). Учесть этот знак можно по второй производной этой переменной — относительному ускорению роторов генераторов станций.

Для этого уравнения (12.96) нужно привести к виду

$$\left. \begin{aligned} d^2\delta_1/dt^2 &= \Delta P_1/T_{J1}; \\ d^2\delta_2/dt^2 &= \Delta P_2/T_{J2}. \end{aligned} \right\} \quad (12.98)$$

Разность между уравнениями (12.98) позволяет получить уравнение относительного движения роторов генераторов станций

$$a_{12} = d^2\delta_{12}/dt^2 = \Delta P_1/T_{J1} - \Delta P_2/T_{J2}, \quad (12.99)$$

где a_{12} — относительное ускорение роторов генераторов станций.

Из зависимости $a_{12} = \varphi(\delta_{12})$ (рис. 12.15, б) следует, что ускорение это знакопеременное. Так как между относительными ускорением a_{12} и скоростью перемещения роторов v_{12} существует связь

$$a_{12} = dv_{12}/dt, \quad (12.100)$$

то при положительных значениях ускорения относительная скорость перемещения роторов возрастает, а при отрицательных значениях — уменьшается.

После преобразования выражения (12.100) с учетом того, что $v_{12} = d\delta_{12}/dt$, получим

$$a_{12} = (dv_{12}/d\delta_{12})(d\delta_{12}/dt) \Rightarrow a_{12}d\delta_{12} = v_{12}dv_{12}.$$

Интегрирование последнего тождества дает

$$\int_{\delta_{12(0)}}^{\delta_{12}} a_{12}d\delta_{12} = \int_{v_{12(0)=0}}^{v_{12}} v_{12}dv_{12} = 0,5v_{12}^2 \Big|_0^{v_{12}} = 0,5v_{12}^2. \quad (12.101)$$

Левая часть равенства (12.101) определяет площадь, которая ограничивается кривой $a_{12} = \varphi(\delta_{12})$ (см. рис. 12.15, б). Эта площадь пропорциональна скорости относительного перемещения роторов генераторов. Соответственно знаку относительного ускорения можно выделить площади ускорения (увеличение скорости относительного перемещения роторов) и торможения (ее уменьшение) и использовать метод площадей на основе равенства (12.101) для оценки устойчивости системы.

Равенству $\int_{\delta_{12(0)}}^{\delta_{12}} a_{12}d\delta_{12} = 0$ соответствует скорость $v_{12} = 0$, что выполняется при $A_{\text{уск}} = A_{\text{торм}}$ (см. рис. 12.15, б). Наибольшая площадь торможения

$$A_{\text{торм}} = \int_{\delta_{12(m)}}^{\delta_{12(n)}} a_{12}d\delta_{12}$$

может быть использована для оценки запаса динамической устойчивости $K_s = A_{\text{торм}}/A_{\text{уск}}$ системы.

При смене режимов работы СЭС характеристики относительного ускорения роторов генераторов станций строят для аварийного $a_{12}^{II} = \varphi_{II}(\delta_{12})$ и послеаварийного $a_{12}^{III} = \varphi_{III}(\delta_{12})$ режимов (см. рис. 12.15, в). При этом из-за отключения повреждения рабочая точка режима перемещается из c в d . На графике можно выделить площади ускорения и торможения. Их равенство соответствует предельному значению угла отключения КЗ $\delta_{12\text{откл.пред}}$.

Предельное время отключения КЗ, соответствующее углу $\delta_{12\text{откл.пред}}$, находят по зависимости $\delta_{12} = f(t)$, которую строят методом последовательных интервалов. Основные этапы ее расчета такие же, как и для системы с одним генератором, работающим на шины неизменного напряжения (см. п. 12.4). Дополнительно для каждого интервала определяют приращение взаимного угла перемещения роторов.

В первом интервале (верхний индекс в скобках означает номер интервала) имеем

$$\delta_1^{(1)} = \delta_{1(0)} + \Delta\delta_1^{(1)}; \quad \delta_2^{(1)} = \delta_{2(0)} + \Delta\delta_2^{(1)}; \quad (12.102)$$

$$\Delta\delta_{12}^{(1)} = \Delta\delta_1^{(1)} - \Delta\delta_2^{(1)}; \quad (12.103)$$

$$\delta_{12}^{(1)} = \delta_{12(0)} + \Delta\delta_{12}^{(1)} = \delta_1^{(1)} - \delta_2^{(1)}. \quad (12.104)$$

Во втором интервале по (12.96) и (12.97) рассчитывают избытки мощности в начале интервала (конце первого интервала) для первой $\Delta P_1^{(1)}$ и второй $\Delta P_2^{(1)}$ станций, а также приращения углов:

$$\Delta\delta_1^{(2)} = \Delta\delta_1^{(1)} + k_1\Delta P_1^{(1)} \text{ при } k_1 = 18\,000\Delta t^2/T_{J1};$$

$$\Delta\delta_2^{(2)} = \Delta\delta_2^{(1)} + k_2\Delta P_2^{(1)} \text{ при } k_2 = 18\,000\Delta t^2/T_{J2},$$

откуда получают

$$\Delta\delta_{12}^{(2)} = \Delta\delta_{12}^{(1)} + k_1\Delta P_1^{(1)} - k_2\Delta P_2^{(1)};$$

$$\delta_{12}^{(2)} = \delta_{12}^{(1)} + \Delta\delta_{12}^{(2)}.$$

Для последующих интервалов приращения углов вычисляют по аналогичным формулам:

$$\Delta\delta_1^{(n)} = \Delta\delta_1^{(n-1)} + k_1\Delta P_1^{(n-1)}; \quad \Delta\delta_2^{(n)} = \Delta\delta_2^{(n-1)} + k_2\Delta P_2^{(n-1)};$$

$$\Delta\delta_{12}^{(n)} = \Delta\delta_{12}^{(n-1)} + k_1\Delta P_1^{(n-1)} - k_2\Delta P_2^{(n-1)};$$

$$\delta_{12}^{(n)} = \delta_{12}^{(n-1)} + \Delta\delta_{12}^{(n)}.$$

Динамическую устойчивость СЭС с числом источников более двух анализируют в основном методом последовательных интервалов в изложенной выше последовательности. Такие системы относят к сложным и они характеризуются совокупностью независимых переменных взаимных углов между парами роторов генераторов. Наличие большого числа независимых переменных не позволяет воспользоваться методом площадей для определения предельного угла отключения КЗ; поэтому метод последовательных интервалов используют для расчета конкретного, заранее заданного времени отключения КЗ.

В каждом интервале приращения абсолютных значений углов δ перемещения ротора каждого генератора вычисляют по формулам (12.102). Избытки мощности по каждому источнику удобно

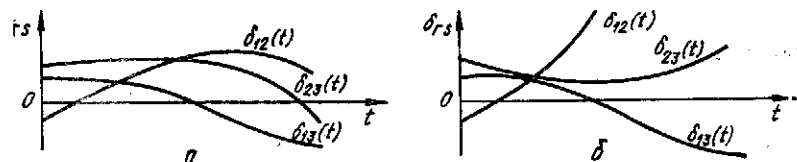


Рис. 12.16. Характер изменения взаимных углов перемещения роторов генераторов для системы с тремя источниками при сохранении (а) и нарушении (б) ее устойчивости

определить, используя уравнения типа (12.96) и (12.97). Для каждого интервала по абсолютным значениям углов δ находят взаимные углы между парами генераторов $\delta_{12}^{(n)}$, $\delta_{13}^{(n)}$, $\delta_{23}^{(n)}$, ..., $\delta_{rs}^{(n)}$, применяя формулы типа (12.103) и (12.104) для построения зависимостей $\delta_{12}(t)$, $\delta_{13}(t)$, $\delta_{23}(t)$, ..., $\delta_{rs}(t)$.

Об устойчивости СЭС судят по характеру изменения взаимных углов. Их изменение во времени должно быть единообразным и невозрастающим (рис. 12.16, а). Признаком неустойчивости СЭС является монотонно возрастающий характер части зависимостей взаимных углов от времени (рис. 12.16, б).

Характер изменения зависимостей $\delta_{rs}(t)$ определяют для каждого заранее заданного времени отключения КЗ. Чтобы установить предельное время отключения КЗ, изложенную последовательность расчетов необходимо повторить для других значений времени отключения КЗ, пока не будет установлен характер изменения зависимостей $\delta_{rs}(t)$, подтверждающий устойчивость или неустойчивость СЭС.

12.6. Учет автоматического регулирования возбуждения при расчете устойчивости по внутреннему пределу мощности

Угловая характеристика мощности генератора без АРВ при постоянной э. д. с. E_{q0} определяется выражением

$$P = E_{q0}U \sin \delta / (x_d + x_{вн}). \quad (12.105)$$

При увеличении передаваемой в сеть мощности по сравнению с исходным режимом ($I_1 > I_0$) одновременно увеличивается угол δ , а вектор э. д. с. \vec{E}_{q0} генератора меняет направление при $|\dot{E}_{q1}| = |\dot{E}_{q0}|$ (рис. 12.17, а). При этом напряжение на зажимах генератора уменьшается ($U_{r1} < U_{r0}$). Следовательно, предел мощности (12.105) при $\delta = \pi/2$ снижается.

Если генератор имеет АРВ, то увеличение передаваемой мощности и связанное с ним увеличение угла δ приводят к изменению э. д. с. генератора. Это соответствует переходу с угловой характеристики, построенной при постоянной э. д. с. E_{q0} , на угловую характеристику, которая соответствует постоянной э. д. с. $E_{q1} > E_{q0}$ (рис. 12.17, б). С возрастанием угла δ э. д. с. генератора меняется, а согласно характеристике пе-

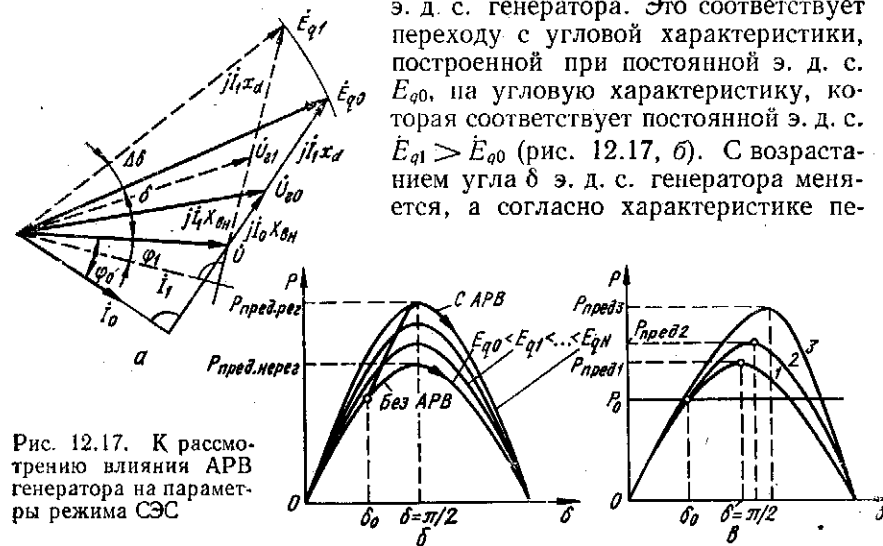


Рис. 12.17. К рассмотрению влияния АРВ генератора на параметры режима СЭС

редаваемой в сеть мощности предел мощности повышается, характеризуясь смещением в зону углов $\delta > \pi/2$. Таким образом, АРВ влияет на предел передаваемой в сеть мощности и, следовательно, на устойчивость СЭС.

При расчете устойчивости важное значение имеет учет типа устройств АРВ. Различают *автоматические регуляторы пропорционального типа* и *автоматические регуляторы сильного действия*. Первые реагируют на отклонение одного или нескольких параметров режима от контролируемых значений, вторые дополнительно реагируют на скорости и ускорения изменения параметров режима. Введение производных изменений параметров режима в законы регулирования не только стабилизирует систему регулирования, но и значительно повышает предельную передаваемую мощность (предел устойчивости). Автоматические регуляторы пропорционального типа обеспечивают устойчивость режима в меньшем диапазоне изменения угла δ и передаваемой мощности P (кривая 2 на рис. 12.17, в) по сравнению с автоматическими регуляторами сильного действия (кривая 3 на рис. 12.17, в). Кривая 1 на рис. 12.17, в характеризует угловую характеристику мощности генератора без АРВ.

Рассмотрим, как учитывают АРВ генератора при расчете устойчивости СЭС уточненным методом с использованием практических критериев. Оценка пределов устойчивости СЭС без АРВ генератора и с АРВ может быть сведена к оценке предельной мощности, передаваемой генератором в сеть.

Оценка статической устойчивости. Выполним анализ статической устойчивости простейшей электрической системы с генератором, оснащенным автоматическим регулятором пропорционального типа по отклонению напряжения и работающим на шины с неизменным напряжением (рис. 12.18, а). Переходный процесс здесь можно описать системой уравнений, включающей в себя:

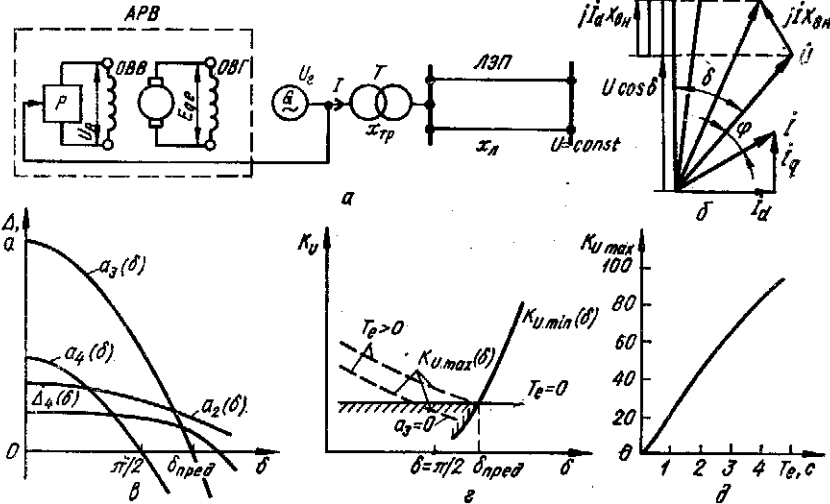


Рис. 12.18. К анализу статической устойчивости электрической системы с автоматическим регулятором пропорционального типа по отклонению напряжения

уравнение относительного движения ротора генератора

$$(T_J/\omega_0) d^2\delta/dt^2 = P_0 - E_q U \sin \delta/x_d; \quad (12.106)$$

уравнение переходного процесса в роторе генератора (контур цепи возбуждения генератора с независимым возбуждением)

$$T_{d0} dE'_q/dt + E_q = E_{qe}; \quad (12.107)$$

уравнение переходного процесса в цепи возбуждения возбуждителя

$$T_e dE_{qe}/dt + E_{qe} = U_p. \quad (12.108)$$

Величины, входящие в уравнения (12.106) — (12.108), означают: T_{d0} — постоянная времени обмотки возбуждения генератора (ОВГ) при разомкнутой обмотке статора; E'_q и E_q — переходная и синхронная продольные э. д. с.; E_{qe} — э. д. с. в установив-

шемся режиме, равная в относительных единицах напряжению возбудителя; T_e — постоянная времени обмотки возбуждения возбудителя (ОВВ); U_p — установившееся значение напряжения ОВВ, равное в относительных единицах напряжению на выходе регулятора.

Уравнение идеального автоматического регулятора напряжения пропорционального типа, мгновенно изменяющего напряжение на ОВВ, пропорционально отклонению напряжения на зажимах генератора:

$$U_p - U_{p0} = -K_U (U_r - U_{r0}), \quad (12.109)$$

где K_U — коэффициент усиления (регулирования) регулятора.

Система уравнений (12.106) — (12.109) содержит шесть переменных: δ , E'_q , E_{qe} , U_p , U_r . Дополнительные уравнения, связывающие их между собой, могут быть получены из векторной диаграммы генератора (рис. 12.18, б):

$$E_q = U \cos \delta + I_d X_d; \quad (12.110)$$

$$E'_q = U \cos \delta + I_d X'_d; \quad (12.111, a)$$

$$U_r \approx U_{r0} = U \cos \delta + I_d X_{вн}, \quad (12.112, a)$$

где

$$X_{вн} = x_{тр} + 0,5x_d; \quad X_d = x_d + X_{вн}; \quad X'_d = x'_d + X_{вн}.$$

Определив из (12.110) ток I_d и подставив его в уравнения (12.111, а) и (12.112, а), запишем недостающие уравнения

$$E'_q = E_q X'_d/X_d + U \cos \delta (X_d - X'_d)/X_d; \quad (12.111, б)$$

$$U_r = E_q X_{вн}/X_d + U \cos \delta (X_d - X_{вн})/X_d. \quad (12.112, б)$$

Систему уравнений (12.106) — (12.109), (12.111, б) и (12.112, б) представим через соответствующие линеаризованные уравнения, составленные на основании малых приращений. В операторной форме записи они имеют вид

$$\Delta \delta (T_J/\omega_0) p^2 = \Delta \delta \partial P/\partial \delta - \Delta E_q \partial P/\partial E_q; \quad (12.113)$$

$$\Delta E'_q T_{d0} p + \Delta E_q = \Delta E_{qe}; \quad (12.114)$$

$$\Delta E_{qe} (1 + p T_e) = \Delta U_p; \quad (12.115)$$

$$\Delta U_p = -K_U \Delta U_r; \quad (12.116)$$

$$\Delta E'_q = \Delta \delta \partial E'_q/\partial \delta + \Delta E_q \partial E'_q/\partial E_q; \quad (12.117)$$

$$\Delta U_r = \Delta \delta \partial U_r/\partial \delta + \Delta E_q \partial U_r/\partial E_q, \quad (12.118)$$

где частные производные переменных

$$\left. \begin{aligned} \partial P/\partial \delta &= S_{E_q} = E_q U \cos \delta/X_d; & \partial P/\partial E_q &= U \sin \delta/X_d; \\ \partial E'_q/\partial \delta &= U \sin \delta (X'_d - X_d)/X_d; & \partial E'_q/\partial E_q &= X'_d/X_d; \\ \partial U_r/\partial \delta &= U \sin \delta (X_{вн} - X_d)/X_d; & \partial U_r/\partial E_q &= X_{вн}/X_d. \end{aligned} \right\} \quad (12.119)$$

Для получения характеристического уравнения системы (12.113) — (12.118) необходимо выполнить следующие преобразо-

вания: (12.118) подставить в (12.116), а полученное значение ΔU_p — в (12.115); значение ΔE_{qe} из полученного уравнения, а также (12.117) подставить в (12.114); для полученного уравнения и (12.113) составить определитель системы и раскрыть его. В результате характеристическое уравнение примет вид

$$a_0 p^4 + a_1 p^3 + (a_2 + K_U \Delta_2) p^2 + a_3 p + a_4 + K_U \Delta_4 = 0, \quad (12.120)$$

где

$$a_0 = (T_J/\omega_0) T_{d0} T_e \partial E_q' / \partial E_q; \quad a_1 = (T_J/\omega_0) (T_{d0} \partial E_q' / \partial E_q + T_e);$$

$$a_2 = T_J/\omega_0 + T_{d0} T_e [(\partial E_q' / \partial E_q) (\partial P / \partial \delta) - (\partial E_q' / \partial \delta) (\partial P / \partial E_q)];$$

$$a_3 = T_{d0} [(\partial E_q' / \partial E_q) (\partial P / \partial \delta) - (\partial E_q' / \partial \delta) (\partial P / \partial E_q)]; \quad a_4 = \partial P / \partial \delta;$$

$$\Delta_2 = (T_J/\omega_0) (\partial U_r / \partial E_q); \quad \Delta_4 = (\partial P / \partial \delta) (\partial U_r / \partial E_q) - (\partial P / \partial E_q) (\partial U_r / \partial \delta).$$

После подстановки в эти выражения частных производных (12.119) получим

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= T_d' T_e T_J / \omega_0; \quad a_1 = (T_d' + T_e) T_J / \omega_0; \\ a_2 &= T_J / \omega_0 + T_d' T_e [E_q U \cos \delta / X_d + U^2 \sin^2 \delta (X_d - X_d') / (X_d X_d')]; \\ a_3 &= T_d' [E_q U \cos \delta / X_d + U^2 \sin^2 \delta (X_d - X_d') / (X_d X_d')] + T_e E_q U \cos \delta / X_d; \\ a_4 &= E_q U \cos \delta / X_d; \\ \Delta_2 &= (T_J / \omega_0) X_{bn} / X_d; \quad \Delta_4 = [E_q U \cos \delta / X_d + U^2 \sin^2 \delta (X_d - X_{bn}) / (X_d X_{bn})] X_{bn} / X_d, \end{aligned} \right\} \quad (12.121)$$

где $T_d' = T_{d0} X_d' / X_d$.

В преобразованном характеристическом уравнении (12.120)

$$a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4 + K_U (\Delta_2 p^2 + \Delta_4) = 0$$

первая часть с коэффициентами a_0, \dots, a_4 , которые не зависят от регулирования возбуждения, определяет устойчивость нерегулируемой электрической системы. Вторая часть уравнения отображает воздействие АРВ (Δ_2 и Δ_4 — единичные прибавки к соответствующим коэффициентам характеристического уравнения, пропорциональные коэффициенту усиления регулятора).

Анализируя (12.121), можно сделать следующие выводы:

коэффициенты a_0 и a_1 всегда положительны и не зависят от режима работы и параметров сети, на которую работает генератор;

коэффициенты a_2, a_3, Δ_2 и Δ_4 зависят от режима работы и параметров сети. С увеличением угла δ некоторые из них становятся отрицательными (рис. 12.18, в), что свидетельствует о нарушении необходимого условия устойчивости системы, соответствующего положительным значениям всех коэффициентов характеристического уравнения.

Для выявления условий устойчивости системы можно воспользоваться критерием Гурвица (см. п. 12.3):

$$a_2 + K_U \Delta_2 > 0; \quad (12.122)$$

$$a_3 > 0; \quad (12.123)$$

$$a_4 + K_U \Delta_4 > 0; \quad (12.124)$$

$$a_1 (a_2 + K_U \Delta_2) a_3 - a_1^2 (a_4 + K_U \Delta_4) - a_0 a_3^2 > 0. \quad (12.125)$$

С целью упрощения анализа условий устойчивости вначале полагают, что постоянная времени возбудителя $T_e = 0$. Это позволяет получить характеристическое уравнение более низкого (до третьего) порядка, так как $a_0 = 0$ [см. (12.120) и (12.121)].

Устойчивость генератора без АРВ ($K_U = 0$) с увеличением передаваемой мощности и угла δ нарушается при изменении знака на отрицательный у коэффициента a_4 , т. е. при нарушении критерия (12.124). Критерий (12.123) при $T_e = 0$ и $K_U = 0$ имеет вид

$$a_3 = T_d' [a_4 + U^2 \sin^2 \delta (X_d - X_d') / (X_d X_d')],$$

но после того, как a_4 становится отрицательным, уже не является граничным условием устойчивости. Критерий (12.122) при $T_e = 0$ и $K_U = 0$ всегда положителен. Критерий (12.125) при $T_e = 0$ и $K_U = 0$ имеет вид

$$a_2 a_3 - a_1 a_3 = (T_d' T_J / \omega_0) [U^2 \sin^2 \delta (X_d - X_d') / (X_d X_d')]$$

и положителен при любых значениях угла δ .

Таким образом, при учете только электромагнитных переходных процессов в обмотке возбуждения устойчивость нерегулируемого генератора определяется граничным условием — положительным значением синхронизируемой мощности $S_{E_q} = a_4$, определяемой при постоянстве э. д. с. E_q .

Введением регулирования по отклонению напряжения ($K_U \neq 0$) свободному члену неравенства (12.124) можно придать положительное значение при углах, больших $\pi/2$, и тем самым устранить причину нарушения устойчивости нерегулируемого генератора. Условие наличия положительного знака у коэффициента a_4 определяет границу наименьших значений коэффициента усиления по отклонению напряжения, что следует из (12.124):

$$K_{U \min} = -a_4 / \Delta_4. \quad (12.126)$$

Характер изменения зависимости $K_{U \min}(\delta)$ показан на рис. 12.18, г. При положительном коэффициенте a_4 устойчивость может нарушиться при изменении знака либо у коэффициента a_3 (наличие регулирования по отклонению напряжения на него не влияет), либо у неравенства (12.125).

Можно показать, что коэффициент a_3 зависит от знака синхронизирующей мощности, определенной при постоянстве переходной э. д. с. E_q' . Если в уравнение (12.105) вместо E_q подставить

(12.111, б), то получим

$$P = E'_q U \sin \delta / X'_d - U^2 \sin \delta \cos \delta (X_d - X'_d) / (X_d X'_d),$$

или

$$P = E'_q U \sin \delta / X'_d - U^2 \sin 2\delta (X_d - X'_d) / (2X_d X'_d). \quad (12.127)$$

Частная производная при $E'_q = \text{const}$ имеет вид

$$\partial P / \partial \delta = S_{E'_q} = E'_q U \cos \delta / X'_d - U^2 \cos 2\delta (X_d - X'_d) / (X_d X'_d).$$

С учетом (12.111, б) и равенства $\cos 2\delta = \cos^2 \delta - \sin^2 \delta$ имеем

$$S_{E'_q} = E'_q U \cos \delta / X'_d + U^2 \sin^2 \delta (X_d - X'_d) / (X_d X'_d).$$

Если учесть также (12.119), то получим

$$S_{E'_q} = S_{E_q} + U^2 \sin^2 \delta (X_d - X'_d) / (X_d X'_d). \quad (12.128)$$

Из сопоставления (12.128) с выражением a_3 в (12.121) следует, что при $T_e = 0$ $a_3 = T_e S_{E'_q}$. Таким образом, знак у коэффициента a_3 определяется знаком синхронизирующей мощности $S_{E'_q}$.

Анализируя (12.125) с учетом (12.121), находим максимальное значение коэффициента усиления регулятора

$$K_{U \max} = X'_d / (X_{\text{вн}} (1 - x_d X'_d / ((x_d - x'_d) X_{\text{вн}}))),$$

а интервал изменения этого коэффициента следующий:

$$-a_4 / \Delta_4 < K_U < (a_1 a_4 - a_2 a_3) (a_1 \Delta_4 - \Delta_2 a_3). \quad (12.129)$$

Рис. 12.18, г показывает, что устойчивость системы нарушается при углах $\delta > \delta_{\text{пред}}$, лежащих вне выделенной на нем области.

Для $\delta = \delta_{\text{пред}}$ после преобразования (12.129) получаем

$$a_3 (\Delta_2 a_4 - a_2 \Delta_4) = 0,$$

а если учесть (12.121) при $T_e = 0$, то последнее равенство можно записать так:

$$S_{E'_q} (T_e T'_d / \omega_0) U^2 \sin^2 \delta X_{\text{вн}} (X_d - X_{\text{вн}}) / X'_d = 0.$$

Следовательно, при $K_U \neq 0$ и $\delta = \delta_{\text{пред}}$ синхронизирующая мощность еще положительна. Это позволяет сделать вывод о том, что граничным условием нарушения устойчивости системы с автоматическим регулятором пропорционального типа по отклонению напряжения является условие $S_{E'_q} = 0$. Кроме того, введение такого

регулятора не может увеличить предела устойчивости системы, найденного по условию положительного значения синхронизирующей мощности $S_{E'_q}$ и постоянства E'_q , так как это условие не зависит от коэффициента усиления регулятора.

При постоянной времени возбудителя $T_e > 0$ оценка условий устойчивости системы состоит в следующем. Выделяют граничное

условие по критерию Гурвица (12.122) — (12.125). Неравенство (12.122) не определяет устойчивость системы, поскольку оно нарушается всегда позже неравенства (12.123), что очевидно из (12.121). Из сопоставления неравенств (12.123) и (12.124) следует, что раньше нарушается неравенство (12.123): при $T_e = 0$ и $\delta = \delta_{\text{пред}}$ оба неравенства нарушаются одновременно, а при $T_e > 0$ увеличиваются значения K_U , что обеспечивает соблюдение неравенства (12.124) при больших углах δ .

Таким образом, граничное условие устойчивости системы определяется неравенствами (12.123) и (12.125). Из неравенства (12.125) следует, что максимальное значение коэффициента усиления регулятора определяется выражением

$$K_{U \max} = (a_3^2 a_0 / a_1 - a_3 a_2 + a_1 a_4) (a_1 \Delta_4 - \Delta_2 a_3). \quad (12.130)$$

При увеличении постоянной времени возбудителя $K_{U \max}$ также возрастает (рис. 12.18, д). С увеличением угла δ значения $K_{U \max}$ вследствие уменьшения коэффициента a_3 [см. (12.121)] падают. При $a_3 = 0$ коэффициент усиления $K_{U \max} = a_4 / \Delta_4$, что меньше его значения при $T_e = 0$ [см. (12.129)]. Поэтому при возрастании угла δ и $T_e > 0$ первым нарушается условие устойчивости (12.125), которое является граничным для установления предела мощности по статической устойчивости системы с автоматическим регулятором пропорционального типа по отклонению напряжения.

При АРВ генератора по отклонению напряжения с заданным коэффициентом усиления регулятора предел статической устойчивости системы рассчитывают в следующем порядке:

1. Определяют значение э. д. с. в установившемся режиме

$$E_q = E_{q0} + K_U (U_{r0} - U_r), \quad (12.131)$$

где E_{q0} и U_{r0} — соответственно э. д. с. за синхронным индуктивным сопротивлением и напряжение на зажимах генератора в исходном режиме.

2. Подставив значение (12.112, б) в уравнение (12.131), находят значение синхронной э. д. с. по формуле

$$E_q = [E_{q0} + K_U (U_{r0} - U \cos \delta (X_d - X_{\text{вн}})) / X'_d] / (1 + K_U X_{\text{вн}} / X'_d). \quad (12.132)$$

3. Вычисляют по формуле (12.111, б) значение переходной э. д. с.

4. Преобразуя уравнение (12.105) с учетом (12.132), получают угловую характеристику мощности

$$P = [(E_{q0} + K_U U_{r0}) U \sin \delta - U^2 K_U (X_d - X_{\text{вн}}) \times \sin 2\delta / (2X'_d)] / (X'_d + K_U X_{\text{вн}}). \quad (12.133)$$

С достаточной для практических расчетов точностью угловую характеристику мощности можно определить также по формуле (12.127), используя найденное по (12.111, б) значение синхронной э. д. с.

5. Находят предел передаваемой мощности и предельное значение угла перемещения ротора генератора. При использовании угловой характеристики мощности (12.133) предел передаваемой мощности определяют по предельному значению угла $\delta_{\text{пред}}$, получаемому из решения уравнения (12.130), которое приравняют заданному значению коэффициента усиления, и вычисляют значения коэффициентов по (12.121), а синхронную э. д. с. по (12.132):

$$c_1 \cos^2 \delta_{\text{пред}} + c_2 \cos \delta_{\text{пред}} + c_3 = 0 \text{ и } \delta_{\text{пред}} = \arccos \delta_{\text{пред}}, \quad (12.134)$$

где

$$c_1 = U^2 [K_U (T_d + T_e) (X_d - X_{\text{вн}}) / (X_d (X_d + X_{\text{вн}} K_U)) + T_d (X_d - X'_d) / (X_d X'_d)];$$

$$c_2 = -U (T_d + T_e) (E_{q0} + K_U U_{r0}) / (X_d + X_{\text{вн}} K_U);$$

$$c_3 = -U^2 T'_d (X_d - X'_d) / (X_d X'_d) + T_J (T_d + T_e) / (T_e^2 \omega_0 \times \\ \times ((1 + T_e (X_d - X_{\text{вн}}) X'_d / (T_d (X'_d - X_{\text{вн}}) X_d)) \times \\ \times (X'_d - X_{\text{вн}}) K_U / (X_d - X_{\text{вн}} - 1)).$$

6. При использовании угловой характеристики мощности (12.127) предельное значение угла $\delta_{\text{пред}}$ можно найти из уравнения (12.128), полагая $S_{E_q} = 0$.

Анализ устойчивости системы с автоматическим регулятором пропорционального типа показывает, что действие АРВ генератора позволяет расширить область статической устойчивости системы за предел $\delta = \pi/2$, причем граница устойчивости находится в пределах, соответствующих $S_{E_q} = 0$ и $S_{E_q} = 0$.

Оценка динамической устойчивости. Динамическую устойчивость простейшей электрической системы с автоматическим регулятором пропорционального типа, в которой генератор работает на шины неизменного напряжения, необходимо рассматривать с учетом нелинейности характеристик ее элементов.

Смену режимов работы такой системы достаточно полно можно проанализировать на основе метода последовательных интервалов с линеаризацией уравнений переходных процессов на каждом интервале. Оценку устойчивости в этом случае выполняют по характеру изменения угла перемещения ротора генератора во времени.

Устройство форсировки возбуждения в самом простом варианте реализует закорачивание сопротивления в цепи ОВВ генератора при снижении напряжения на его зажимах до значения $0,85 U_{\text{г.ном}}$. При этом ток в цепи ОВВ и пропорциональное ему напряжение возбуждателя с учетом времени запаздывания $t_{\text{зап}}$ от срабатывания устройств АРВ (порядка 0,05 с) возрастают до наибольшего значения $E_{qe \text{ max}}$ по экспоненциальному закону с постоянной времени возбуждателя T_e (рис. 12.19).

Так как э. д. с. в установившемся режиме генератора E_{q0} пропорциональна, а в относительных единицах равна напряжению

возбудителя, то при форсировке возбуждения закон ее нарастания можно записать в виде

$$E_{qe} = E_{qe\phi} = E_{qe0} + (E_{qe \text{ max}} - E_{qe0}) [1 - \exp(-t/T_e)], \quad t_{\text{зап}} < \\ < t < t_1. \quad (12.135, a)$$

Форсировка возбуждения продолжается до достижения напряжения генератора $(0,95 \div 1,05) U_{\text{г.ном}}$. При снятии форсировки напряжение возбуждателя и э. д. с. генератора уменьшаются по закону

$$E_{qe} = E_{qe\phi} - (E_{qe} - E_{qe0}) [1 - \exp(-t/T_e)], \quad t > t_2, \quad (12.135, b)$$

где

$$E_{qe\phi} \in [E_{qe0}, E_{qe \text{ max}}].$$

Зная закон изменения э. д. с. генератора $E_{qe}(t)$, можно методом последовательных интервалов численно решить уравнение электромагнитного переходного процесса в роторе генератора

$$T_{ad} dE'_q/dt + E_q = E_{qe}(t)$$

совместно с численным решением

уравнений его относительного движения (12.106) в различных режимах. Приращение продольной переходной э. д. с. за расчетный интервал времени определяется выражением

$$\Delta E'_{q(n)} = \Delta t (E_{qe(n)} - E_{q(n-1)}) / T_{d0}, \quad (12.136)$$

где E_{qe} принимается средним за рассчитываемый n -й интервал времени.

Определив приращение э. д. с. $\Delta E'_{q(n)}$, в n -м интервале можно вычислить полное значение продольной переходной э. д. с. в конце рассчитываемого интервала

$$E'_{q(n)} = E'_{q(n-1)} + \Delta E'_{q(n)}. \quad (12.137)$$

В момент возникновения аварийного состояния (КЗ) продольная переходная э. д. с. не изменяется, т. е. $E'_{q0} = E'_{q(0)}$. Это условие и является исходным при определении изменения по интервалам э. д. с. E'_q . В нормальном режиме

$$E'_q = E_q - I_a (x_d - x'_d), \quad (12.138, a)$$

где продольная составляющая тока генератора вычисляется через внутреннюю реактивную мощность генератора и значение синхронной э. д. с. E_q :

$$I_a = E_q y_{11} \cos \alpha_{11} - U y_{12} \cos (\delta - \alpha_{12}).$$

После подстановки и преобразования (12.138, a) получим

$$E'_q = E_q [1 - (x_d - x'_d) y_{11} \cos \alpha_{11}] + \\ + U y_{12} (x_d - x'_d) \cos (\delta - \alpha_{12}). \quad (12.138, б)$$

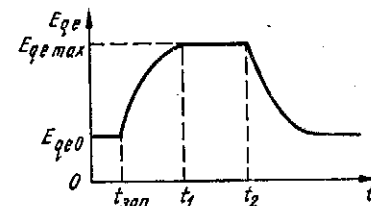


Рис. 12.19. Характер изменения э. д. с. генератора при форсировке его возбуждения

Если емкостной проводимостью и активным сопротивлением элементов сети пренебречь, то с учетом тождеств $x_d - x'_d \equiv X_d - X'_d$ и $y_{11} \equiv y_{12} \equiv 1/X_d$ выражение (12.138,б) приводится к упрощенному виду (12.111,б). Выражение (12.138,б) можно использовать также для определения синхронной э. д. с. E_q по известному значению переходной э. д. с. E'_q :

$$E_q = [E'_q - U y_{12} (X_d - X'_d) \cos(\delta - \alpha_{12})] / [1 - y_{11} (X_d - X'_d) \cos \alpha_{11}]. \quad (12.139)$$

Порядок расчета динамической устойчивости простейшей электрической системы с автоматическим регулятором пропорционального типа с использованием зависимости $\delta(t)$ следующий:

1. Составляют схемы замещения сети для нормального, аварийного и послеаварийного режимов и определяют собственные, а также взаимные проводимости и сопротивления.

2. На основании расчета нормального режима устанавливают значения P_0 , δ_0 , E_{q0} , E'_{q0} .

3. По заданным характеристикам регулятора и возбудителя строят кривую изменения э. д. с. $E_{q0}(t)$ для установившегося режима при форсировке возбуждения генератора.

4. Используя (12.139), вычисляют значение э. д. с. $E_{q(0)}$ для первого момента после возникновения аварийного состояния (КЗ). Расчетная формула при этом имеет вид

$$E_{q(0)} = [E'_{q0} - U y_{12} (x_d - x'_d) \cos(\delta_0 - \alpha_{12})] / [1 - y_{11} (X_d - X'_d) \cos \alpha_{11}].$$

5. Используя (12.136), находят приращение переходной э. д. с. в течение первого интервала времени:

$$\Delta E'_{q(t)} = \Delta t (E_{qe(t)} - E_{q(0)}) / T_{d0},$$

где $E_{qe(t)}$ — среднее значение E_{qe} за первый интервал времени.

6. По формуле (12.137) рассчитывают значение переходной э. д. с. в конце первого (начале второго) интервала времени:

$$E'_{q(1)} = E'_{q0} + \Delta E'_{q(1)}.$$

7. Определяют активную мощность, отдаваемую генератором в начале первого интервала времени,

$$P_{(0)} = E_{q(0)}^2 y_{11} \sin \alpha_{11} + E_{q(0)} U y_{12} \sin(\delta_0 - \alpha_{12})$$

и избыток мощности за этот интервал

$$\Delta P_{(0)} = P_0 - P_{(0)}.$$

8. Вычисляют приращение угла перемещения ротора генератора за первый интервал времени:

$$\Delta \delta_{(1)} = 0,5k \Delta P_{(0)}.$$

Для каждого из последующих интервалов времени расчет повторяют по последним пяти пунктам. Если при этом в n -м интервале времени угловая характеристика мощности генератора не меняется, то приращение угла

$$\Delta \delta_{(n)} = \Delta \delta_{(n-1)} + k \Delta P_{(n-1)},$$

а если меняется, то

$$\Delta \delta_{(n)} = \Delta \delta_{(n-1)} + 0,5k (\Delta P'_{(n-1)} + \Delta P''_{(n-1)}).$$

Для каждого интервала времени рассчитывают напряжение генератора по формуле (12.112,б) с использованием предварительно найденного по формуле (12.139) значения синхронной э. д. с. По вычисленным значениям напряжения генератора контролируют момент снятия форсировки его возбуждения.

При расчете устойчивости электрической системы, генераторы которой оснащены обычными возбудителями, приближенно можно считать, что форсировка возбуждения генераторов продолжается до достижения углом δ максимального значения. В этом случае при расчете лишь первого отклонения угла δ необходимость в определении напряжения генератора отпадает.

Учет автоматического регулятора сильного действия при оценке устойчивости системы связан с анализом характеристических уравнений более высоких порядков, чем при учете автоматического регулятора пропорционального типа. Их анализ выполняют методом D -разбиения в плоскости коэффициентов при производных изменения параметров режима или с применением физического моделирования, аналоговых и цифровых вычислительных машин.

Введение в закон регулирования возбуждения производных изменения параметров режима обеспечивает расширение области устойчивости до еще больших значений угла δ , чем при автоматическом регуляторе пропорционального типа, вплоть до его предельного значения. При этом существенно увеличивается и передаваемая в сеть предельная мощность (см. рис. 12.17, в, кривая 3). Если при использовании автоматического регулятора пропорционального типа предельная мощность не превышает значения, рассчитанного при постоянстве э. д. с. E'_q , то при использовании автоматического регулятора сильного действия предельная мощность соответствует ее угловой характеристике, когда $U_r = \text{const}$ [8]. С помощью автоматического регулятора сильного действия исключается влияние собственного сопротивления генератора на устойчивость системы.

Таким образом, наличие разных пределов передаваемой в сеть мощности при использовании того или иного устройства АРВ генератора позволяет по-разному представлять генератор в схеме замещения при расчете устойчивости электрической системы:

генератор без АРВ замещают синхронной продольной э. д. с. $E_q = \text{const}$ за синхронным индуктивным сопротивлением x_d (рис. 12.20, а);

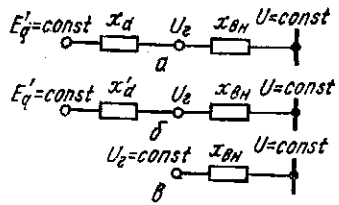


Рис. 12.20. Схемы замещения генератора с упрощенным учетом его АРВ по внутреннему пределу мощности

генератор с автоматическим регулятором пропорционального типа может быть замещен источником э. д. с. $E'_q = \text{const}$ за переходным индуктивным сопротивлением x_d (рис. 12.20, б);

генератор с автоматическим регулятором сильного действия, обеспечивающим стабилизацию напряжения на зажимах генератора, является источником неизменного напряжения $U_r = \text{const}$, которое считают независимым параметром режима (рис. 12.20, в).

12.7. Оценка результирующей устойчивости

Оценка результирующей устойчивости СЭС заключается в определении условий, при которых восстанавливается нормальный режим ее работы в случае возникновения в СЭС кратковременного асинхронного режима работы ее отдельных элементов. При этом следует анализировать как процесс при переходе ненагруженных синхронных машин из асинхронного режима в синхронный — процесс синхронизации, так и процесс вхождения в синхронизма нагруженных синхронных машин, ранее выпавших из синхронизма и работающих асинхронно, — процесс ресинхронизации. Этот анализ необходим для выяснения причин появления асинхронного режима и устранения его последствий, а также принятия мер, способствующих восстановлению синхронной работы электроустановок.

Рассмотрим условия восстановления синхронной работы генераторов и двигателей. Как уже отмечалось, асинхронные режимы работы синхронных машин возникают под действием разных причин: нарушения статической и динамической устойчивости; потери возбуждения; асинхронного пуска; кратковременных перерывов в питании; понижений напряжения, обусловленных отключением КЗ, действием АПВ или АВР; самозапуска синхронных двигателей после восстановления электроснабжения.

Для большинства синхронных генераторов асинхронный режим работы не представляет опасности, однако при этом снижается выработка ими активной мощности (ее называют *асинхронной активной мощностью*). Такие генераторы обычно потребляют из системы значительную реактивную мощность, необходимую для создания электромагнитных полей в случае асинхронной работы, что может сопровождаться нарушением баланса реактивной мощности в СЭС и приводит к снижению напряжения в ее узловых точках, нарушению устойчивой работы остальных генераторов и двигателей. Частично опасность таких последствий устраняется правильным выбором и размещением ИРМ в СЭС и использованием регулирующих устройств.

Допуская переход в асинхронные режимы, необходимо оценивать с точки зрения проявления возможных последствий такие фак-

торы, как увеличение механических усилий в роторах генераторов при повышении частоты их вращения в асинхронном режиме, возрастание тока статора ввиду потребления из сети реактивной мощности, снижение вырабатываемой активной мощности и др. Если изменения названных величин находятся в допустимых пределах, то нормальную работу генератора можно восстановить, не отключая его от сети. В этом случае считают, что система сохраняет результирующую устойчивость, поскольку электроснабжение не нарушается.

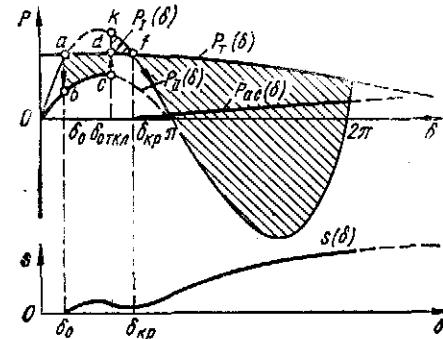


Рис. 12.21. Процесс выпадания генератора из синхронизма

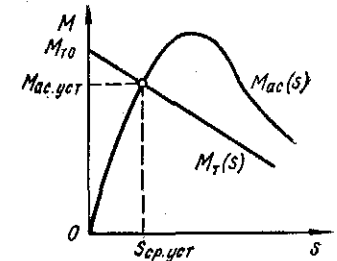


Рис. 12.22. Механические характеристики турбины и генератора при работе в асинхронном режиме

Процесс перехода генератора в асинхронный режим показан на рис. 12.21. Факт нарушения его динамической устойчивости (после отключения аварийного состояния и перехода с помощью АПВ на угловую характеристику мощности исходного режима) проиллюстрирован по методу площадей. Дальнейшее развитие процесса характеризуется увеличением скольжения и асинхронного момента [мощности $P_{ac}(\delta)$], а под действием регуляторов частоты вращения первичного двигателя снижается и момент турбины. Если при этом не учитывать пульсирующий характер синхронного момента M_c , то создаются условия установившегося асинхронного режима $M_T(\mu) \approx M_{ac.уст}$ (рис. 12.22), при котором увеличение частоты вращения прекращается.

Установившийся асинхронный режим в этом случае характеризуется средними значениями асинхронного момента $M_{ac.уст}$ и скольжения $s_{кр.уст}$. Вырабатываемая генератором в данном режиме асинхронная активная мощность

$$P_{*ac} \approx M_{*ac}, \quad (12.140)$$

а реактивная асинхронная мощность

$$Q_{*ac} \approx P_{*ac}/s_{кр}. \quad (12.141)$$

В реальных условиях между генератором и шинами неизменного напряжения имеется сеть (см. рис. 12.14, а), которая снижает

асинхронный момент до значения, определяемого выражением

$$M_{ac} = M_{ac}(x_{вн}=0) (x_d/x_{вн})^2.$$

Для установления допустимости асинхронного режима определяют наибольшие значения асинхронных активной и реактивной мощностей, соответствующих наибольшему значению скольжения s_{max} , которое определяется пульсацией синхронного момента.

Переход к процессу ресинхронизации возможен при дальнейшем снижении скольжения под действием регуляторов частоты вращения первичных двигателей или же аналогичного управляющего воздействия обслуживающего персонала. Скольжение в любой момент времени можно определить, решив уравнение относительного движения ротора генератора, преобразованного к виду

$$sT_J ds/d\delta = M_T - M_c - M_{ac}, \quad (12.142)$$

где $s = d\delta/dt$.

Интегрируя (12.142) в пределах изменения скольжения $[s, s_{max}]$ и угла $[\delta, \delta_{max}]$, получаем

$$0,5T_J (s_{max}^2 - s^2) = \int_{\delta}^{\delta_{max}} (M_T - M_c - M_{ac}) d\delta,$$

откуда

$$s = \sqrt{s_{max}^2 - (2/T_J) \int_{\delta}^{\delta_{max}} M_{\Sigma} d\delta}. \quad (12.143)$$

Если в установившемся асинхронном режиме снижать среднее значение скольжения, то с учетом пульсации скольжения возможен его переход через нулевое значение. Это необходимое условие, соответствующее процессу ресинхронизации, выполняется при

$$s_{max}^2 = \left(2 \int_{\delta}^{\delta_{max}} M_{\Sigma} d\delta \right) / T_J, \quad (12.144)$$

или

$$s_{ср. доп} = \sqrt{\left(\int_{\delta}^{\delta_{max}} M_{\Sigma} d\delta \right) / T_J}. \quad (12.145)$$

Ресинхронизация наступает при условии

$$s_{ср. уст} < s_{ср. доп}, \quad (12.146)$$

где $s_{ср. уст}$ — среднее значение скольжения в установившемся асинхронном режиме; $s_{ср. доп}$ — среднее значение скольжения при ресинхронизации.

Условие ресинхронизации (12.146) является необходимым, но недостаточным. Оно указывает на то, что для успешной ресинхронизации при $s = 0$ должно соблюдаться соотношение моментов

$$M_c \geq M_T. \quad (12.147)$$

Таким образом, успешная ресинхронизация может быть обеспечена регулированием частоты вращения и момента первичного двигателя в сторону их уменьшения или увеличением синхронного момента генератора (регулированием его возбуждения), что и определяет состав технических средств обеспечения процесса ресинхронизации. В большинстве случаев для ресинхронизации генераторов ТЭС промышленных предприятий этих средств достаточно. Специальные меры для восстановления синхронизма генераторов могут потребоваться лишь при связях с малым запасом статической устойчивости частей системы.

Рассмотренная грубая количественная оценка результирующей устойчивости генераторов позволяет проводить лишь ее качественный анализ и может использоваться в практических расчетах для оценки возможности ресинхронизации. Основные положения более точного анализа результирующей устойчивости генераторов изложены в [7] и могут быть реализованы с помощью ЭВМ.

Восстановление синхронного режима работы синхронных двигателей производится для ответственных механизмов, сохранение которых в работе необходимо по условиям технологии производства и допустимо по условиям техники безопасности. Оно может осуществляться: ресинхронизацией; ресинхронизацией с автоматической кратковременной разгрузкой рабочего механизма (если она допускается по условиям технологического процесса) до такой степени, при которой обеспечивается втягивание электродвигателя в синхронизм; отключением электродвигателя и повторным его автоматическим пуском.

На процесс ресинхронизации двигателя влияют следующие факторы: характеристики двигателя, его система возбуждения, степень загрузки, зависимость момента сопротивления технологического механизма от скольжения, момент инерции агрегата двигатель — механизм, напряжение на зажимах двигателя, длительность перебива в питании.

Процесс ресинхронизации двигателя можно условно разделить на два этапа: разгон при $M_{ac} > M_{мх}$ до подсинхронной частоты вращения; вхождение в синхронизм. На первом этапе уравнение синхронного двигателя такое же, как и асинхронного, — (12.12). Двигатель разгоняется до подсинхронного скольжения, которое определяется равенством моментов $M_{ac}(s) = M_{мх}(s)$. На втором этапе на асинхронно работающий с подсинхронным скольжением двигатель подается возбуждение. Развиваемый им суммарный электромагнитный момент [см. уравнение (12.8)] для практических расчетов записывают в виде

$$M = M_{ac} + M_a + M_p + M_{торм}, \quad (12.148)$$

где выделяют составляющие:
синхронизирующий момент, определяемый возбуждением,

$$M_a = E_q U \sin \delta / x_d; \quad (12.149)$$

реактивный синхронизирующий момент, обусловленный магнитной несимметрией ротора,

$$M_p = 0,5U(x_d - x_q) \sin 2\delta / (x_d x_q); \quad (12.150)$$

тормозной момент, возникающий за счет токов, наводимых в обмотке статора, при работе двигателя с возбуждением

$$M_{\text{торм}} = (r_{\text{ст}} + r_c) (E_q / x_d) / (1 - s). \quad (12.151)$$

Здесь $r_{\text{ст}}$ и r_c — активные сопротивления обмотки статора двигателя и питающей сети.

Процесс ресинхронизации двигателя по уравнению (12.8) с учетом (12.148) оценивают методом последовательных интервалов. Для грубой оценки возможности вхождения двигателя в синхронизм сравнивают следующие величины:

1) момент сопротивления технологического механизма при скольжении $s = 0,05$ с асинхронным моментом двигателя при том же значении скольжения, учитывая напряжение на зажимах двигателя и состояние системы возбуждения. При этом должно выполняться условие

$$M_{\text{ас } s=0,05} > M_{\text{мх } s=0,05}. \quad (12.152)$$

Асинхронный момент двигателя при $s = 0,05$ и $U_* = 1$ (входной) приводится в каталогах, а момент сопротивления механизма можно рассчитать по формуле (12.16). Оценка по условию (12.152) является приближенной (имеет значительный запас);

2) некоторое критическое скольжение $s_{\text{кр}}$, при котором еще возможна синхронизация двигателя при пуске и самозапущке со скольжением установившегося асинхронного режима. При этом должно выполняться условие

$$s_{\text{кр}} > s_{\text{ср.уст}}. \quad (12.153)$$

Расчет условий ресинхронизации при пуске и самозапущке синхронных двигателей изложен в гл. 15.

12.8. Применение средств вычислительной техники

Из-за многообразия взаимосвязанных показателей и воздействующих факторов описание режима работы и переходных процессов в сложных ЭЭС является трудновыполнимой задачей. При целенаправленном анализе переходных процессов ее упрощают путем выделения наиболее существенных факторов и показателей. На их основе создается модель исследуемого явления. Изучение свойств различного рода моделей с учетом принятых допущений отражает свойства реальных процессов в ЭЭС, позволяет сделать исследование многофакторным и наглядным, автоматизировать вычислительные операции и оперативно решать системы уравнений, описывающих переходные и установившиеся процессы с достаточной для практики точностью.

В зависимости от сложности изучаемых процессов используются различного рода модели, которые и определяют применение конкретных вычислительных средств [15].

При исследовании статической устойчивости по «сползанию» с использованием критерия равенства нулю свободного члена характеристического уравнения или эквивалентных ему практических критериев, а также при анализе и расчете синхронной динамической устойчивости в одном-двух циклах качаний по методу последовательных интервалов применяются статические и динамические модели переменного тока.

Статическая модель переменного тока представляет собой набор элементов (генераторных, трансформаторных, линейных и нагрузочных), позволяющих в определенном масштабе воспроизводить (моделировать) однофазную схему замещения исследуемой системы.

Динамическая модель переменного тока отличается более совершенными элементами моделирования генераторов, двигателей и нагрузочных элементов. Она дает возможность автоматически воспроизводить установившиеся и переходные процессы в системе и автоматически регистрировать их показатели.

Для оценки статической устойчивости по характеру переходного процесса при малом возмущении системы и для оценки динамической устойчивости по характеру изменения относительных углов синхронных машин и напряжений, а также для исследования всех видов устойчивости систем с небольшим числом источников и учете влияния регуляторов частоты вращения и возбуждения генераторов и их характеристик используются аналоговые ЭВМ. Это машины непрерывного действия, которые состоят из набора операционных элементов (усилителей постоянного тока) и выполняют операции сложения, умножения, интегрирования, дифференцирования, преобразования функций и т. д.

Для аналоговых ЭВМ независимой переменной является физическая переменная — время. В такую машину вводится система уравнений, описывающих переходный процесс в рассматриваемой электрической системе с учетом переходных процессов в ее регулирующих устройствах. Если решение ведется в реальном масштабе времени, то к машине могут быть подключены реальные регуляторы. Увеличение количества источников в исследуемой системе приводит к значительному увеличению числа операционных элементов, включаемых в модель. Это затрудняет ввод задачи в машину и снижает точность решения.

Для расчета устойчивости электрических систем по различным критериям могут применяться цифровые ЭВМ. Они отвечают высоким требованиям точности расчетов сложных систем с учетом большого числа факторов. Единственным требованием при их использовании является требование математического описания переходных процессов и действия факторов. Применение цифровых ЭВМ также целесообразно при большом диапазоне изменений показателей системы и расчетных условий, оценке принимаемых в анализе устойчивости допущений.

Для исследования устойчивости и анализа происходящих процессов со сложным их математическим описанием могут применяться физические модели. Они используются при исследовании новых технических средств повышения устойчивости, разработке новых регуляторов и устройств автоматического управления. Физическое моделирование осуществляется для воспроизведения на модели физических явлений, подобных тем, которые происходят в реальной исследуемой системе. Физическая модель представляет собой уменьшенную копию системы, где все элементы (генераторы, трансформаторы, ЛЭП, нагрузки и др.) выполняются физически подобными соответствующим реальным элементам.

Сочетание расчетов на моделях переменного тока, аналоговых и цифровых ЭВМ с экспериментами на физических моделях и действующих СЭС является наиболее эффективным методом исследования переходных процессов и устойчивости.

12.9. Примеры расчетов

Пример 12.1. Для СЭС с шинами неизменного напряжения, расчетная схема которой показана на рис. 12.23, а, построить векторную диаграмму напряжений и угловую характеристику активной мощности эквивалентного генератора.

Решение. По схеме замещения СЭС (рис. 12.23, б) вычисляем ее параметры:

$$z_{*11} = z_{*12} = j0,12 + 0,2 + j0,5 = 0,2 + j0,62 = 0,738 \exp(j72,1^\circ);$$

$$y_{*11} = y_{*12} = 1,355;$$

$$\alpha_{11} = \alpha_{12} = 90 - 72,1 = 17,9^\circ.$$

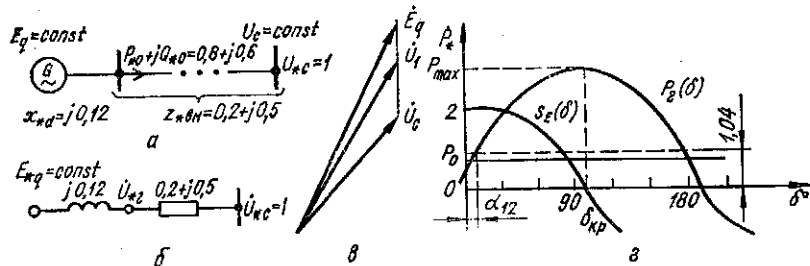


Рис. 12.23. К примерам 12.1 и 12.2

Определяем модуль и аргумент вектора напряжения на зажимах генератора:

$$U_{*Г} = \sqrt{(U_{*С}^2 + P_{*0}R_{*ВН} + Q_{*0}x_{*ВН})^2 + (P_{*0}x_{*ВН} - Q_{*0}R_{*ВН})^2} / U_{*С} = \\ = \sqrt{(1^2 + 0,8 \cdot 0,2 + 0,6 \cdot 0,5)^2 + (0,8 \cdot 0,5 - 0,6 \cdot 0,2)^2} / 1 = 1,48;$$

$$\operatorname{tg} \delta_{ВН} = (P_{*0}x_{*ВН} - Q_{*0}R_{*ВН}) / (U_{*С}^2 + P_{*0}R_{*ВН} + Q_{*0}x_{*ВН}) = \\ = (0,8 \cdot 0,5 - 0,6 \cdot 0,2) / (1^2 + 0,8 \cdot 0,2 + 0,6 \cdot 0,5) = 0,192; \delta_{ВН} = 0,9^\circ.$$

Находим синхронную э. д. с. и угол между э. д. с. и напряжением системы:

$$E_{*Г} = \sqrt{(1^2 + 0,8 \cdot 0,2 + 0,6 \cdot 0,62)^2 + (0,8 \cdot 0,62 - 0,6 \cdot 0,2)^2} = 1,58; \\ \operatorname{tg} \delta = (0,8 \cdot 0,62 - 0,6 \cdot 0,2) / (1^2 + 0,8 \cdot 0,2 + 0,6 \cdot 0,62) = 0,245; \delta = 13,8^\circ.$$

По вычисленным значениям вектора напряжения и э. д. с. строим векторную диаграмму (рис. 12.23, в).

Угловая характеристика активной мощности эквивалентного генератора

$$P_G = E_{*Г}^2 y_{*11} \sin \alpha_{11} + E_{*Г} U_{*С} y_{*12} \sin(\delta - \alpha_{12}) = \\ = 1,58^2 \cdot 1,355 \sin 17,9^\circ + 1,58 \cdot 1 \cdot 1,355 \sin(\delta - 17,9^\circ) = \\ = 1,04 + 2,14 \sin(\delta - 17,9^\circ)$$

изображена на рис. 12.23, г.

Пример 12.2. Оценить статическую устойчивость режима СЭС из предыдущего примера и вычислить запас ее устойчивости.

Решение. Оценку статической устойчивости выполним по положительному знаку синхронизирующей мощности. Ее уравнение получим дифференцированием угловой характеристики мощности:

$$S_E = dP/d\delta = 2,14 \cos(\delta - 17,9^\circ).$$

Исходный режим СЭС ($P_G = P_0$) устойчив при изменении угла δ от 0 до $\delta_{кр}$ (см. рис. 12.23, г), который определяется из условия $S_E = dP/d\delta = 0$:

$$2,14 \cos(\delta_{кр} - 17,9^\circ) = 0, \text{ откуда } \delta_{кр} = 107,9^\circ.$$

Наибольшая мощность, отдаваемая эквивалентным генератором на границе статической устойчивости, $P_{\max} |_{\delta=107,9^\circ} = 3,18$. Запас статической устойчивости

$$K_{зП} = (P_{\max} - P_0) \cdot 100 / P_0 = \\ = (3,18 - 0,8) \cdot 100 / 0,8 = 298 \%$$

Пример 12.3. Узел нагрузки на рис. 12.24, а питается от мощной СЭС. Его комплексная нагрузка задана статическими характеристиками:

$$P_{*Н} = -0,1 + 0,8U_*;$$

$$Q_{*Н} = 2,1 - 6,1U_* + 4,7U_*^2.$$

Определить запас статической устойчивости СЭС по напряжению.

Решение. Существенной независимой переменной, которая отражает состояние узла нагрузки, является напряжение в точке включения нагрузки. Оценку статической устойчивости СЭС выполним, анализируя по этой переменной систему уравнений установившегося режима с использованием критерия $d(Q_{*Г.ЭК} - Q_{*Н})/dU_* < 0$:

$$\left. \begin{aligned} Q_{*Г} &= (-U_* + \sqrt{E_{*ГЭК}^2 U_*^2 - P_{*Н}^2 x_{*рез}^2}) / x_{*рез}; \\ Q_{*Н} &= 2,1 - 6,1U_* + 4,7U_*^2; \\ \Delta Q_* &= Q_{*Г} - Q_{*Н}. \end{aligned} \right\}$$

Подставив сюда численные значения величин, получим

$$\left. \begin{aligned} Q_{*Г} &= -0,5U_*^2 + \sqrt{U_*^2 - P_*^2}; \\ \Delta Q_* &= -5,2U_*^2 + 6,1U_* + \sqrt{U_*^2 - P_*^2} - 2,1. \end{aligned} \right\}$$

Результаты решения этой системы уравнений сведены в табл. 12.2 и отражены на рис. 12.24, б. Из рисунка следует, что $d(\Delta Q_*)/dU_* = 0$ при $U_{*кр} = 0,63$

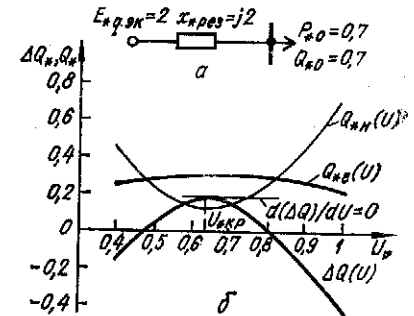


Рис. 12.24. К примеру 12.3

Таблица 12.2. Результаты решения системы уравнений

U	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4
$P_{*н}$	0,7	0,62	0,54	0,46	0,38	0,3	0,22
$Q_{*н}$	0,7	0,42	0,228	0,133	0,132	0,23	0,41
$Q_{*г}$	0,214	0,247	0,271	0,283	0,284	0,275	0,254
ΔQ_*	-0,486	-0,173	0,043	0,15	0,152	0,045	-0,156

При этом запас статической устойчивости СЭС

$$K_{3U} = (U_{*0} - U_{*кр}) \cdot 100 / U_{*0} = (1 - 0,63) \cdot 100 / 1 = 37 \%$$

Пример 12.4. От шин неизменного напряжения СЭС через ЛЭП питается узел нагрузки, который на рис. 12.25, а представлен в виде эквивалентного асинхронного двигателя. Определить критическое напряжение в системе, при котором произойдет затормаживание двигателей узла нагрузки, и запас статической устойчивости СЭС.

Решение. Схема замещения узла нагрузки изображена на рис. 12.25, б. Сопрогивление рассеяния двигателя

$$x_s = U_{*ном}^2 / (2P_{*max}) = 1 / (2 \cdot 2,2) = 0,227.$$

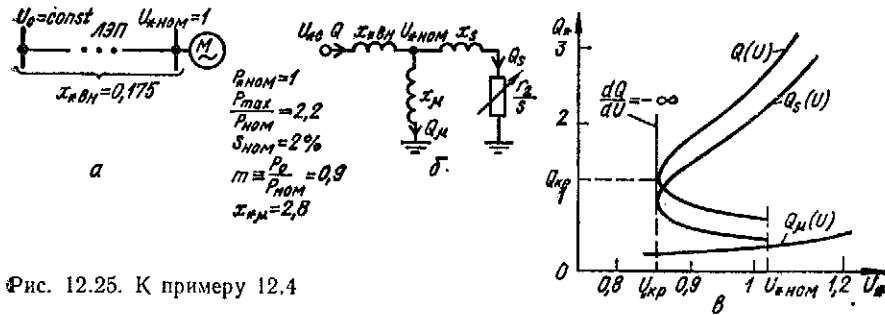


Рис. 12.25. К примеру 12.4

Сопрогивление ротора найдем, решив квадратное уравнение, полученное после преобразования уравнения (12.37) при значениях параметров исходного режима $P_{*ном} = 1$ и $U_{*ном} = 1$:

$$(r_2/s)^2 - (r_2/s) + 0,227 = 0,$$

откуда

$$r_2/s = 0,95 \text{ и } r_2 = 0,019.$$

Так как соотношение сопротивлений в схеме замещения $x_{*вн} < (0,1 + 0,15) x_{*л}$, то ветвь с сопротивлением намагничивания можно не учитывать и считать, что $x_{*эк} = x_{*вн}$.

При изменении потребляемой активной мощности существенной переменной, отражающей состояние узла нагрузки, является скольжение. Поэтому статическую устойчивость СЭС оцениваем по критерию $dP/ds > 0$. При этом критическое напряжение в системе

$$U_{*с.кр} = \sqrt{2mP_{*ном}(x_{*эк} + x_s)} = \sqrt{2 \cdot 0,9 \cdot 1(0,175 + 0,227)} = 0,85.$$

Напряжение в системе для исходного режима при $P_{*0} = mP_{*ном}$ и $Q_{*0} = P_{*0}x_s/(r_2/s) = 1 \cdot 0,9 \cdot 0,227/0,95 = 0,215$ (полагаем, что двигатель работает в

номинальным скольжением)

$$U_{*с0} = \sqrt{(U_{*ном}^2 + Q_{*0}x_{*эк})^2 + (P_{*0}x_{*эк})^2} = \sqrt{(1^2 + 0,215 \cdot 0,175)^2 + (0,9 \cdot 0,175)^2} = 1,05.$$

Запас статической устойчивости СЭС по активной мощности

$$K_{3P} = (P_{*max} - P_0) \cdot 100 / P_0 = (2,2 - 0,9) \cdot 100 / 0,9 = 144 \%,$$

а по напряжению

$$K_{3U} = (U_{*с0} - U_{*с.кр}) \cdot 100 / U_{*с0} = (1,05 - 0,85) \cdot 100 / 1,05 = 19 \%$$

При неизменной потребляемой активной мощности ($P_0 = const$) существенной переменной, которая отражает состояние узла нагрузки, является напряжение. В этом случае статическую устойчивость СЭС оцениваем по критерию $dQ/dU_c = -\infty$ на основе уравнений баланса реактивной мощности:

$$Q_{*л} = U_{*c}^2/x_{*л} = 0,357U_{*c}^2;$$

$$Q_{*с} = U_{*с}^2/(x_{*эк} + x_{*с}) / [(x_{*эк} + x_{*с})^2 + (r_2/s)^2] = 0,402U_{*с}^2/[0,402 + (r_2/s)^2];$$

$$Q_* = Q_{*л} + Q_{*с}.$$

Расчеты решения этих уравнений сведены в табл. 12.3, а графики зависимостей составляющих реактивной мощности от напряжения показаны на рис. 12.25, в.

Таблица 12.3. Результаты решения уравнений баланса реактивной мощности

s	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,095	0,1	0,2
r_2/s	0,95	0,63	0,475	0,38	0,37	0,27	0,24	0,21	0,2	0,19	0,095
I_*	0,973	1,19	1,38	1,54	1,56	1,83	1,94	2,07	2,12	2,18	3,08
$U_{*с}$	1,00	0,889	0,857	0,852	0,853	0,857	0,868	0,94	0,953	0,97	1,27
$Q_{*с}$	0,381	0,590	0,760	0,953	0,978	1,35	1,51	1,72	1,81	1,91	3,81
$Q_{*л}$	0,357	0,282	0,262	0,259	0,26	0,271	0,283	0,316	0,324	0,336	0,576
Q	0,738	0,872	1,02	1,21	1,24	1,63	1,77	2,04	2,13	2,25	4,39

Из рисунка следует, что критические параметры режима, соответствующие критерию $dQ/dU_c = -\infty$, следующие: $U_{*кр} = 0,85$ и $Q_{*кр} = 1,22$; при этом значение критического напряжения в системе совпадает со значением, вычисленным по критерию $dP/ds > 0$.

Пример 12.5. Определить предельное время отключения поврежденной цепи ЛЭП в СЭС, схема которой изображена на рис. 12.26, а, при трехфазном КЗ в начале линии.

Решение. Предельное время отключения трехфазного КЗ можно определить по предельному углу отключения, значение которого найдем по методу площадей. Для этого построим угловые характеристики мощности для нормального и послеаварийного режимов. В аварийном режиме при трехфазном КЗ мощность, передаваемая в сеть, равна нулю.

Схемы замещения СЭС для нормального и послеаварийного режимов показаны на рис. 12.26, б и в. Результирующие сопротивления в системе:

$$x_{*л} = x'_{*д} + x_{*тр1} + 0,5x_{*л} + x_{*тр2} = 0,183 + 0,142 + 0,312 + 0,117 = 0,754;$$

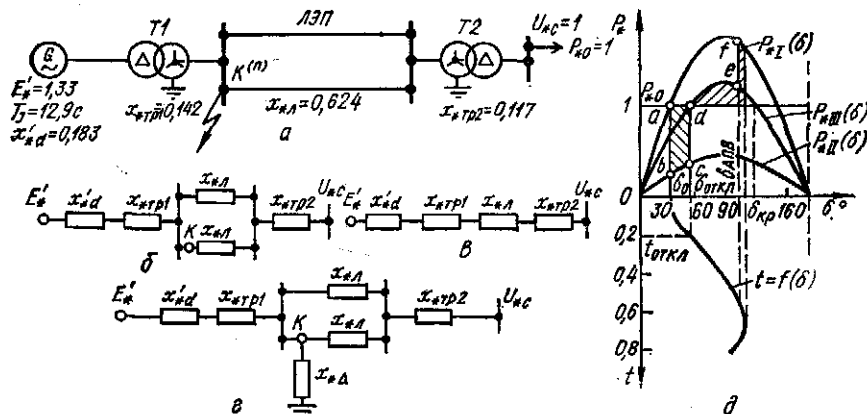


Рис. 12.26. К примерам 12.5 и 12.6

в послеаварийном режиме

$$x_{*III} = x_{*д} + x_{*тр1} + x_{*л} + x_{*тр2} = 0,183 + 0,142 + 0,624 + 0,117 = 1,066.$$

Угловые характеристики мощности:
в нормальном режиме

$$(P_{*I} = E'_* U_{*c} \sin \delta / x_{*I} = 1,33 \cdot 1 \sin \delta / 0,754 = 1,77 \sin \delta;$$

в послеаварийном режиме

$$P_{*III} = E'_* U_{*c} \sin \delta / x_{*III} = 1,33 \cdot 1 \sin \delta / 1,066 = 1,25 \sin \delta.$$

По характеристике нагрузки и угловым характеристикам мощности найдем:

угол между E'_* и U_{*c} в нормальном режиме

$$\delta_0 = \arcsin (P_{*0} / P_{*maxI}) = \arcsin (1 / 1,77) = 34,4^\circ;$$

критический угол в послеаварийном режиме

$$\delta_{кр} = \arcsin (P_{*0} / P_{*maxIII}) = \arcsin (1 / 1,25) = 126,9^\circ.$$

Предельный угол отклонения поврежденной цепи ЛЭП вычисляем по формуле (12.83) при $P_{*II} = 0$:

$$\begin{aligned} \delta_{откл.пред} &= \arccos \{ [P_{*0} (\delta_{кр} - \delta_0) + P_{*maxIII} \cos \delta_{кр}] / P_{*maxIII} \} = \\ &= \arccos \{ [1 (126,9 - 34,4) \pi / 180 + 1,25 \cos 126,9] / 1,25 \} = 46,5^\circ. \end{aligned}$$

Предельное время отключения трехфазного КЗ

$$\begin{aligned} t_{откл.пред} &= \sqrt{T_j (\delta_{откл.пред} - \delta_0) / (9000 P_{*0})} = \\ &= \sqrt{12,9 (46,5 - 34,4) / (9000 \cdot 1)} = 0,13 \text{ с.} \end{aligned}$$

Пример 12.6. Проверить динамическую устойчивость СЭС из предыдущего примера при переходящем двухфазном КЗ на землю в начале одной цепи ЛЭП с последующим трехфазным АПВ. Длительность КЗ $t_{КЗ} = 0,2$ с, продолжительность бестоковой паузы АПВ $t_{АПВ} = 0,4$ с. Параметры элементов системы в аварийном режиме:

$$\begin{aligned} x_{*2г} &= 0,142; \quad x_{*2тр1} = x_{*тр1} = x_{*0тр1}; \\ x_{*2тр2} &= x_{*0тр2} = x_{*тр2}; \quad x_{*2л} = x_{*л}; \quad x_{*0л} = 2,06. \end{aligned}$$

Решение. Оценим устойчивость СЭС при двухфазном КЗ по характеру изменения угла δ во времени. Эту зависимость рассчитаем методом последовательных интервалов.

Угловые характеристики мощности для нормального и послеаварийного режимов рассчитаны в примере 12.5. Определим угловую характеристику мощности системы в аварийном режиме.

Схема замещения СЭС для этого режима показана на рис. 12.26, г, где дополнительное сопротивление, обусловленное несимметрией, определяется через результирующее сопротивление обратного последовательности

$$\begin{aligned} x_{*2рез} &= (x_{*2г} + x_{*2тр1}) (0,5x_{*2л} + x_{*2тр2}) / (x_{*2г} + x_{*2тр1} + 0,5x_{*2л} + x_{*2тр2}) = \\ &= (0,142 + 0,142) (0,312 + 0,117) / (0,142 + 0,142 + 0,312 + 0,117) = 0,17 \end{aligned}$$

и результирующее сопротивление нулевой последовательности

$$\begin{aligned} x_{*0рез} &= x_{*0тр1} (0,5x_{*л} + x_{*0тр2}) / (x_{*0тр1} + 0,5x_{*л} + x_{*0тр2}) = \\ &= 0,142 (1,03 + 0,117) / (0,142 + 1,03 + 0,117) = 0,126 \end{aligned}$$

как

$$x_{*\Delta} = x_{*2рез} x_{*0рез} / (x_{*2рез} + x_{*0рез}) = 0,17 \cdot 0,126 / (0,17 + 0,126) = 0,072.$$

Взаимное сопротивление между рассматриваемыми точками системы в аварийном режиме

$$\begin{aligned} x_{*II} &= x'_{*д} + x_{*тр1} + 0,5x_{*л} + x_{*тр2} + (x'_{*д} + x_{*тр1}) (0,5x_{*л} + x_{*тр2}) / x_{*\Delta} = \\ &= 0,754 + (0,183 + 0,142) (0,312 + 0,117) / 0,072 = 2,66. \end{aligned}$$

Уравнение угловой характеристики мощности

$$P_{*II} = E'_* U_{*c} \sin \delta / x_{*II} = 1,33 \cdot 1 \sin \delta / 2,66 = 0,5 \sin \delta.$$

Рассчитаем зависимость $\delta = f(t)$, приняв длительность интервала $\Delta t = 0,1$ с, при которой постоянная

$$k = 18000 (\Delta t)^2 / T_j = 18000 \cdot 0,1^2 / 12,9 = 14.$$

Первый интервал. Угол δ_0 в момент возникновения КЗ остается неизменным, а мощность снижается до значения

$$P_{*(0)} = P_{*maxII} \sin \delta_0 = 0,5 \sin 34,4^\circ = 0,282.$$

Избыток мощности в начале первого интервала

$$\Delta P_{*0} = P_{*0} - P_{*(0)} = 1 - 0,282 = 0,718.$$

Приращение угла δ_1 в течение первого интервала

$$\Delta \delta_1 = k \Delta P_{*0} / 2 = 14 \cdot 0,718 / 2 = 5^\circ.$$

Угол δ_1 в конце первого интервала

$$\delta_1 = \delta_0 + \Delta \delta_1 = 34,4 + 5 = 39,4^\circ.$$

Второй интервал. Мощность генератора в конце первого интервала

$$P_{*1} = P_{*maxII} \sin \delta_1 = 0,5 \sin 39,4^\circ = 0,318.$$

Избыток мощности в начале второго интервала

$$\Delta P_{*1} = P_{*0} - P_{*1} = 1 - 0,318 = 0,682.$$

Приращение угла $\Delta \delta_2$ в течение второго интервала

$$\Delta \delta_2 = \Delta \delta_1 + k \Delta P_{*1} = 5 + 14 \cdot 0,682 = 14,5^\circ.$$

Угол δ_2 в конце второго интервала

$$\delta_2 = \delta_1 + \Delta \delta_2 = 39,4 + 14,5 = 53,9^\circ.$$

Третий интервал. В начале третьего интервала происходит отключение поврежденной цепи ЛЭП. Мощность генератора и избыток мощности до отключения поврежденной цепи

$$P'_{*2} = P_{*maxII} \sin \delta_2 = 0,5 \sin 53,9^\circ = 0,404;$$

$$\Delta P'_{*2} = P_{*0} - P'_{*2} = 1 - 0,404 = 0,596.$$

Мощность генератора и избыток мощности после отключения поврежденной цепи

$$P''_{*2} = P_{*maxIII} \sin \delta_2 = 1,25 \sin 53,9^\circ = 1,01;$$

$$\Delta P''_{*3} = P_{*0} - P''_{*2} = 1 - 1,01 = -0,01.$$

Приращение угла $\Delta \delta_3$ в третьем интервале

$$\Delta \delta_3 = \Delta \delta_2 + 0,5k (\Delta P'_{*2} + \Delta P''_{*2}) = 14,5 + 0,5 \cdot 14 (0,596 - 0,01) = 18,5^\circ.$$

Угол δ_3 в конце третьего интервала

$$\delta_3 = \delta_2 + \Delta \delta_3 = 53,9 + 18,5 = 72,4^\circ.$$

Расчет четвертого и пятого интервалов выполняем так же, как и расчет второго интервала, только мощность генератора уже вычисляем по угловой характеристике мощности послеаварийного режима.

В начале шестого интервала (при $t = t_{КЗ} + t_{АПВ} = 0,2 + 0,4 = 0,6$ с) срабатывает устройство АПВ: Расчет шестого интервала выполняем аналогично

Таблица 12.4. Результаты расчетов динамической устойчивости

t_c	δ , град	P_*	ΔP_*	$\Delta \delta$, град	Примечание
0	34,4	0,282	0,718	5	Расчет по $P_{*II}(\delta)$
0,1	39,4	0,318	0,682	14,5	То же
0,2	53,9	0,404	0,596	18,5	Переход с $P_{*II}(\delta)$ на $P_{*III}(\delta)$
		1,01	-0,01		
0,3	72,4	1,19	-0,19	15,8	Расчет по $P_{*III}(\delta)$
0,4	88,2	1,25	-0,25	12,3	То же
0,5	100,5	1,23	-0,23	9,1	—
0,6	109,1	1,18	-0,18	3,1	Переход с $P_{*III}(\delta)$ на $P_{*I}(\delta)$
		1,67	-0,67		
0,7	112,2	1,64	-0,64	-5,9	Расчет по $P_{*I}(\delta)$
0,8	106,3	—	—	—	То же

расчету третьего интервала, только используем угловые характеристики мощности послеаварийного и нормального режимов.

Последующие интервалы рассчитываем аналогично расчету второго интервала, только используем угловую характеристику мощности нормального режима.

Результаты расчетов сведены в табл. 12.4 и отражены на рис. 12.26, д. Полученные данные свидетельствуют о том, что динамическая устойчивость СЭС при двухфазном КЗ на землю с последующим трехфазным АПВ сохраняется. Без АПВ система не сохранила бы устойчивость, так как предельный угол отключения двухфазного КЗ на землю

$$\delta_{откл.пред} = \arccos \{ [P_{*0}(\delta_{кр} - \delta_0) + P_{*maxIII} \cos \delta_{кр} - P_{*maxII} \cos \delta_0] / (P_{*maxIII} - P_{*maxII}) \} =$$

$$= \arccos \{ [1(126,9 - 34,4) \pi / 180 + 1,25 \cos 126,9^\circ - 0,5 \cos 34,4^\circ] / (1,25 - 0,5) \} = 53^\circ,$$

а при фактической длительности КЗ $t_{КЗ} = 0,2$ с угол отклонения КЗ больше и равен $53,9^\circ$ (см. табл. 12.4).

Пример 12.7. Определить предел передаваемой мощности и запас статической устойчивости СЭС, расчетная схема которой показана на рис. 12.27, а. Эквивалентный генератор системы оснащен устройством АРВ по отклонению напряжения. коэффициентом усиления $K_U = 30$.

Сравнить достигаемый предел передаваемой мощности с его значениями при упрощенном учете АРВ (схема замещения генератора с $E'_q = \text{const}$ и x'_d), а также без АРВ (схема замещения генератора с $E_q = \text{const}$ и x_d).

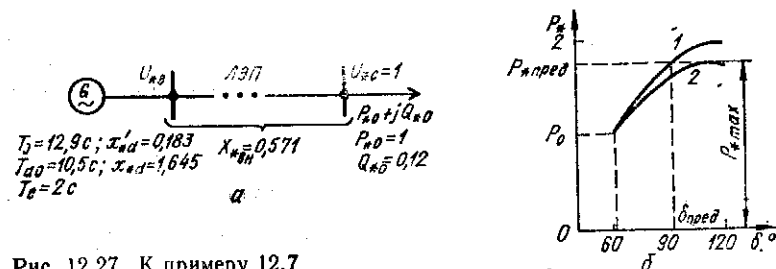


Рис. 12.27. К примеру 12.7

Решение. Определяем исходные параметры схемы замещения СЭС. Реактивные сопротивления

$$X_{*d} = x'_{*d} + X_{*вн} = 1,645 + 0,571 = 2,216;$$

$$X'_{*d} = x'_{*d} + X_{*вн} = 0,183 + 0,571 = 0,754.$$

Постоянная времени

$$T'_d = T_{d0} X'_{*d} / X_{*d} = 10 \cdot 0,754 / 2,216 = 3,57 \text{ с.}$$

Значение э. д. с. за синхронным сопротивлением

$$E_{*q0} = \sqrt{(U_{*c}^2 + Q_{*0} X_{*d})^2 + (P_{*0} X_{*d})^2} / U_{*c} = \sqrt{(1^2 + 0,12 \cdot 2,216)^2 + (1 \cdot 2,216)^2} / 1 = 2,55.$$

Угол между э. д. с. генератора E_{*q0} и напряжением в системе U_{*c}

$$\delta_0 = \arcsin (P_{*0} X_{*d} / (E_{*q0} U_{*c})) = \arcsin (1 \cdot 2,216 / (2,55 \cdot 1)) = 60,2^\circ.$$

Напряжение генератора U_{*c0} по формуле (12.112, б)

$$U_{*r0} = E_{q0} X_{*вн} / X_{*d} + U_{*c} \cos \delta (X_{*d} - X_{*вн}) / X_{*d} = 2,55 \cdot 0,571 / 2,216 + 1 \cos \delta (2,216 - 0,571) / 2,216 = 1,027.$$

Синхронное значение э. д. с. с учетом коэффициента усиления напряжения по формуле (12.132)

$$E_{*q} = [E_{*q0} + K_U (U_{*r0} - U_{*c} \cos \delta (X_{*d} - X_{*вн}) / X_{*d})] / (1 + K_U X_{*вн} / X_{*d}) = [2,55 + 30 (1,027 - 1 \cos \delta (2,216 - 0,571) / 2,216)] / (1 + 30 \cdot 0,571 / 2,216) = 3,84 - 2,54 \cos \delta.$$

Составляем уравнение угловой характеристики мощности СЭС:

$$P = E_{*q} U_{*c} \sin \delta / X_{*d} = (3,84 - 2,54 \cos \delta) \cdot 1 \sin \delta / 2,216 = 1,73 \sin \delta - 0,573 \sin 2\delta.$$

Таблица 12.5. Результаты расчета угловой характеристики мощности СЭС

δ , град	75	90	105	120
E_{*q}	3,18	3,84	4,50	5,12
P_*	1,39	1,73	1,96	2,0
$P_{*упр}$	1,31	1,59	1,75	1,75

Результаты расчета угловой характеристики мощности СЭС приведены в табл. 12.5, а ее график изображен на рис. 12.27, б (кривая 1).

Чтобы найти предельное значение угла перемещения ротора генератора $\delta_{пред}$ соответствующего условию сохранения устойчивости СЭС, воспользуемся уравнением (12.134), но предварительно рассчитаем входящие в него коэффициенты c_1 , c_2 и c_3 :

$$c_1 = U_{*c}^2 [K_U (T'_d + T_e) (X_{*d} - X_{*вн}) / (X_{*d} (X_{*d} + X_{*вн} K_U)) + T'_{*d} (X_{*d} - X'_{*d}) / (X_{*d} X'_{*d})] = 1 [30 (3,57 + 2) (2,216 - 0,571) / (2,216 (2,216 - 0,571 \cdot 30)) + 3,57 (2,216 - 0,754) / (2,216 \cdot 0,754)] = 9,55;$$

$$c_2 = -U_{*c} (T'_d + T_e) (E_{*q0} + K_U U_{*r0}) / (X_{*d} + X_{*вн} K_U) = -1 (3,57 + 2) (2,55 + 30 \cdot 1,027) / (2,216 + 0,571 \cdot 30) = -9,6;$$

$$c_3 = -U_{*c}^2 T'_d (X_{*d} - X'_{*d}) (X_{*d} X'_{*d}) + T_J (T'_d + T_e) / (T_e^2 \omega_0 ((1 + T_e (X_d - X_{вн}) X'_d / (T'_d (X'_d - X_{вн}) X_d) (X'_d - X_{вн}) K_U / (X_d - X_{вн}) - 1)) = -1^2 \cdot 3,57 (2,216 - 0,754) / (2,216 \cdot 0,754 + 12,9 (3,57 + 2) / (2^2 \cdot 314 ((1 + 2 (2,216 - 0,571) \cdot 0,754 / 3,57 (0,754 - 0,571) \cdot 2,216)) (0,754 - 0,571) \cdot 30 / (2,216 - 0,571 - 1))) = -0,522.$$

После этого уравнение (12.134) примет вид

$$9,55 \cos^2 \delta_{пред} - 9,6 \cos \delta_{пред} - 0,522 = 0,$$

откуда

$$\cos \delta_{пред} = -0,052 \text{ и } \delta_{пред} = \arccos(-0,052) = 93^\circ.$$

По графику угловой характеристики мощности СЭС (рис. 12.27, б) находим предельную мощность по условию статической устойчивости $P_{*пред} = 1,77$.

Запас статической устойчивости СЭС

$$K_{зр} = (P_{*пред} - P_{*0}) \cdot 100 / P_{*0} = (1,77 - 1) \cdot 100 / 1 = 77 \%$$

При упрощенном учете АРВ согласно (12.111, б) переходная э. д. с. в исходном режиме

$$E'_{*q0} = E_{*q0} X'_{*d} / X_{*d} + U_{*c} \cos \delta_0 (X_{*d} - X'_{*d}) / X_{*d} = 2,55 \cdot 0,754 / 2,216 + 1 \cos 60,2^\circ (2,216 - 0,754) / 2,216 = 1,197,$$

а уравнение угловой характеристики мощности в соответствии с (12.127)

$$P_{*упр} = E'_{*q0} U_{*c} \sin \delta / X_{*d} - U_{*c}^2 \sin 2\delta (X_{*d} - X'_{*d}) / (2 X_{*d} X'_{*d}) = 1,197 \cdot 1 \sin \delta / 0,754 - 1^2 \sin 2\delta (2,216 - 0,754) / (2 \cdot 2,16 \cdot 0,754) = 1,59 \sin \delta - 0,44 \sin 2\delta.$$

Результаты расчета характеристики $P_* = f(\delta)$ приведены в табл. 12.5, а ее график показан на рис. 12.27, б (кривая 2). Из графика следует, что предел передаваемой мощности $P_{*max} = 1,79$, а запас статической устойчивости СЭС

$$K_{зр} = (1,79 - 1) \cdot 100 / 1 = 79 \%$$

При отсутствии АРВ генератора предел передаваемой мощности

$$P_{*max} = E_{*q0} U_{*c} / X_{*d} = 2,55 \cdot 1 / 2,216 = 1,15,$$

а запас статической устойчивости СЭС

$$K_{зр} = (1,15 - 1) \cdot 100 / 1 = 15 \%$$

Таким образом, упрощенный учет АРВ дает допустимую для практических расчетов погрешность (завышение запаса статической устойчивости на 2 %). АРВ генератора по отклонению напряжения повышает предел статической устойчивости СЭС на 62 %.

Контрольные вопросы

1. Каковы упрощенные математические описания — уравнения движения — основных элементов СЭС: синхронных машин, асинхронных двигателей, рабочих механизмов, электрической сети и узлов нагрузки?
2. На чем основывается применение практических критериев устойчивости СЭС?
3. Каково содержание оценки статической устойчивости СЭС по практическим критериям? В чем суть принимаемых допущений?
4. Почему практические критерии устойчивости СЭС не являются универсальными?
5. Какие из практических критериев устойчивости используются при анализе характерных схем СЭС?
6. В чем состоит линеаризация нелинейных уравнений по первому приближению и какова цель ее применения?
7. Что является необходимым и достаточным условием устойчивости и какими математическими критериями используются для оценки условий статической устойчивости СЭС?
8. В чем суть применения критериев Гурвица, Рауса, Михайлова и кривых D-разбиения для оценки статической устойчивости СЭС?
9. Какие допущения положены в основу упрощенных методов оценки динамической устойчивости СЭС?
10. В чем заключается задача анализа динамической устойчивости СЭС?
11. Как определить предельные угол и время отключения КЗ?
12. Как оценивается динамическая устойчивость СЭС по изменению угла δ во времени?
13. Как проверить динамическую устойчивость СЭС при восстановлении исходного режима путем АРВ?
14. Каковы особенности анализа динамической устойчивости СЭС при наличии в ней нескольких источников?
15. Что понимается под проблемой искусственной устойчивости СЭС?
16. Какие существуют типы устройств АРВ и какова область их применения?
17. Каковы причины возникновения асинхронных режимов работы синхронных машин?
18. Какова суть процесса ресинхронизации синхронных генератора и двигателя?
19. По каким достаточным условиям можно оценить возможность втягивания в синхронизм двигателей?

Темы рефератов

1. Оценка статической устойчивости СЭС по практическим критериям и методу малых колебаний.
2. Совмещение расчетов нормального режима работы СЭС и его статической устойчивости.
3. Оценка динамической устойчивости СЭС с двусторонним питанием.
4. Анализ динамической устойчивости СЭС на основе уточненных методов.
5. Влияние АРВ на предел мощности генератора, передаваемой в сеть.
6. Условия успешной ресинхронизации синхронных машин.
7. Способы ресинхронизации синхронных двигателей технологических установок.

Глава 13

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УЗЛОВ НАГРУЗКИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

13.1. Представление нагрузки при расчетах устойчивости систем электроснабжения

Узлами нагрузки называются точки СЭС, в которых происходят отбор и распределение мощности для питания групп потребителей электрической энергии (электродвигатели, осветительные установки, печи, конденсаторные установки и др.) с различными конструктивными характеристиками и режимами работы.

При расчетах устойчивости СЭС в зависимости от особенностей решаемой задачи нагрузки могут представляться в схемах замещения различными расчетными моделями. Полнота математического описания электрической нагрузки оказывает существенное влияние на результаты расчетов электромеханических переходных процессов. При определении полноты учета нагрузки исходят из необходимости обеспечения требуемой точности конечных результатов, стремления сократить объемы исходной информации и вычислений.

На режим электропотребления и на устойчивость узлов нагрузки СЭС оказывают влияние состав электроприемников и их параметры. Наиболее широкое распространение в СЭС получили следующие характерные группы электроприемников:

1. *Силовые общепромышленные установки.* К ним относятся компрессоры, вентиляторы, насосы, подъемно-транспортные устройства. Электродвигатели компрессоров, вентиляторов и насосов работают, как правило, в продолжительном режиме и изготавливаются мощностью от нескольких сот ватт до тысяч киловатт на напряжение от 0,22 до 10 кВ. Перерывы в электроснабжении и нарушения устойчивости могут повлечь за собой опасность для жизни людей, серьезные нарушения технологического процесса или повреждение оборудования. В электроприводе мощных насосов, компрессоров и вентиляторов применяют главным образом синхронные двигатели, работающие с опережающим коэффициентом мощ-

ности. Подъемно-транспортные устройства работают в повторно-кратковременном режиме, для которого характерны резкие изменения (толчки) нагрузки.

2. *Электродвигатели производственных механизмов.* Этот вид электрической нагрузки встречается на всех промышленных предприятиях. В электроприводе современных станков применяются как синхронные, так и асинхронные двигатели. Мощность их чрезвычайно разнообразна и изменяется от долей до сотен киловатт и больше. Нередко применяются электродвигатели постоянного тока в сочетании с выпрямительными установками. Нарушения электроснабжения или устойчивости такой нагрузки приводят обычно к экономическому ущербу.

3. *Электрические осветительные установки.* Они представляют собой однофазную нагрузку, создающую несимметрию параметров СЭС. Однако путем равномерного распределения этой нагрузки между фазами достигают устранения возможной несимметрии. Осветительная нагрузка характеризуется отсутствием резких изменений и зависит от географического местонахождения объектов освещения, времени года и суток.

4. *Преобразовательные установки.* Предназначены для преобразования трехфазного тока в постоянный или в трехфазный либо в однофазный ток пониженной либо повышенной по сравнению с 50 Гц частоты. Преобразовательные установки бывают различных типов и служат для питания двигателей ряда машин и механизмов, электролизных ванн, внутрипромышленного электрического транспорта, электрофильтров, электросварочных и индукционных установок и др. Мощность преобразовательных устройств для внутрипромышленного электрического транспорта (откатка, подъем, различные виды перемещения грузов) находится в пределах от сотен до тысяч киловатт. Нарушение устойчивости режимов питания приемников этой группы вызывает серьезные технологические осложнения в работе предприятий и значительные экономические ущербы.

5. *Электротехнологические установки.* Потребители этой группы делятся на электротермические, электросварочные, электролизные, электрофизической и электромеханической обработки, электроаэрозольной технологии. Режимы работы электротехнологических установок оказывают существенное влияние на устойчивость СЭС [10], что предопределяет необходимость учета их в расчетах переходных процессов.

Резкопеременные режимы работы дуговых печей прямого нагрева для плавки стали и электросварочных установок вызывают колебания напряжения и влияют на устойчивость работы светотехнических устройств, радио- и телевизионной аппаратуры, вычислительной техники и др. Такие режимы могут вызывать ложное срабатывание средств защиты и автоматики, а также нарушение устойчивости синхронных и асинхронных двигателей.

При нелинейной нагрузке, когда к узлу подключены вентильные преобразователи электролиза, индукционные и другие установ-

ки, в сети генерируются высшие гармоники тока, перегружаются конденсаторные батареи. Это приводит к появлению дополнительных потерь мощности в элементах СЭС и к снижению запаса ее статической и динамической устойчивости. Аналогичными последствиями характеризуется также несимметричная нагрузка электрошлаковых печей, электросварочных и индукционных установок.

Использование на промышленных предприятиях полупроводниковых преобразователей, дуговых печей прямого нагрева для плавки стали, электросварочных установок вызывает большую потребность в реактивной мощности. Поэтому при анализе электро-механических переходных процессов необходимо учитывать влияние реактивной мощности на устойчивость узлов электрических нагрузок.

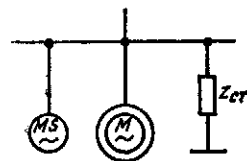


Рис. 13.1. Состав простейшего узла нагрузки

Применение разнообразных потребителей электрической энергии, характеризующихся различной степенью воздействия на режимы электропотребления, требует всестороннего анализа и учета свойств электроприемников в процессе проектирования и эксплуатации СЭС. При этих условиях представляется возможным определить влияние нагрузки на устойчивость СЭС и выбрать наиболее экономичные способы и средства ее повышения.

В практике исследования электро-механических переходных процессов используют комплексные расчетные модели нагрузки, которые описывают простейшую одноузловую схему (рис. 13.1). Эти модели позволяют воспроизвести основные особенности переходных процессов в электродвигателях и учесть влияние других электроприемников. Комплексные расчетные модели нагрузки включают в себя уравнения эквивалентных асинхронного и синхронного двигателей, а также статической нагрузки.

Под *статической нагрузкой* $z_{ст}$ понимают нагрузку, создаваемую электроприемниками, в которых отсутствует вращающееся магнитное поле: электрическое освещение, электропечи и другие электротехнологические установки, а также коммунально-бытовые приборы. К статической нагрузке относятся также конденсаторные батареи, емкость ВЛ и КЛ, индуктивные и активные сопротивления элементов сети, которые создают потери в сопротивлениях, потери на намагничивание трансформаторов, рассеяние и др. Значение $z_{ст}$ в общем случае зависит от напряжения.

Что касается двигательной нагрузки, то она математически описывается по-разному в зависимости от числа электродвигателей, входящих в состав узла нагрузки [27]:

1) в узлах нагрузки с малым числом электродвигателей каждый из них учитывается своими уравнениями и параметрами движения и непосредственно вводится в расчет;

2) в узлах нагрузки, включающих в себя группы различных электродвигателей, относящихся к одному производству, группы заменяются небольшим числом эквивалентных электродвигателей

с параметрами, которые рассчитываются по определенным правилам на основании данных о реальных двигателях;

3) крупные узлы нагрузки описываются с использованием ряда конкретных данных о составе нагрузки и параметрах питающей сети, а также исходной информации, полученной в результате вероятностно-статистического анализа.

При расчетах устойчивости крупных узлов нагрузки одним из важных факторов является взаимное влияние электродвигателей, причем точность расчетов практически не снижается, если в уравнения, описывающие каждый электродвигатель, ввести ряд упрощений. Например, можно пренебречь потерями в статоре электродвигателя и считать потребляемую из сети активную мощность равной электромагнитной мощности двигателя. При постоянной частоте питающего напряжения эта мощность пропорциональна вращающему моменту двигателя. Все виды механических потерь можно относить к приводному механизму. Можно вообще исключить из рассмотрения ряд составляющих переходного процесса синхронных и, главным образом, асинхронных двигателей.

При таких упрощениях уравнения движения электродвигателей, используемые при описании крупных узлов нагрузки, могут отличаться от уравнений, по которым рассчитываются электро-механические переходные процессы в одиночных электродвигателях. Однако это не вносит существенных погрешностей в конечные результаты инженерных расчетов устойчивости нагрузки СЭС.

Для повышения точности расчетов за счет более детального учета всех основных особенностей потребителей и распределительной сети применяют многоэлементные комплексные модели. В зависимости от поставленной задачи и структуры нагрузки расчетная схема нагрузки может содержать различное число узлов, электродвигателей и других потребителей. Чем меньше протяженность распределительной сети и чем больше однородность нагрузки, тем проще ее расчетная модель.

Иногда нагрузку моделируют в виде постоянного сопротивления $r + jx$, что упрощает расчеты, но приводит к существенным погрешностям.

Большинство методик расчетов электро-механических переходных процессов в СЭС основывается на использовании статических и динамических характеристик нагрузки.

13.2. Статические и динамические характеристики нагрузки

При исследовании устойчивости нагрузки СЭС необходимо располагать статическими и динамическими характеристиками основных потребителей электрической энергии. Вид характеристик нагрузки определяется параметрами электроприемников, а также влиянием потерь мощности и напряжения в элементах распределительной сети.

Статические характеристики нагрузки представляют собой зависимости между параметрами режима при медленных изменениях процессов, например зависимости $P = f(\delta)$ для синхронных и $P = f(s)$ для асинхронных двигателей. Узлы нагрузки характеризуются обычно статическими характеристиками в виде зависимостей потребляемых активной P и реактивной Q мощностей от медленно изменяющегося напряжения U . Графическое изображение этих характеристик показано на рис. 13.2. Форма их зависит от вида нагрузки (лампы накаливания, асинхронные и синхронные двигатели, электрические печи и др.). Для сравнения статические характеристики

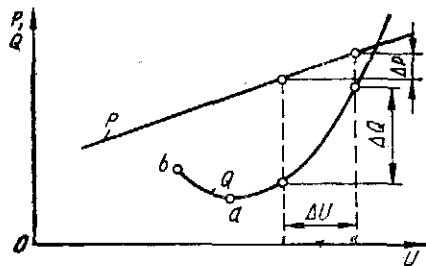


Рис. 13.2. Статические характеристики узла нагрузки

некоторых потребителей изображены на рис. 13.3.

В аналитических расчетах статические характеристики часто аппроксимируются полиномами вида

$$\left. \begin{aligned} P &= 1 - a_P - b_P U + a_P U^2 + b_P U^3; \\ Q &= 1 - a_Q - b_Q U + a_Q U^2 + b_Q U^3; \end{aligned} \right\} \quad (13.1)$$

где a_P, b_P, a_Q, b_Q — постоянные коэффициенты.

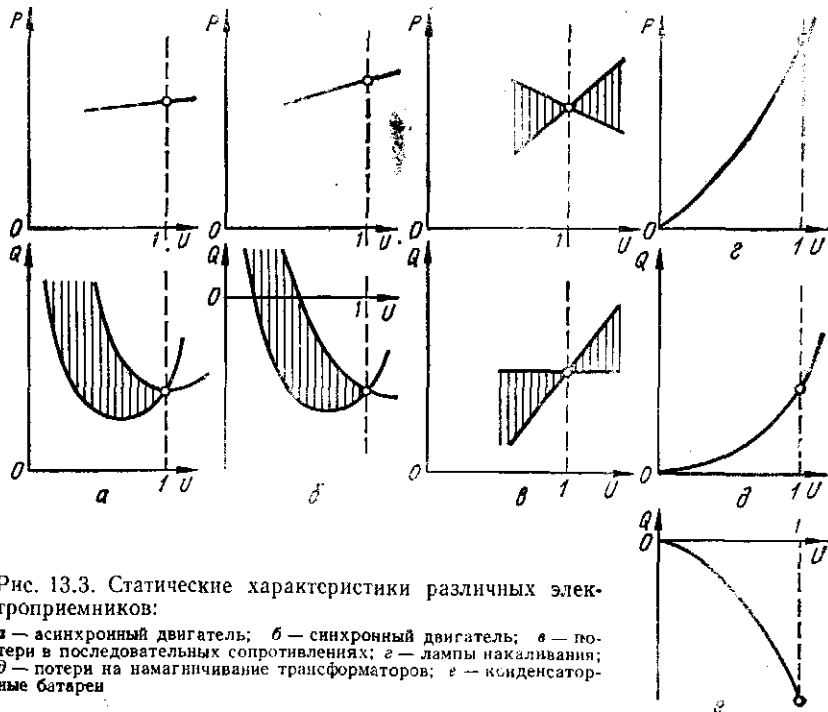


Рис. 13.3. Статические характеристики различных электроприемников:

а — асинхронный двигатель; б — синхронный двигатель; в — потери в последовательных сопротивлениях; г — лампы накаливания; д — потери на намагничивание трансформаторов; е — конденсаторные батареи

Аналитические зависимости (13.1) и графические представления нагрузок (см. рис. 13.2 и 13.3) достаточно точно отражают их изменения только при установившихся режимах, наступающих через десятки секунд после изменения напряжения.

Последнее условие важно иметь в виду при выполнении расчетов с последовательным изменением параметров режима или свойств СЭС. Если период времени между рассматриваемыми режимами измеряется минутами, то существенными могут оказаться дополнительные изменения нагрузки, вызываемые как случайными факторами, так и действиями обслуживающего персонала на подстанциях, в результате переключения ответвлений трансформаторов, изменения тока возбуждения синхронных двигателей и компенсаторов.

При анализе переходных процессов в узлах нагрузки необходимо учитывать влияние регулирующих устройств. Если зоной нечувствительности и дискретностью регулирования трансформаторов с РПН пренебречь, то напряжение на шинах электроприемников можно считать неизменным, а активную нагрузку в этом диапазоне практически постоянной. Реактивная мощность узла нагрузки представляет собой сумму реактивной нагрузки потребителей и потерь в трансформаторах с РПН, зависящих от напряжения в узле. Если потери невелики, то в рассматриваемом диапазоне реактивная мощность также почти постоянна.

При расчетах статической устойчивости СЭС обычно пользуются типовыми статическими характеристиками комплексной нагрузки, составляемыми проектными организациями для определенных групп потребителей СЭС.

При расчетах динамической устойчивости СЭС нагрузку также можно описывать статическими характеристиками. Однако это приводит к заметным погрешностям, поскольку зависимости мощности от напряжения в переходном и установившемся режимах разные. Так, при возникновении КЗ напряжение снижается практически мгновенно. По мере изменения питающего напряжения и скольжения двигателей в режиме КЗ изменяется также мощность, а при отключении КЗ возникает новый скачок активной и реактивной мощностей. Такие процессы можно представить в координатах P, U и Q, U динамическими характеристиками, описывающими изменение указанных параметров во времени.

Динамические характеристики нагрузки определяются не только параметрами нагрузки, но и параметрами СЭС и режимами всей ЭЭС. Разница между статическими и динамическими характеристиками дает ту погрешность, которая возникает при использовании статических характеристик в расчетах динамической устойчивости СЭС.

Изменение скольжения асинхронного двигателя приводит к резкому изменению его эквивалентного сопротивления, что вызывает изменение токов статора и ротора, а также перераспределение той части электромагнитной энергии, которая при установившемся скольжении преобразовывалась в механическую. При этом часть

ее тратится на изменение запаса энергии в индуктивностях электродвигателя. Появляется запаздывание в изменении динамических моментных характеристик по отношению к характеристикам при медленных изменениях режима (статическим характеристикам). Динамика наброса и сброса нагрузки показана на рис. 13.4, где цифрой 1 обозначена статическая характеристика асинхронного двигателя в нормальном режиме, цифрой 2 — динамическая характеристика при набросе нагрузки, а цифрой 3 — динамическая характеристика при сбросе нагрузки.

Из рис. 13.4 следует, что электромагнитный момент двигателя по динамической характеристике изменяется с некоторым запаздыванием по отношению к статической характеристике.

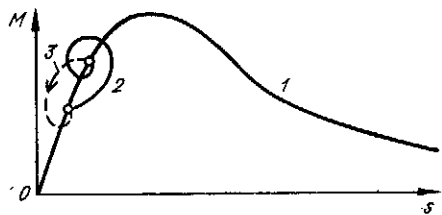


Рис. 13.4. Характеристики асинхронного двигателя

Значения величин, характеризующих скольжение асинхронного двигателя, а также условия устойчивости и изменение его тока, отличаются от значений этих же величин, определенных применительно к статической характеристике двигателя. Приблизительно считают, что погрешность в оценке изменения скольжения обратно пропорциональна механической постоянной инерции электродвигателя T_J и прямо пропорциональна квадрату сброса или наброса нагрузки. Так, погрешность в определении скольжения маломощных электродвигателей ($T_J = 0,5 \div 1$ с) достигает 10—30 % через 0,1—0,3 с после наброса нагрузки, а для мощных электродвигателей ($T_J = 8 \div 10$ с) она находится в пределах точности расчетов.

При учете динамических характеристик синхронных двигателей следует учитывать ту особенность, что резкие изменения режима их работы вызывают появление свободных токов, поддерживающих результирующее потокосцепление обмотки возбуждения неизменным.

Развиваемая синхронным двигателем максимальная мощность определяется при $t = 0$ по его угловой характеристике $P = f(\delta)$, построенной для $E'_q = \text{const}$. Пусть при $t = t_0$ и $\delta = \delta_0$ происходит мгновенный наброс мощности от P_0 до P_1 (рис. 13.5, а). В этом случае переходный процесс описывается характеристикой $P_I(\delta)$, изображенной на рис. 13.5, б.

Качания двигателя определяются участком угловой характеристики мощности и соответствующими площадями ускорения и торможения на нем. Изменение угла δ во времени изображается кривой, показанной на рис. 13.5, в.

Если имеет место затухание э. д. с. E'_q (рис. 13.6, а), то процесс изменения угла δ определяется не характеристикой ab , а характеристикой ab' (см. рис. 13.5, б и 13.6, б).

Таким образом, при расчете устойчивости синхронных двигателей следует иметь в виду, что допущение $E'_q = \text{const}$ справедли-

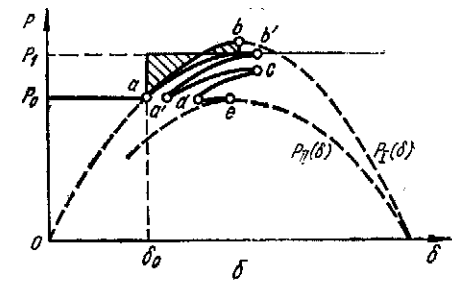
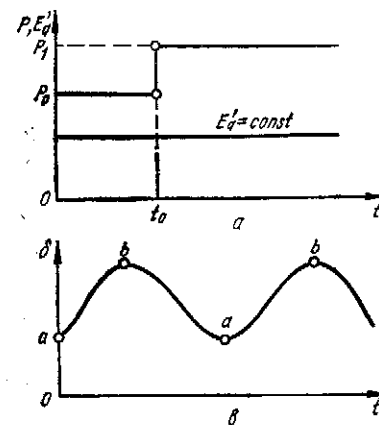


Рис. 13.5. Наброс нагрузки на синхронный двигатель при постоянстве э. д. с. E'_q (а), его угловые характеристики мощности при набросе нагрузки (б) и характер изменения угла δ (в)

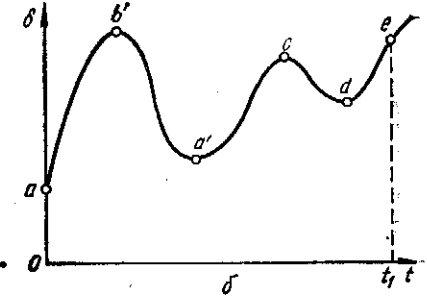
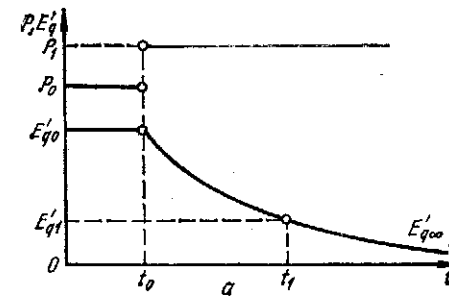


Рис. 13.6. Наброс нагрузки на синхронный двигатель при затухании э. д. с. E'_q (а) и характер изменения угла δ (б)

во только в течение малого интервала времени $\Delta t < T_J$ и может привести к ошибкам в оценке характера переходного процесса.

Если э. д. с. E'_q в процессе своего затухания уменьшится так, что при E'_q максимальное значение $P_{I\max}(\delta)$ [точка e на характеристике $P_{II}(\delta)$, см. рис. 13.5, б] будет меньше P_1 , то устойчивость электродвигателя через время t_1 нарушится.

13.3. Влияние нагрузки на статическую устойчивость системы электроснабжения

При определении предела мощности, передаваемой в простейшей электрической системе, предполагалось, что напряжение на шинах приемной системы постоянно при всех изменениях режима работы электропередачи. Такое предположение можно считать справедливым только в том случае, когда мощность питающей системы в 8—10 раз больше мощности приемной системы. Однако приемная система может представлять собой местную электростанцию (рис. 13.7), мощность которой соизмерима с мощностью питающей

системы. В этих случаях напряжение на шинах приемной системы зависит от режима работы питающей системы и нагрузки.

Если считать, что э. д. с. генераторов станций питающей системы постоянна, то при изменении передаваемой по ЛЭП мощности будут меняться углы δ_1 и δ_2 , а также угол $\delta_{12} = \delta_1 - \delta_2$. Это, в свою очередь, вызовет изменение напряжения на шинах приемной системы. При увеличении передаваемой по ЛЭП мощности это напряжение падает, что вызывает уменьшение предела передаваемой мощности $P = EU/x_{рез}$. Зависимость $P(\delta)$ в данном случае может быть представлена кривой 2 (рис. 13.8) в отличие от идеальной

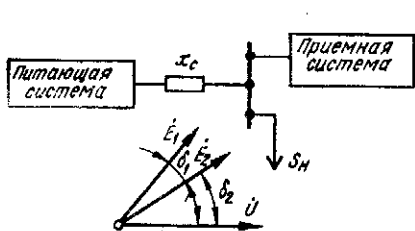


Рис. 13.7. К объяснению влияния нагрузки на устойчивость электрической системы

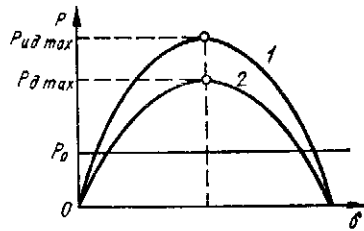


Рис. 13.8. Идеальная (1) и действительная (2) угловые характеристики мощности электрической системы

характеристики 1, когда E и U постоянны. Чем больше снижается напряжение на шинах приемной системы при увеличении передаваемой мощности, тем меньше действительный предел мощности.

Степень снижения напряжения на шинах приемной системы зависит от свойств нагрузки, подключенной к этим шинам. Влияние свойств нагрузки на напряжение приемной системы определяется *регулирующим эффектом нагрузки*, под которым понимают явление изменения активной и реактивной мощностей, потребляемых нагрузкой при изменении напряжения на ее зажимах. Следовательно, регулирующим эффектом нагрузки можно назвать степень снижения активной и реактивной мощностей нагрузки с уменьшением напряжения на ее зажимах.

Численно регулирующий эффект определяется как изменение активной или реактивной мощности нагрузки на единицу изменения напряжения (см. рис. 13.2):

$$a_p = \Delta P / \Delta U; \quad a_q = \Delta Q / \Delta U. \quad (13.2)$$

Если рассматривать бесконечно малые изменения напряжения и перейти к пределам, то

$$a_p = dP/dU; \quad a_q = dQ/dU. \quad (13.3)$$

Поскольку в большинстве случаев при расчетах устойчивости учитывают только реактивные сопротивления элементов схемы, на снижение напряжения при увеличении передаваемой мощности главным образом влияет регулирующий эффект по реактивной мощности. При этом, чем больше наклон статических характеристик

в рабочей области, тем сильнее регулирующий эффект нагрузки, тем благоприятнее влияет она на устойчивость электропередачи.

Однако этим не ограничивается влияние нагрузки на устойчивость режима работы системы. Повышение потребляемой реактивной мощности на участке ab статической характеристики (см. рис. 13.2), обусловленное увеличением скольжения асинхронных двигателей при дефиците реактивной мощности в системе, приводит к лавинообразному снижению напряжения, сопровождающемуся затормаживанием двигателей. Следовательно, нарушение устойчивости узла нагрузки может являться причиной нарушения устойчивости режима всей СЭС.

13.4. Расчет статической устойчивости по действительному пределу мощности

Построение действительной угловой характеристики мощности с помощью статических характеристик узлов нагрузок связано с большим объемом вычислений. Поэтому действительный предел мощности допускается определять упрощенным способом. Для этого полную мощность нагрузки электрической системы S_H (рис. 13.9 а), представляют в виде постоянного сопротивления

$$|z_H| = U^2 / S_H. \quad (13.4)$$

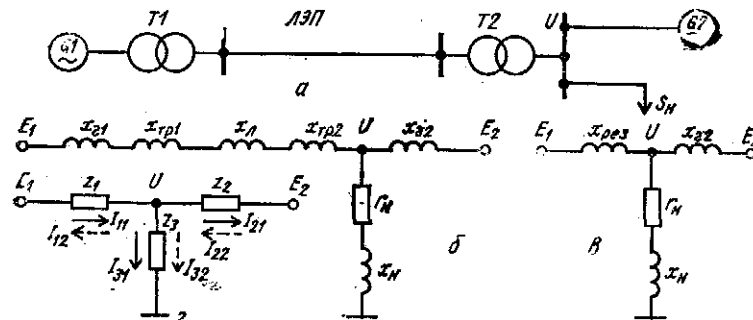


Рис. 13.9. Схема электрической системы (а), промежуточные (б, в) и окончательная (г) схемы ее замещения

Активная и реактивная составляющие этого сопротивления определяются выражениями

$$r_H = (U^2 / S_H) \cos \varphi_H; \quad x_H = (U^2 / S_H) \sin \varphi_H. \quad (13.5)$$

Промежуточные схемы замещения электрической системы изображены на рис. 13.9, б и в. После введения обозначений

$$z_1 = jx_{рез}; \quad z_2 = jx_{r2}; \quad z_3 = r_H + jx_H \quad (13.6)$$

схема замещения системы принимает окончательный вид, показанный на рис. 13.9, г.

Мощность, генерируемую станцией с э. д. с. E_1 в систему в зависимости от угла δ , а также действительный режим работы ЛЭП найдем наложением токов и напряжений двух режимов работы системы: 1) $E_1 \neq 0, E_2 = 0$; 2) $E_1 = 0, E_2 \neq 0$. Токи в этих режимах обозначены на рис. 13.9, z соответственно сплошными и штриховыми стрелками.

Действительный ток генератора определяется выражением

$$I_1 = I_{11} - I_{12}, \quad (13.7)$$

а его составляющие — выражениями

$$I_{11} = \dot{E}_1/z_{11}; \quad I_{12} = \dot{E}_2/z_{12}, \quad (13.8)$$

где z_{11}, z_{12} — собственное и взаимное сопротивления.

Собственные сопротивления в системе соответствуют значению и фазе тока источника при отсутствии э. д. с. других источников, взаимные сопротивления — значению и фазе тока в цепи данного источника, обусловленного э. д. с. другого источника. Для рассматриваемой схемы замещения имеем

$$z_{11} = z_1 + z_2 z_3 / (z_2 + z_3); \quad z_{22} = z_2 + z_1 z_3 / (z_1 + z_3); \quad (13.9)$$

$$z_{12} = z_{21} = z_1 + z_2 + z_1 z_2 / z_3. \quad (13.10)$$

Для определения мощности S нужно знать напряжение U , ток I и разность фаз между ними $\varphi = \psi_U - \psi_I$. При этом

$$\begin{aligned} \dot{S}_1 = P_1 + jQ_1 &= \dot{E}_1 \hat{I} = \dot{E}_1 (\hat{E}_1 / \hat{z}_{11} - \hat{E}_2 / \hat{z}_{12}) = \\ &= \dot{E}_1 \hat{E}_1 / \hat{z}_{11} - \dot{E}_1 \hat{E}_2 / \hat{z}_{12}. \end{aligned} \quad (13.11)$$

При совмещении вектора \dot{E}_2 с осью вещественных чисел его фазовый угол равен нулю, а фазовый угол э. д. с. \dot{E}_1 равен углу сдвига фаз δ_{12} между \dot{E}_1 и \dot{E}_2 . В этом случае

$$\dot{E}_2 = E_2; \quad \dot{E}_1 = E_1 \exp(j\delta_{12}). \quad (13.12)$$

Если фазовые углы собственных и взаимных сопротивлений обозначить соответственно через ψ_{11}, ψ_{22} и ψ_{12} , то

$$\begin{aligned} \psi_{11} &= \arctg(x_{11}/r_{11}); \quad \psi_{22} = \arctg(x_{22}/r_{22}); \\ \psi_{12} &= \arctg(x_{12}/r_{12}). \end{aligned} \quad (13.13)$$

Мощность, генерируемая станцией, может быть выражена следующим образом (фазовые углы сопряженных векторов берем со знаком «минус»):

$$\begin{aligned} P_1 + jQ_1 &= E_1 e^{-j\delta_{12}} E_1 e^{j\delta_{12}} / (|z_{11}| e^{-j\psi_{11}}) - E_1 e^{j\delta_{12}} E_2 / (|z_{12}| e^{-j\psi_{12}}) = \\ &= (E_1^2 / |z_{11}|) e^{j\psi_{11}} - (E_1 E_2 / |z_{12}|) e^{j(\delta_{12} + \psi_{12})}. \end{aligned} \quad (13.14)$$

Используя тригонометрическую форму представления комплексных чисел, (13.14) можно записать в виде

$$\begin{aligned} P_1 + jQ_1 &= (E_1^2 / |z_{11}|) (\cos \psi_{11} + j \sin \psi_{11}) - \\ &- (E_1 E_2 / |z_{12}|) [\cos(\delta_{12} + \psi_{12}) + j \sin(\delta_{12} + \psi_{12})]. \end{aligned} \quad (13.15)$$

откуда следует, что

$$P_1 = (E_1^2 / |z_{11}|) \cos \psi_{11} - (E_1 E_2 / |z_{12}|) \cos(\delta_{12} + \psi_{12}). \quad (13.16)$$

Введя обозначения

$$\alpha_{11} = 90^\circ - \psi_{11}; \quad \alpha_{12} = 90^\circ - \psi_{12}, \quad (13.17)$$

можно записать

$$\left. \begin{aligned} \cos \psi_{11} &= \cos(90^\circ - \alpha_{11}) = \sin \alpha_{11}; \\ \cos(\delta_{12} + \psi_{12}) &= \cos[90^\circ + (\delta_{12} - \alpha_{12})] = -\sin(\delta_{12} - \alpha_{12}). \end{aligned} \right\} \quad (13.18)$$

С учетом (13.18) выражение (13.16) принимает вид

$$P_1 = (E_1^2 / |z_{11}|) \sin \alpha_{11} + (E_1 E_2 / |z_{12}|) \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}). \quad (13.19)$$

Выражение (13.19) представляет собой приближенную действительную угловую характеристику мощности электрической системы. Амплитуда этой характеристики является действительным пределом мощности

$$P_{1\text{д. макс}} = (E_1^2 / |z_{11}|) \sin \alpha_{11} + E_1 E_2 / |z_{12}|, \quad (13.20)$$

который, как правило, меньше идеального предела мощности $P_{\text{ид. макс}}$.

Пример 13.1. Для схемы электропередачи, изображенной на рис. 11.19, определить запас статической устойчивости по действительному пределу мощности.

Решение. Для расчета действительного предела мощности определим реактивное сопротивление генератора $G\mathcal{Z}$, приведенное к базисным условиям:

$$\begin{aligned} x_{*ГЗ} &= x_{\mathcal{Z}} U_{\text{ном}}^2 S_6 K^2 / (S_{\text{ном}} U_6^2 \cdot 100) = 180 \cdot 10,5^2 \cdot 350 \cdot 233^2 / [(1500/0,8) \times \\ &\times 220^2 \cdot 10,5^2 \cdot 100] = 0,38. \end{aligned}$$

Сопротивление трансформатора $T\mathcal{Z}$

$$x_{*ТрЗ} = x_{\text{тр}} U_{\text{ном}}^2 S_6 / (S_{\text{ном}} U_6^2 \cdot 100) = 14 \cdot 233^2 \cdot 350 / (1800 \cdot 220^2 \cdot 100) = 0,03.$$

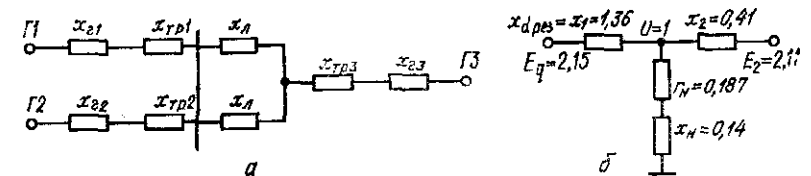


Рис. 13.10. К примеру 13.1

Схема замещения рассматриваемой электропередачи показана на рис. 13.10, а. Общее сопротивление цепи от генератора до точки подключения нагрузки

$$x_{*2} = x_{*ГЗ} + x_{*ТрЗ} = 0,38 + 0,03 = 0,41.$$

Активная мощность нагрузки при $\cos \varphi_{\text{н}} = 0,8$

$$P_{*\text{н}} = P_{\text{н}} / S_6 = 1200 / 350 = 3,43.$$

Реактивная мощность нагрузки

$$Q_{*\text{н}} = P_{*\text{н}} \sin \varphi_{\text{н}} = 3,43 \cdot 0,75 = 2,57.$$

Мощность, генерируемая электростанцией,

$$S_{02} = (P_{\Sigma H} + jQ_{\Sigma H}) - (P_{01} + jQ_{01}) = (3,43 + j2,57) - (1 + j0,485) = 2,43 + j2,09.$$

Считая нагрузку неизменной, определяем ее активное сопротивление

$$r_H = U^2 \cos \varphi_H / S_H = 1^2 \cdot 0,8 / (3,43 / 0,8) = 0,187$$

и реактивное сопротивление

$$x_H = U^2 \sin \varphi_H / S_H = 1^2 \cdot 0,6 / (3,43 / 0,8) = 0,14.$$

Полное сопротивление нагрузки

$$z_H = z_g = 0,187 + j0,14.$$

После соответствующих преобразований схема замещения электропередачи принимает вид, показанный на рис. 13.10, б.

Электродвижущая сила генератора $G3$ в нормальном режиме

$$E_2 = \sqrt{(1 + 2,09 \cdot 0,41)^2 + (2,43 \cdot 0,41)^2} = 2,11.$$

Собственные и взаимные сопротивления Т-образной схемы замещения

$$z_{11} = z_1 + z_2 z_g / (z_2 + z_g) = j1,36 + j0,41 (0,187 + j0,14) / (j0,41 + 0,187 + j0,14) = 0,093 + j1,49;$$

$$|z_{11}| = \sqrt{0,093^2 + 1,49^2} \approx 1,5;$$

$$\psi_{11} = \arctg(1,49 / 0,093) = 86^\circ;$$

$$z_{12} = z_1 + z_2 + z_1 z_g / z_g = j1,36 + j0,41 + j1,36 j0,41 / (0,187 + j0,14) = 1,89 + j3,19;$$

$$|z_{12}| = \sqrt{1,89^2 + 3,19^2} = 3,71; \quad \psi_{12} = \arctg(3,19 / 1,89) = 59^\circ.$$

Уравнение угловой характеристики мощности определяется выражением (13.19). Углы α_{11} и α_{12} , дополняющие ψ_{11} и ψ_{12} до 90° , составляют:

$$\alpha_{11} = 90 - 86 = 4^\circ; \quad \sin 4^\circ = 0,07; \quad \alpha_{12} = 90 - 59 = 31^\circ; \quad \sin 31^\circ = 0,52.$$

После подстановки найденных значений углов α_{11} и α_{12} в выражение (13.19) получим

$$P_1 = 2,15^2 \cdot 0,07 / 1,5 + (2,15 \cdot 2,11 / 3,71) \sin(\delta - 31^\circ) = 0,22 + 1,22 \sin(\delta - 31^\circ).$$

Изменяя угол δ от 0 до 180° , можно построить действительную характеристику мощности, а по формуле (13.20) определить действительный предел мощности:

$$P_{1d \max} = 2,15^2 \cdot 0,07 / 1,5 + 2,15 \cdot 2,11 / 3,71 = 1,438.$$

Запас статической устойчивости электропередачи по действительному пределу мощности

$$K_c = (1,438 - 1) \cdot 100 / 1 = 43,8 \%.$$

Сравнение полученного значения K_c с запасом статической устойчивости электропередачи по идеальному пределу мощности показывает, что уменьшение напряжения на зажимах потребителя является фактором, снижающим статическую устойчивость электропередачи.

Контрольные вопросы

1. Что такое узел нагрузки и какие его свойства?
2. От чего зависит точность расчета устойчивости узлов электрической нагрузки?
3. Какие основные характеристики двигательной нагрузки?

4. Какое влияние на устойчивость СЭС оказывают электротехнологические установки?
5. С какой целью и какие упрощения вводятся при расчетах электромеханических переходных процессов в узлах нагрузки?
6. Что представляют собой статические характеристики отдельных потребителей и узлов нагрузки?
7. В чем особенность расчета устойчивости электродвигателей с учетом их динамических характеристик?
8. Какое влияние оказывает нагрузка на статическую устойчивость СЭС?
9. Что называется действительным пределом передаваемой мощности?
10. Каков порядок расчета статической устойчивости электрической системы по действительному пределу?

Темы рефератов

1. Характеристика электроприемников и узлов нагрузки с точки зрения устойчивости и надежности СЭС.
2. Модели нагрузки в расчетах электромеханических переходных процессов.
3. Статические характеристики нагрузок и их использование при исследованиях режимов СЭС.
4. Алгоритмы и программы расчета статической устойчивости нагрузки на ЭВМ.

Глава 14

УСТОЙЧИВОСТЬ УЗЛОВ НАГРУЗКИ ПРИ СЛАБЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ

14.1. Исходные положения

Слабые возмущения могут возникать под действием питающей энергетической системы (изменения напряжения и частоты), а также в результате изменений режимов работы самой СЭС и ее электроприемников (пуски, колебания момента и перегрузки двигателей по условиям технологического процесса; изменение количества питающих линий; регулирование значений отдельных параметров режима; оперативные переключения в распределительной сети и т. п.). В таких условиях электроснабжения свойства и тип электроприемников узла нагрузки оказывают существенное влияние на его устойчивость.

Если узлы нагрузки по суммарной потребляемой мощности соизмеримы с мощностью питающей ЭЭС или электрически удалены от источников электрической энергии, то режим их работы при слабых возмущениях может оказаться неустойчивым.

Оценка устойчивости узлов нагрузки является неотъемлемой частью решения задачи обеспечения устойчивости СЭС. Устойчивость узла промышленной нагрузки рассчитывают в такой последовательности:

1) замещают узел нагрузки расчетной моделью и определяют ее параметры;

2) выделяют существенные параметры и критерии устойчивости для данной схемы электроснабжения;

3) оценивают предельный режим по критическим значениям существенных переменных и запасу устойчивости.

Замена реального узла нагрузки расчетной моделью (операция замещения) при анализе слабых возмущений строится на сохранении тождества рассчитываемых на данном этапе текущих показателей переходного процесса по действительным и эквивалентным параметрам.

Узел нагрузки с асинхронными двигателями адекватно заменяют расчетной моделью в виде эквивалентного асинхронного двигателя, движение которого описывается теми же уравнениями, что и реальные двигатели. Погрешность замещения зависит от способа его осуществления. По результатам анализа критериев замещения в [27] выделены три их группы:

1) усреднение параметров двигателей при каждом одинаковом значении скольжения исходя из допущения одинаковых скольжений реальных двигателей в одни и те же моменты переходного процесса;

2) замещение по совпадению переходных процессов активной и реактивной мощностей, потребляемых из сети группой реальных двигателей и их эквивалентом;

3) замещение по сохранению пределов динамической устойчивости группы реальных двигателей и их эквивалента.

Выбор критерия замещения зависит от конечной цели поставленной задачи и требуемой точности ее решения. В приближенных оценочных расчетах можно использовать статистические параметры расчетной модели крупного узла нагрузки в виде эквивалентного асинхронного двигателя [27]:

1) параметры Г-образной схемы замещения (см. п. 12.1) $x_{*s0} = 0,368 \pm 0,05$; $x_{*s1} = 0,266 \pm 0,04$; $x_{*r1} = 2,95 \pm 0,8$; $r_{*20} = 0,0226 \pm 0,003$; $r_{*21} = 0,0424 \pm 0,011$; $S_{ном} = 0,02$;

2) параметры режима $M_{*max} \approx 1,7 \pm 0,2$; $M_{*пуск} \approx 0,73 \pm 0,2$; $M_{*ст} 0,5 \pm 0,2$; $I_{*пуск} \approx 4,1 \pm 0,6$; $\cos \varphi_{ном} \approx 0,8 \pm 0,06$; $k_3 \approx 0,7 \pm 0,1$; $T_I \approx 0,8 \pm 0,4$ с (здесь моменты отнесены к значению $M_{ном\Sigma}$, другие параметры — к $S_0 = S_{дв. ном\Sigma}$ и $U_0 = U_{ном\Sigma}$ на ступени напряжения узла нагрузки).

Разнотипность синхронных двигателей в узлах нагрузки небольшая, что позволяет учитывать их по фактическим параметрам и параметрам нормального режима. Замещение больших и разнородных по технологическому использованию групп синхронных двигателей выполняют отдельно по явно- и неявнополюсным двигателям ввиду различия их асинхронных характеристик, механических постоянных инерции и характеристик приводимых механизмов.

В приближенных расчетах устойчивости узлов нагрузки используют средневзвешенные значения параметров синхронных двигателей. Для явнополюсных двигателей они следующие: кратность пускового момента $M_{*пуск} \approx 0,8$; коэффициент мощности $\cos \varphi_{ном} \approx$

$\approx 0,9$; продольное и поперечное синхронные индуктивные сопротивления $x_{*d} \approx 1,3$ и $x_{*q} \approx 0,85$; индуктивное сопротивление рассеяния статора $x_{*ст} \approx 0,15$; индуктивное сопротивление рассеяния и постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутых других обмотках или контурах $x_{*fст} \approx 0,21$ и $T_{f0} \approx 2,4$ с; индуктивное сопротивление рассеяния и постоянная времени демпферной обмотки по продольной оси при разомкнутых других обмотках $x_{*kd} \approx 0,12$ и $T_{kd0} \approx 0,08$ с; индуктивное сопротивление

Таблица 14.1. Средневзвешенные параметры составляющих комплексной расчетной модели узла нагрузки

Составляющие нагрузки	$S_{ном}/P_{ном}$		$\cos \varphi_{ном}$	k_3
	с учетом синхронного двигателя	без учета синхронного двигателя		
Асинхронный двигатель	0,8	1,0	0,8	0,7
Синхронный двигатель	0,14	—	0,9	0,85
Статическая нагрузка	0,55	0,54	0,81	1,0

Таблица 14.2. Параметры статической нагрузки

U_*	0	0,20	0,40	0,60	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,0	1,05	1,10
P_*	0	0,05	0,18	0,41	0,53	0,60	0,68	0,75	0,83	0,91	1,0	1,09	1,18
Q_*	0	0,03	0,12	0,27	0,34	0,39	0,43	0,52	0,62	0,77	1,0	1,35	1,90

рассеяния и постоянная времени демпферной обмотки по поперечной оси при разомкнутых других обмотках $x_{*kq} \approx 0,09$ и $T_{kd0} \approx 0,06$; коэффициент загрузки $k_3 \approx 0,85$.

Узел нагрузки, содержащий асинхронные и синхронные двигатели, представляют комплексной расчетной моделью. Ее параметры могут устанавливаться замещением отдельных характерных составляющих нагрузки, описываться статическими (12.19) или динамическими (12.20) характеристиками.

В оценочных расчетах устойчивости узлов нагрузки можно использовать средневзвешенные параметры комплексной расчетной модели [27], приведенные в табл. 14.1 и 14.2 (в таблицах мощность двигателей указана по отношению к номинальной мощности узла нагрузки). Ориентировочные данные о составе узлов нагрузки по потребляемым мощностям следующие:

узлы промышленной нагрузки: двигатели — 55 %, статическая нагрузка — 45 %;

узлы коммунально-бытовой нагрузки: асинхронные двигатели — 30 %, статическая нагрузка — 70 %;

узлы сельскохозяйственной нагрузки: двигатели — 5 %, статическая нагрузка — 95 %.

Устойчивость узла нагрузки анализируют по схеме замещения всей СЭС и параметрам ее режима. В зависимости от конкретных условий расчетную схему электроснабжения приводят к одному из основных видов (см. п. 12.2), что дает возможность использовать практические критерии устойчивости.

В результате замещения получают четыре разные расчетные модели узла нагрузки, отличающиеся между собой используемыми при анализе критериями устойчивости (рис. 14.1):

1) модель, где напряжение в узле нагрузки является независимой переменной, не зависящей от режима работы электроприемников, что позволяет рассчитывать устойчивость независимо для каж-

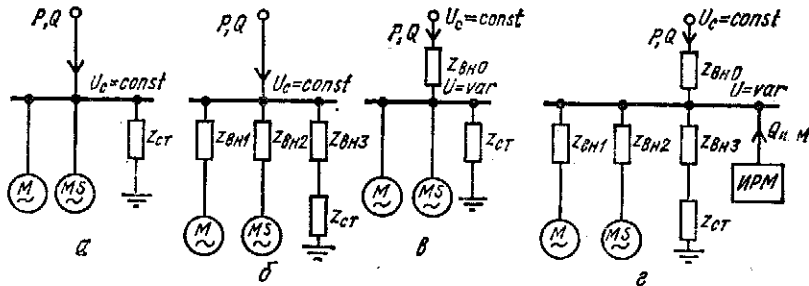


Рис. 14.1. Расчетные модели узла нагрузки

дой из характерных групп электроприемников (рис. 14.1, а) по ее основным критериям;

2) модель, где характерные группы электроприемников радиально связаны через внешние сопротивления с шинами узла нагрузки (рис. 14.1, б), напряжение на которой является независимой переменной режима;

3) модель, где характерные группы электроприемников связаны с узлом нагрузки через общее внешнее сопротивление и независимой переменной режима является э. д. с. источника питания (рис. 14.1, в);

4) модель, где узел нагрузки содержит все характерные составляющие и ИРМ (рис. 14.1, г).

Ниже излагается методика оценки устойчивости всех четырех расчетных моделей узла нагрузки.

14.2. Расчет устойчивости асинхронных и синхронных двигателей

Оценка устойчивости узла нагрузки, независимая по выделенным отдельно группам асинхронных и синхронных двигателей, выполняется для расчетных моделей узла нагрузки согласно рис. 14.1, а и б. Существенной независимой переменной в этом случае является напряжение на шинах узла нагрузки, и для оценки его устойчивости используются основные критерии устойчивости (12.39) и (12.26). При этом необходимо учитывать характеристики приводимых механизмов и их загрузку.

Для асинхронных двигателей (или их эквивалента) основным условием нарушения устойчивости является граничное равенство $d(M - M_{\text{мх}})/ds = 0$. При $M_{\text{мх}} = \text{const}$ и непосредственном подключении двигателей к шинам узла нагрузки критические параметры, соответствующие предельному режиму его статической устойчивости, определяются выражениями (12.40) — (12.42). При подключении двигателей к узлу нагрузки через индивидуальные внешние сопротивления $Z_{\text{вн1}}$, $Z_{\text{вн2}}$ и $Z_{\text{вн3}}$ (см. рис. 14.1, б) расчет критических параметров режима и запаса устойчивости выполняется аналогично, только с учетом этих сопротивлений.

Если активными сопротивлениями пренебречь, то $x_s' = x_s + x_{\text{вн}}$. Расчетные выражения при этом имеют вид

$$\left. \begin{aligned} s'_{\text{кр}} &= r_2 / (x_s + x_{\text{вн}}) = s_{\text{кр}} / (1 + x_{\text{вн}}/x_s); \\ P'_{\text{max}} &= U_c^2 / (2(x_s + x_{\text{вн}})) = P_{\text{max}} / (1 + x_{\text{вн}}/x_s); \\ U'_{\text{с.кр}} &= \sqrt{2mP_{\text{ном}}(x_s + x_{\text{вн}})} = U_{\text{с.кр}} \sqrt{1 + x_{\text{вн}}/x_s}; \\ K_{\text{зс}} &= (s_{\text{ном}} - s'_{\text{кр}}) \cdot 100 / s_{\text{ном}} \text{ или } K_{\text{зс}} = \\ &= (U_c - U'_{\text{с.кр}}) \cdot 100 / U_c. \end{aligned} \right\} (14.1)$$

Наличие внешнего сопротивления при подключении к узлу нагрузки асинхронных двигателей снижает предельное по статической устойчивости значение скольжения.

При известной характеристике приводного механизма $M_{\text{мх}} = f(s)$ критические параметры режима находят, решая систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} M &= M_{\text{мх}}; \\ dM/ds &= dM_{\text{мх}}/ds. \end{aligned} \right\} (14.2, а)$$

С учетом выражений (12.14) и (14.1) после соответствующих преобразований (14.2, а) принимает вид

$$\left. \begin{aligned} 2M_{\text{max}} U_c^2 s_{\text{кр}}' s_y / ((1 + x_{\text{вн}}/x_s)(s_{\text{кр}}'^2 + s_y)) &= \\ = M_{\text{мх.ст}} + (M_{\text{мх0}} - M_{\text{мх.ст}})(1 - s_y)^p / (1 - s_{\text{ном}})^p; \\ 2M_{\text{max}} U_c^2 s_{\text{кр}}' (s_{\text{кр}}'^2 - s_y^2) / ((1 + x_{\text{вн}}/x_s)(s_{\text{кр}}'^2 + s_y^2)) &= \\ = -p(M_{\text{мх0}} - M_{\text{мх.ст}})(1 - s_y)^{p-1} / (1 - s_{\text{ном}})^p. \end{aligned} \right\} (14.2, б)$$

Решив систему уравнений (14.2, б), можно определить параметры $U_{\text{с.кр}}$ и s_y для предельного по устойчивости режима, где соответствующее границе статической устойчивости скольжение s_y будет больше критического скольжения $s_{\text{кр}}$ при $M < M_{\text{max}} / (1 + x_{\text{вн}}/x_s)$.

В приближенных расчетах полагают $s_y = s_{\text{кр}}$. Тогда после решения системы уравнений (14.2, б) получим

$$U_{\text{с.кр}} = \sqrt{\frac{(M_{\text{мх.ст}} + (M_{\text{мх0}} - M_{\text{мх.ст}})(1 - s_y)^p) / (1 - s_{\text{ном}})^p \times \dots}{\times (1 + x_{\text{вн}}/x_s) / M_{\text{max}}}} \dots (14.3)$$

При $p = 0$ имеет место частный случай $M_{\text{мх}0} = \text{const}$ и выражение для определения критического напряжения преобразуется в соответствующее выражение, получаемое из (14.1).

Критическое напряжение на зажимах двигателя определяется при допущении равенства тока статора I_1 и приведенного тока ротора I_2 ($I_1 \approx I_2$). Поскольку

$$I_1 = U_{\text{с.кр}} / \sqrt{(r_2/s_{\text{кр}})^2 + (x_s + x_{\text{вн}})^2},$$

а с учетом (14.1)

$$I_1 = U_{\text{с.кр}} / (\sqrt{2} x_s (1 + x_{\text{вн}}/x_s)),$$

выражение для определения критического напряжения на зажимах двигателя можно записать в виде

$$U_{\text{дв.кр}} \approx I_2' \sqrt{(r_2/s_{\text{кр}})^2 + x_s^2} = U_{\text{с.кр}} \sqrt{1 + 1/(1 + x_{\text{вн}}/x_s)/\sqrt{2}}. \quad (14.4)$$

Статическая устойчивость синхронных двигателей, подключенных к узлу нагрузки с неизменными значениями напряжения и частоты, нарушается при граничном условии $d(M - M_{\text{мх}})/d\delta = 0$. С учетом зависимостей (12.22) и (12.16) это условие можно представить в следующем виде:

$$d(M - M_{\text{мх}})/d\delta = (dE_q/d\delta) U_c \sin \delta / (x_d + x_{\text{вн}}) + U_c E_q \cos \delta / (x_d + x_{\text{вн}}) = 0. \quad (14.5)$$

При отсутствии устройств АРВ двигателей производная $dE_q/d\delta = 0$ и предельный по статической устойчивости режим соответствует значению угла $\delta = \pi/2$, когда

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{max}} &= U_c E_q / (x_d + x_{\text{вн}}); \\ U_{\text{с.кр}} &= m P_{\text{ном}} (x_d + x_{\text{вн}}) / E_q. \end{aligned} \right\} \quad (14.6)$$

Электродвижущая сила E_q в долях ее значения при холостом ходе определяется выражением

$$E_{*q} = [U_c^4 - U_c^2 Q (X_d + X_q) + (P^2 + Q^2) X_d X_q] / (U_c \sqrt{U_c^4 - 2U_c^2 Q X_q + (P^2 + Q^2) X_q^2}), \quad (14.7)$$

где $X_d = x_d + x_{\text{вн}}$; $X_q = x_q + x_{\text{вн}}$.

При наличии автоматического регулятора пропорционального типа синхронный двигатель по аналогии с генератором можно представить в виде переходного сопротивления x_d' и э. д. с. $E' = \text{const}$ [последняя может быть вычислена по формуле (12.9)]. В этом случае критическое напряжение на зажимах двигателя выражается зависимостью

$$U_{\text{с.кр}} = m P_{\text{ном}} (x_d' + x_{\text{вн}}) / E' \quad (14.8)$$

и всегда меньше критического напряжения, определяемого выражением (14.6) при отсутствии устройства АРВ, так как переходное сопротивление значительно меньше синхронного.

Наличие внешнего сопротивления при подключении к узлу нагрузки асинхронных и синхронных двигателей снижает предельные по статической устойчивости значения максимальной активной мощности и повышает значение критического напряжения в узле нагрузки. Это, в свою очередь, ужесточает требования к стабильности питающего напряжения.

14.3. Учет влияния электрической сети на устойчивость узла нагрузки

Если характерные группы двигателей узла нагрузки присоединены к центру питания с напряжением $U_c = \text{const}$ через электрическую сеть (см. рис. 14.1, б), то условия устойчивости узла нагрузки существенно зависят от параметров электрической сети ($x_{\text{вн}}$) и режима работы всех электроприемников. В этом случае напряжение U в узле нагрузки является величиной переменной и его значения будут зависеть от изменения указанных факторов. Поэтому устойчивость узла нагрузки оценивают на основе независимой переменной — напряжения в узле нагрузки, используя косвенные критерии:

$$dU_c/dU > 0 \quad (14.9)$$

или

$$d\Delta Q/dU < 0. \quad (14.10)$$

При использовании критерия (14.9) переменные режима можно аналитически связать между собой, воспользовавшись статическими характеристиками узла нагрузки $P_n = F_1(U)$ и $Q_n = F_2(U)$:

$$U_c = \sqrt{[U + (P_n r_{\text{нн}} + Q_n x_{\text{вн}})/U]^2 + [(P_n x_{\text{вн}} - Q_n r_{\text{вн}})/U]^2}. \quad (14.11)$$

Исследование этого выражения в области значений функций (12.19) преследует цель установить координаты $U_{\text{с.кр}}$ и $U_{\text{кр}}$ минимума функции, которые соответствуют границе статической устойчивости $dU_c/dU = 0$ (рис. 14.2).

В соответствии с критерием (14.10) статическую устойчивость оценивают по нарушению в узле нагрузки баланса реактивной мощности, вызываемого снижением напряжения. Для точки равновесия режима должно выполняться условие баланса $Q_c = Q_n$, а в ее окрестности — неравенство $d(Q_c - Q_n)/dU > 0$. Метод исследования приращения реактивной мощности

$$\Delta Q = Q_c - Q_n \quad (14.12, а)$$

выбирают в зависимости от исходной информации об узле нагрузки. Если известны статические характеристики нагрузки (12.19), то условия статической устойчивости определяют в соответствии

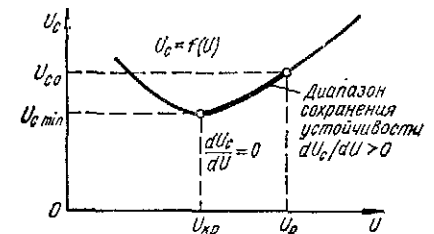


Рис. 14.2. К оценке статической устойчивости узла нагрузки по критерию $dU_c/dU > 0$

с рекомендациями п. 12.2. В противном случае статическую устойчивость анализируют графическим исследованием выражения

$$\Delta Q = Q_0 - (Q_{с.дв} + Q_{а.дв}) \quad (14.12, б)$$

по зависимостям составляющих ее правой части от напряжения в узле нагрузки. Цель графоаналитического анализа — установить границу статической устойчивости режима по условию $d\Delta Q/dU = 0$. В этом случае методика анализа аналогична показанной на рис. 12.6.

Слагаемые небаланса реактивной мощности (14.12, б) определяют следующим образом.

Зависимость поступающей из ЭЭС реактивной мощности от напряжения в узле нагрузки описывается уравнением (12.34), а при $Q_{нр.вн} \approx 0$ и соответствующем преобразовании (14.11) — уравнением

$$Q_c = (-U^2 - P_{нр.вн} + \sqrt{U_c^2 U^2 - P_{нр.вн}^2})/x_{вн}. \quad (14.13)$$

Реактивную мощность, потребляемую эквивалентным асинхронным двигателем и определяемую выражением (12.45), после преобразования [24] можно рассчитать по формуле

$$Q_{а.дв} = Q_{а.дв.ном} [cQ_{\mu}/Q_{\mu ном} + (1 - c) Q_s/Q_{с ном}],$$

где

$$c = Q_{\mu ном}/Q_{а.дв.ном} \approx 1 - 1/\left((m_{\max} + \sqrt{m_{\max}^2 - 1}) \operatorname{tg} \varphi_{ном}\right). \quad (14.14)$$

Если отношения $Q_{\mu}/Q_{\mu ном}$ и $Q_s/Q_{с ном}$ при условии неизменности частоты заменить их значениями:

$$Q_{\mu}/Q_{\mu ном} \approx U/U_{ном} = U_*;$$

$$Q_s/Q_{с ном} = m \left(m_{\max} + \sqrt{m_{\max}^2 - 1} \right) / \left(m_{\max} U_*^2 / m + \sqrt{(m_{\max} U_*^2 / m)^2 - 1} \right),$$

то получим выражение для определения реактивной мощности через напряжение в узле нагрузки [каталожные данные двигателей при учете внешних сопротивлений пересчитываются по (14.1)]:

$$Q_{а.дв} \approx Q_{а.дв.ном} [cU_*^2 + (1 - c) m (m_{\max} + \sqrt{m_{\max}^2 - 1}) / (m_{\max} U_*^2 / m + \sqrt{m_{\max}^2 U_*^4 / m^2 - 1})], \quad (14.15, а)$$

или

$$Q_{а.дв} = Q_{а.дв.ном} [cU_*^2 + m / ((m_{\max} U_*^2 / m + \sqrt{m_{\max}^2 U_*^4 / m^2 - 1}) \operatorname{tg} \varphi_{ном})]. \quad (14.15, б)$$

На границе статической устойчивости $s = s_{кр}$ и $m = m_{\max} U_{*кр}^2$. При этом критическое значение напряжения на зажимах асинхронного двигателя определяется выражением

$$U_{*кр} = \sqrt{m/m_{\max}}, \quad (14.16)$$

а критическое значение потребляемой им реактивной мощности — выражением

$$Q_{а.дв.кр} = [cm/m_{\max} + (1 - c) m (m_{\max} + \sqrt{m_{\max}^2 - 1})] Q_{а.дв.ном}. \quad (14.17, а)$$

Последнее выражение с учетом (14.14) упрощается и принимает следующий вид:

$$Q_{а.дв.кр} = Q_{а.дв.ном} m (c/m_{\max} + 1/\operatorname{tg} \varphi_{ном}). \quad (14.17, б)$$

Устойчивость синхронных двигателей можно анализировать без учета изменения их насыщения, а также без учета разницы в проявлениях реакции статора по продольной и поперечной осям ротора в случае явнополюсного двигателя ($x_d \approx x_q$).

С учетом устройства АРВ и его настройки, влияющей на значение и направление тока возбуждения, реактивную мощность синхронного двигателя можно рассчитать по формуле

$$Q_{с.дв} = U(U - E_{q0} \cos \delta)/x_d, \quad (14.18)$$

где E_{q0} — э. д. с. холостого хода, обусловленная током возбуждения и определяемая выражением

$$E_{q0} = \sqrt{U^2 + 2U_{ном}^2 x_{*d} Q_{с.дв}/S_{ном} + U_{ном}^4 (P_{с.дв}^2 + Q_{с.дв}^2) x_{*d}^2 / (S_{ном}^2 U^2)}. \quad (14.19)$$

Если $E_{q0} < U$, то двигатель потребляет из сети реактивную мощность; при $E_{q0} = U$ он работает в режиме $\cos \varphi = 1$ и $Q = 0$; если $E_{q0} > U$ (что достигается увеличением тока возбуждения), то двигатель генерирует реактивную мощность в сеть.

При нагрузке синхронного двигателя э. д. с. статора, создаваемого результирующим магнитным потоком в его воздушном зазоре, можно определить по формуле

$$E_{\delta} = \sqrt{U^2 + 2U_{ном}^2 x_{*σ} Q_{с.дв}/S_{с.дв.ном} + U_{ном}^4 (P_{с.дв}^2 + Q_{с.дв}^2) x_{*σ}^2 / (S_{с.дв.ном}^2 U^2)}, \quad (14.20)$$

где $x_{*σ}$ — сопротивление рассеяния двигателя (в случае явнополюсного двигателя $x_{σ} \approx 0,6 \div 0,7 x_d^*$).

Реактивная мощность, генерируемая двигателем, существенно зависит от отношения короткого замыкания и кратности изменения тока возбуждения. Это отношение является конструктивным параметром двигателя и в расчетах полагают его равным $1/x_d$. Связь тока возбуждения с существенной переменной (напряжение сети) при анализе устойчивости узла нагрузки предопределяется структурой системы возбуждения синхронного двигателя:

при отсутствии автоматического или ручного регулирования возбуждения и при питании обмотки возбуждения двигателя от машинного возбудителя ток возбуждения от напряжения сети не зависит;

при питании обмотки возбуждения двигателя от выпрямительной установки и отсутствии АРВ ток возбуждения примерно пропорционален напряжению сети;

при наличии АРВ ток возбуждения увеличивается при снижении напряжения на обмотке статора двигателя.

Зависимость э. д. с. статора от тока возбуждения синхронного двигателя определяется выражением

$$E_{q0}/U_{\text{ном}} = k_{\mu} I_{\text{в}}/I_{\text{в.х}} = (I_{\text{в}}/I_{\text{в.ном}})/(I_{\text{в.х}}/I_{\text{в.ном}}) = k_{\mu}/k_{\text{в.х}}, \quad (14.21)$$

где k_{μ} — коэффициент, характеризующий степень насыщения обмотки статора (в расчетах без учета изменения насыщения принимают $k_{\mu} = 1$); $I_{\text{в.х}}$ — ток возбуждения при холостом ходе; $I_{\text{в.ном}}$ — номинальный ток возбуждения; $k_{\text{в}}$ — кратность тока возбуждения, обусловливаемая системой возбуждения; $k_{\text{в.х}} \approx 1/(x_{\text{д}} m_{\text{max}} \times \cos \varphi_{\text{ном}})$ — то же при холостом ходе двигателя.

При изменении тока возбуждения изменяется реактивная мощность синхронного двигателя, в чем легко убедиться, сопоставив выражения (14.19) и (14.21):

$$I_{\text{в}}/I_{\text{в.х}} = \sqrt{U^2 + 2U_{\text{ном}}^2 x_{\text{с.дв}} Q_{\text{с.дв}}/S_{\text{с.дв.ном}} + U_{\text{ном}}^4 (P_{\text{с.дв}}^2 + Q_{\text{с.дв}}^2) \times \dots} \times x_{\text{с.дв}}^2 / (S_{\text{с.дв.ном}}^2 U^2) / U_{\text{ном}},$$

или

$$(Q_{\text{с.дв}}/S_{\text{с.дв.ном}})^2 (x_{\text{с.дв}}/U_{\text{ном}})^2 + (Q_{\text{с.дв}}/S_{\text{с.дв.ном}}) \cdot 2x_{\text{с.дв}} + U_{\text{ном}} + (x_{\text{с.дв}} P_{\text{с.дв}} / (S_{\text{с.дв.ном}} U_{\text{ном}}))^2 - (k_{\text{в}}/k_{\text{в.х}})^2 = 0, \quad (14.22)$$

где $U_{\text{ном}} = U/U_{\text{ном}}$.

Решив уравнение (14.22), получим

$$Q_{\text{с.дв}}/S_{\text{с.дв.ном}} = [\sqrt{(k_{\text{в}} U_{\text{ном}}/k_{\text{в.х}})^2 - (x_{\text{с.дв}} P_{\text{с.дв}} / S_{\text{с.дв.ном}})^2} - U_{\text{ном}}^2] / x_{\text{с.дв}}. \quad (14.23)$$

Эта зависимость может быть использована для анализа реактивной мощности синхронного двигателя в функции напряжения на его зажимах при известном законе регулирования возбуждения $k_{\text{в}} = f(U_{\text{ном}})$.

Для границы статической устойчивости узла нагрузки критическое напряжение на зажимах синхронного двигателя с учетом (14.6) и при регулировании тока возбуждения двигателя в соответствии с (14.21) определяется выражением

$$U_{\text{нкр}} = P_{\text{с.дв}} x_{\text{с.дв}} / (S_{\text{с.дв.ном}} (k_{\text{в}}/k_{\text{в.х}})). \quad (14.24)$$

После подстановки этого выражения в уравнение (14.23) получим

$$(Q_{\text{с.дв}}/S_{\text{с.дв.ном}})_{\text{кр}} = -U_{\text{нкр}}^2/x_{\text{с.дв}} = -P_{\text{с.дв}}^2 x_{\text{с.дв}} / (S_{\text{с.дв.ном}}^2 (k_{\text{в}}/k_{\text{в.х}})). \quad (14.25)$$

Из равенства (14.25) следует, что на границе статической устойчивости узла нагрузки синхронный двигатель потребляет из сети реактивную мощность.

14.4. Влияние компенсации реактивной мощности на устойчивость узла нагрузки

В узел нагрузки реактивная мощность поступает из ЭЭС, но может вырабатываться и местным ИРМ — конденсаторной батареей, синхронным компенсатором, статическим вентильным ИРМ, а также синхронным двигателем (см. рис. 14.1, *г*).

Реактивная мощность конденсаторной батареи существенно зависит от напряжения в узле (рис. 14.3, кривая 1):

$$Q_{\text{к.б}} = Q_{\text{к.б.ном}} (U/U_{\text{ном}})^2 = Q_{\text{к.б.ном}} U_{\text{ном}}^2, \quad (14.26)$$

где $Q_{\text{к.б.ном}} = \omega C U_{\text{ном}}^2$ — номинальная мощность конденсаторной батареи; C — результирующая емкость батареи.

Синхронный компенсатор (синхронный двигатель) может генерировать и потреблять реактивную мощность, определяемую выражением

$$Q_{\text{с.к}} = Q_{\text{с.к.ном}} (U_{\text{ном}} E_{\text{с.к}} - U_{\text{ном}}^2) / x_{\text{с.д}}, \quad (14.27)$$

где $Q_{\text{с.к.ном}}$ — номинальная мощность синхронного компенсатора; $E_{\text{с.к}}$ — его синхронная э. д. с.

Режим работы синхронного компенсатора задается системой его возбуждения в соответствии с V-образной характеристикой (рис. 14.4): восходящая ветвь отвечает возбуждению $E_{\text{с.к}} > U$ и генерированию реактивной мощности (рис. 14.3, кривая 2); нисходящая ветвь — возбуждению $E_{\text{с.к}} < U$ и потреблению реактивной мощности из сети (рис. 14.3, кривая 3).

Статический вентильный ИРМ состоит из нерегулируемой конденсаторной батареи, регулируемого реактора и устройства управления или конденсаторной батареи, регулируемой тиристорами (включение батареи через тиристорный выключатель) [20].

Реактивная мощность ИРМ с регулируемым реактором при параллельном соединении силовых элементов (рис. 14.5, *а*, *б*) определяется выражением

$$Q_{\text{LC}} = Q_{\text{L}} - Q_{\text{C}} = Q(x_{\text{C}}/x_{\text{L}} - 1) \text{ при } Q_{\text{LC}} \in \{0; Q_{\text{C}}\}, \quad (14.28, \text{а})$$

где $Q_{\text{L}} = U^2/x_{\text{L}} = \text{var}$; $Q_{\text{C}} = U^2/x_{\text{C}} = \text{const}$, а при последовательном (рис. 14.5, *а*, *г*) — выражением

$$Q_{\text{LC}} = U^2/(x_{\text{C}} - x_{\text{L}}) = Q_{\text{C}}/(1 - x_{\text{L}}/x_{\text{C}}) \quad (14.28, \text{б})$$

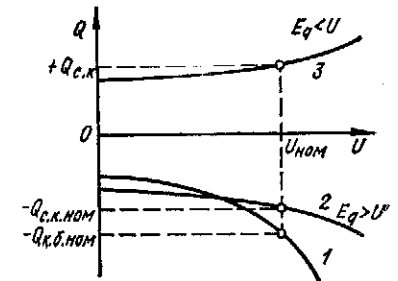


Рис. 14.3. Зависимость реактивной мощности от напряжения в узле для конденсаторной батареи (кривая 1) и синхронного компенсатора (кривые 2, 3)

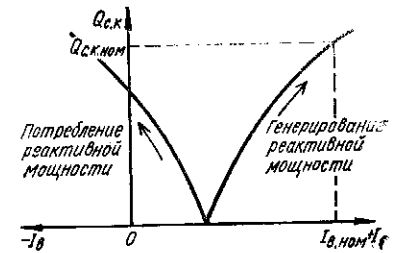


Рис. 14.4. V-образная характеристика синхронного компенсатора

и может изменяться в пределах от номинальной Q_C до $Q_{CLmax} = U^2 / ((1 - x_L/x_C)^2 x_C)$. Верхний предел зависит от наибольшего допустимого напряжения на конденсаторной батарее (генерируемая реактивная мощность возрастает с увеличением напряжения, повышение которого обеспечивается созданием условий, близких к резонансу напряжений: $x_L \approx x_C$).

Реактивная мощность ИРМ с тиристорным выключателем может плавно регулироваться в зависимости от тока $I_{к.б.}$, протекающего через конденсаторную батарею:

$$Q = I_{к.б.}^2 / (\omega C). \quad (14.29)$$

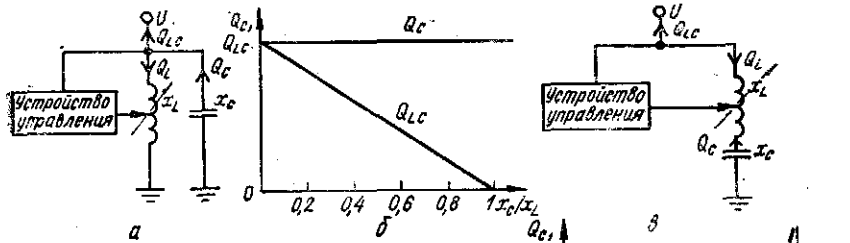


Рис. 14.5. Схемы и характеристики статического вентильного ИРМ при параллельном (а, б) и последовательном (в, г) соединениях его силовых элементов

Основное назначение местного ИРМ — разгрузка питающей и распределительной сетей промышленного предприятия от потоков реактивной энергии. Батарея конденсаторов может устанавливаться в любой точке электрической сети. Синхронный компенсатор размещают в крупном узле нагрузки с напряжением 6—10 кВ, что обычно соответствует районной подстанции ЭЭС. Статический вентильный ИРМ с параллельным соединением силовых элементов включают в схему электроснабжения мощных электроприемников с резкопеременной нагрузкой, где он используется в качестве симметрирующего, фальтроскомпенсирующего и фальтроссимметрирующего устройства.

Благодаря местному ИРМ снижаются потери энергии в электрической сети, повышаются уровень и качество напряжения у электроприемников и изменяются условия устойчивости узла нагрузки.

В оценке устойчивости узлов нагрузки с компенсацией реактивной мощности существенными факторами являются размещение компенсирующих устройств в узле асинхронной нагрузки и использование местного ИРМ в узле комплексной нагрузки. При размещении ИРМ в узле асинхронной нагрузки изменяются условия внешнего электроснабжения, в результате чего напряжение у электроприемников из-за уменьшения падения напряжения в питающей сети повышается. Падение напряжения определяется выра-

жением

$$\Delta U = \{Pr_{вн} + (Q_c - Q_{ИРМ})x_{вн} + j[Px_{вн} - (Q_c - Q_{ИРМ})r_{вн}]\}/U. \quad (14.30)$$

Изменение эквивалентных параметров внешней сети при включении синхронных компенсаторов или двигателей, генерирующих реактивную мощность (рис. 14.6, а, в), можно определить по формулам

$$\left. \begin{aligned} U_{с.эк} &= (U_c/x_{вн} + E_{q0}/x_d)/(1/x_{вн} + 1/x_d) = \\ &= U_c [1 + (E_{q0}/U_c)/(x_{вн}/x_d)]/(1 + x_{вн}/x_d); \\ x_{эк} &= 1/(1/x_{вн} + 1/x_d) = x_{вн}(1 + x_{вн}/x_d). \end{aligned} \right\} \quad (14.31)$$

Из (14.31) следует, что при $E_q > U_c$ условия устойчивости узла нагрузки благодаря повышению значений критических пара-

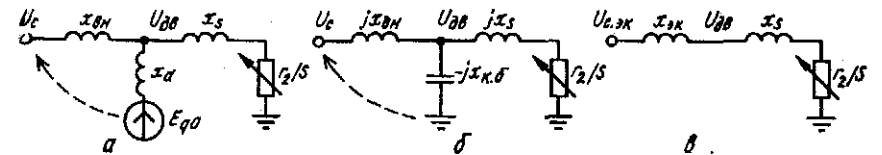


Рис. 14.6. Схемы замещения узла асинхронной нагрузки при включении синхронного компенсатора или двигателя (а), конденсаторной батареи (б) и эквивалентная (в)

метров, определяемых по (14.1), улучшаются, так как $U_{с.эк} > U_c$, $x_{эк} < x_{вн}$.

При включении конденсаторной батареи (рис. 14.6, б) эквивалентные параметры внешней сети определяются выражениями

$$\left. \begin{aligned} U_{с.эк} &= U_c/[jx_{вн}(1/(jx_{вн}) - 1/(jx_{к.б}))] = \\ &= U_c/(1 - x_{вн}/x_{к.б}); \\ x_{эк} &= 1/[1/(jx_{вн}) - 1/(-jx_{к.б})] = x_{вн}/(1 - x_{вн}/x_{к.б}), \end{aligned} \right\} \quad (14.32)$$

т. е. происходит увеличение напряжения у электроприемников узла нагрузки ($U_{с.эк} > U_c$) и сопротивления связи узла с шинами бесконечной мощности ($x_{эк} > x_{вн}$), что приводит к соответствующим изменениям критических параметров: критическое скольжение [см. (14.1)] уменьшается до значения

$$s_{эк.кр} = s_{кр}/(1 + x_{вн}/(x_s(1 - x_{вн}/x_{к.б}))), \quad (14.33)$$

а критическое напряжение возрастает до значения

$$U_{с.эк.кр} = U_{с.кр} \sqrt{1 + x_{вн}/(x_s(1 - x_{вн}/x_{к.б}))}. \quad (14.34)$$

Запас статической устойчивости узла нагрузки при этом уменьшается.

Наибольшие значения активной мощности с учетом выражений (14.32) и (14.1) можно рассчитать по формуле

$$\begin{aligned} P_{эк \max}/P_{\max} &= (U_{с.эк}^2/(2(x_s + x_{эк}))) / (U_c^2/(2(x_s + x_{вн}))) = \\ &= (1 + x_{вн}/x_s) / ((1 + x_{вн}/x_s)(1 - x_s/x_{к.б})(1 - x_{вн}/x_{к.б})), \end{aligned} \quad (14.35)$$

из которой следует, что условия устойчивости узла нагрузки по этой переменной зависят от конкретного соотношения сопротивлений $X_{вн}$, X_s и $X_{к.б}$.

Увеличение мощности конденсаторной батареи отрицательно сказывается на устойчивости узла асинхронной нагрузки, так как при этом $X_{к.б}$ падает.

Если узел комплексной нагрузки удален от источника неизменного напряжения и содержит местный ИРМ (см. рис. 14.1, г), то статическую устойчивость такого узла следует анализировать по

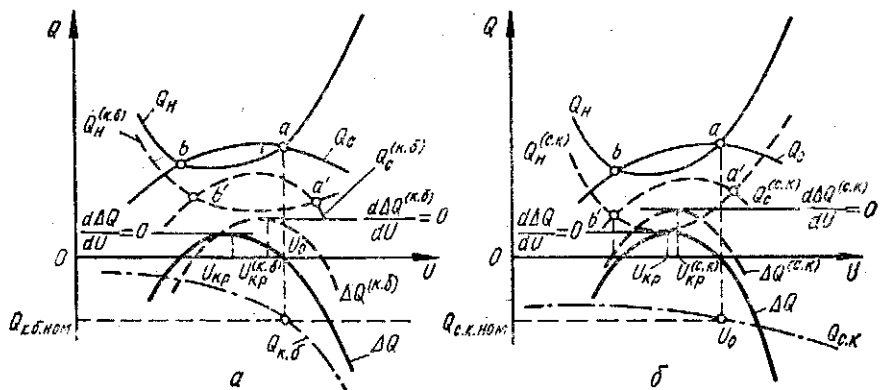


Рис. 14.7. Изменение характеристик составляющих баланса реактивной мощности в узле комплексной нагрузки при включении одинаковых по мощности конденсаторной батареи (а) и синхронного компенсатора (б)

критерию (14.10). В этом случае уравнение небаланса реактивной мощности в узле имеет вид

$$\Delta Q = Q_c + Q_{ИРМ} - Q_n. \quad (14.36)$$

Исследование (14.36) на экстремум выполняется графически. При включении конденсаторной батареи или синхронного компенсатора (синхронного двигателя) с $E_q > U_0$ суммарная характеристика реактивной мощности нагрузки и ИРМ становится более пологой (рис. 14.7).

Устойчивость нагрузки обеспечивается в режимах с точками суммарной характеристики реактивной мощности, в которых $\Delta Q = 0$ и выполняется условие $d\Delta Q/dU > 0$ (например, точки a и a'). Из сравнения изменения интервала между значениями напряжения $U_{кр} - U_{кр}^{(к.б)}$ и $U_{кр} - U_{кр}^{(с.к)}$ следует, что включение конденсаторной батареи создает менее благоприятные условия устойчивости узла нагрузки (особенно при малом запасе устойчивости).

В точках, где выполняется условие $d\Delta Q/dU < 0$ (точки b и b'), устойчивость узла нагрузки не сохраняется, так как уменьшающимся значениям напряжения соответствуют возрастающие значения потребляемой реактивной мощности, обуславливающей, в свою очередь, увеличение потери напряжения в элементах сети меж-

ду ИРМ и узлом нагрузки. Такое снижение напряжения из-за возрастающего дефицита реактивной мощности является прогрессирующим. Этот процесс приводит к нарушению устойчивости всего узла нагрузки и называется *лавинной напряжением*. Узел нагрузки с конденсаторной батареей более подвержен этому опасному режиму, чем с синхронным компенсатором, что следует из сравнения характеристик составляющих баланса реактивной мощности, показанных на рис. 14.7 при $Q_{к.б.ном} = Q_{с.к.ном}$.

14.5. Использование статических характеристик при расчете устойчивости узла комплексной нагрузки

В процессе эксплуатации крупных узлов нагрузки СЭС изменяются схема их электрических соединений, состав и значения параметров режима. Кроме того, в основных узлах крупного промышленного предприятия производится целенаправленное регулирование напряжения и баланса реактивной мощности. Сочетание всех этих факторов оказывает существенное влияние на устойчивость узла нагрузки. При этом весьма сложно выделить отдельные составляющие узла комплексной нагрузки, зафиксировать их отклонения от номинальных значений и привести к простейшему виду (см. рис. 14.1, г) по ряду причин:

- 1) из-за многоступенчатости схемы распределения электрической энергии;
- 2) ввиду наличия нескольких напряжений в распределительной сети;
- 3) из-за размещения регулируемых компенсирующих устройств в различных точках распределительной сети;
- 4) вследствие централизованного автоматического регулирования напряжения в пунктах его трансформации и местного регулирования напряжения у потребителей;
- 5) из-за наличия резкопеременных графиков нагрузки отдельных промышленных производств.

Изменения в узле нагрузки таких параметров режима, как активная и реактивная мощности и напряжение, являются взаимосвязанными. В связи с тем что напряжение относится к существенным переменным в оценке устойчивости, при анализе устойчивости узла комплексной нагрузки, имеющего сложную структуру, статические характеристики целесообразно записать в виде полиномов [27]:

$$\left. \begin{aligned} P_{*n} &= 1 - a_p - b_p - c_p + a_p U_* + b_p U_*^2 + c_p \omega_*; \\ Q_{*n} &= 1 - a_q - b_q - c_q + a_q U_* + b_q U_*^2 + c_q \omega_*. \end{aligned} \right\} \quad (14.37)$$

где $a_p, b_p, c_p, a_q, b_q, c_q$ — постоянные коэффициенты, а параметры режима (напряжение, частота, активная и реактивная мощности) выражены в относительных единицах, приведенных к их номинальным значениям.

Точность описания узла комплексной нагрузки полиномами (14.37) невелика. Однако она приемлема при выполнении расчетов с последовательным уточнением режима путем рассмотрения установившихся режимов с шагом по времени не более десятков минут.

Статическая характеристика узла комплексной нагрузки обуславливается статическими характеристиками отдельных электроприемников, их групп в поточном производстве, долевым участием в общей нагрузке. Получить статические характеристики узла нагрузки можно последовательным замещением распределительной сети и его составляющих, которые могут задаваться также и средними (обобщенными) показателями. Такая методика изложена в [27] и для ее использования необходимо знать регулирующие эффекты составляющих узла нагрузки.

Отдельно следует учитывать группы электроприемников, которые питаются через трансформаторы с устройствами автоматического регулирования напряжения. Статические характеристики узла нагрузки с такими электроприемниками при изменении питающего напряжения от U_{*1} до U_{*2} (выражения $P_{*н}$ и $Q_{*н}$ по структуре аналогичны) выражаются полиномами:

$$P_{*н} \approx \begin{cases} 1 - a_P - b_P - c_P + a_P (U_*/U_{*1}) + b_P (U_*/U_{*1})^2 + c_P \omega_*, & U_* < U_{*1}; \\ 1 - c_P + c_P \omega_*, & U_{*1} \leq U_* \leq U_{*2}; \\ 1 - a_P - b_P - c_P + a_P (U_*/U_{*2}) + b_P (U_*/U_{*2})^2 + c_P \omega_*, & U_* > U_{*2}. \end{cases}$$

Однако изложенный путь получения статических характеристик узла комплексной нагрузки весьма трудоемок.

Альтернативным является вариант использования экспериментальных данных по крупным узлам нагрузки, на основе которых получают обобщенные (средние, типовые) статические характеристики. При этом полиномы (14.37) удобно записать для малых отклонений напряжения и частоты, выразив их через коэффициенты *регулирующего эффекта нагрузки*, под которым понимают изменение потребляемой мощности при изменении напряжения:

$$\left. \begin{aligned} k_{PU} &= (\partial P_n / \partial U)_{U_{*1}} = a_P + 2b_P; & k_{P\omega} &= (\partial P_n / \partial \omega)_{\omega_{*1}} = c_P; \\ k_{QU} &= (\partial Q_n / \partial U)_{U_{*1}} = a_Q + 2b_Q; & k_{Q\omega} &= (\partial Q_n / \partial \omega)_{\omega_{*1}} = c_Q, \end{aligned} \right\} (14.38)$$

где k_{PU} , k_{QU} — соответственно регулирующие эффекты активной и реактивной нагрузок по напряжению при постоянной частоте; $k_{P\omega}$, $k_{Q\omega}$ — то же по частоте при постоянном напряжении.

На основе анализа экспериментальных данных, выполненного в [27], обобщенные статические характеристики узла нагрузки могут быть представлены в численном виде при изменении напряжения от $1,1U_{ном}$ до критического значения, для значений напряжения ниже критического и режима, наступающего после отключения части электроприемников при значениях напряжения больше критического.

При значениях напряжения от $1,1U_{ном}$ до критического статическая характеристика узла активной нагрузки описывается

уравнением

$$P_{*н} = 1 - k_{PU} + k_{PU} U_* + k_{P\omega} \omega_*, \quad (14.39,а)$$

где $k_{PU} = 0,9 \pm 0,5$ — коэффициент нагрузки, состав которой близок к среднему (см. п. 14.1), причем для промышленных узлов нагрузки $k_{PU} = 0,6 \pm 0,3$, для узлов без крупных предприятий $k_{PU} = 1,2 \pm 0,3$. Ориентировочные значения коэффициента $k_{P\omega} = 1,2 \pm 0,8$; при этом большим значениям $k_{P\omega}$ обычно соответствуют меньшие значения коэффициента k_{PU} и наоборот.

С учетом этих значений коэффициентов k_{PU} и $k_{P\omega}$ уравнение 14.39, а) принимает вид

$$P_{*н} \approx -1,1 + 0,9U_* + 1,2\omega_*. \quad (14.39,б)$$

Для учета изменения реактивной нагрузки в зависимости от напряжения нужно дополнительно учитывать значения коэффициента мощности $\cos \varphi_n$, поскольку эти значения определяются действием ИРМ. Регулирующий эффект по напряжению при постоянной частоте некомпенсированной реактивной нагрузки $k_{QU} = 3,8 \pm 1,8$, а скомпенсированной — $k_{QU} \approx (1,1 \pm 1,1)/\text{tg } \varphi_n + 2$. Регулирующий эффект реактивной нагрузки по частоте при постоянном напряжении $k_{Q\omega} \approx (-1,5 \pm 1)/\text{tg } \varphi_n + 1$. С учетом этого статическая характеристика узла реактивной нагрузки описывается уравнением

$$Q_{*н} \approx [5,7 - \text{tg } \varphi_n - 9,5U_* + (5,3 + \text{tg } \varphi_n)U_*^2 + (\text{tg } \varphi_n - 1,5)\omega_*]/\text{tg } \varphi_n. \quad (14.40)$$

Для значений напряжения ниже критического описать точно статические характеристики узла нагрузки не удастся. Это объясняется тем, что прогнозировать потребление электроприемниками реактивной мощности сложно и возможно появление лавины напряжения из-за возрастающего дефицита реактивной мощности в сети, причем процесс этот может прекратиться лишь после отключения части электроприемников.

Поэтому в режиме, наступающем после того, как напряжение станет меньше критического (несколько секунд), допускается использовать описание статических характеристик узла нагрузки в виде

$$P_{*н} = 0,4U_*^2; \quad Q_{*н} = 2,4U_*^2. \quad (14.41)$$

В послеаварийном режиме, когда часть электроприемников отключается, при значениях напряжения выше критического можно считать, что вид статических характеристик узла нагрузки совпадает с исходными характеристиками, пересчитанными на оставшуюся часть нагрузки (индексом «штрих» здесь отмечены показатели послеаварийного режима):

$$\left. \begin{aligned} P'_{*н}(U_*, \omega_*) &= (P'_n/P_n) P_{*н}(U_*, \omega_*); \\ Q'_{*н}(U_*, \omega_*) &= (Q'_n/Q_n) Q_{*н}(U_*, \omega_*), \end{aligned} \right\} (14.42)$$

где P_n'/P_n — относительная доля потребляемой активной мощности оставшейся частью электроприемников узла нагрузки; Q_n'/Q_n — относительная доля потребляемой реактивной мощности в послеаварийном режиме.

На основе рассмотренной модели узла нагрузки оценку статической устойчивости узла комплексной нагрузки выполняют с использованием косвенных критериев устойчивости (14.9) и (14.10) по методике, изложенной в п. 14.3.

14.6. Примеры расчетов

Пример 14.1. Определить параметры предельного режима по статической устойчивости для группы электроприемников, состоящей из четырех асинхронных двигателей типа АЗ-13-59-6, которые питаются через ЛЭП от ГПП (рис. 14.8). Исходные данные для расчета указаны на рисунке.

Решение. Предварительно рассчитываем параметры элементов электропередачи и параметры нагрузки, приведенные к базисному напряжению $U_0 = 6$ кВ и базисной мощности

$$S_0 = S_{a,дв.ном} = 4P_{ном}/(\eta \cos \varphi_{ном}) = 4 \cdot 0,8/(0,935 \cdot 0,9) = 3,8 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Сопrotивление трансформатора

$$x_{*тр} = u_k S_0 / (100 S_{тр.ном}) = 10,5 \cdot 3,8 / (100 \cdot 40) = 0,01.$$

Сопrotивление ЛЭП

$$x_{*л} = x_0 l S_0 / U_0^2 = 0,319 \cdot 6 \cdot 3,8 / 6^2 = 0,202.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния магнитной цепи двигателя

$$x_{*s} = 1 / (2m_{\max} \cos \varphi_{ном}) = 1 / (22,2 \cdot 0,9) = 0,253.$$

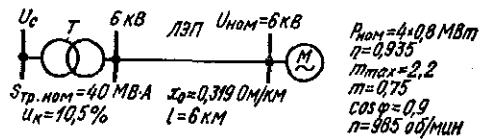


Рис. 14.8. К примеру 14.1

Активная мощность, потребляемая в исходном режиме двигателями,

$$P_* = 4mP_{дв.ном}/S_0 = 4 \cdot 0,75 \cdot 0,8 / 3,8 = 0,632.$$

Активное сопротивление ротора двигателя в исходном режиме (упрощенная схема замещения асинхронного двигателя)

$$P_* = U_{*0}^2 (r_2/s) / [x_{*s}^2 + (r_2/s)^2] \Rightarrow 0,632 = 1^2 (r_2/s) / [0,253^2 + (r_2/s)^2],$$

откуда

$$r_2/s = 1,54.$$

Реактивная мощность, потребляемая в исходном режиме двигателями,

$$Q_* = [P_* / (r_2/s)] x_{*s} = (0,632 / 1,54) \cdot 0,253 = 0,104.$$

Напряжение на шинах системы в исходном режиме

$$U_{*c0} = \sqrt{(U_{*0} + Q_* x_{*вн} / U_{*0})^2 + (P_* x_{*вн} / U_{*0})^2} = \sqrt{(1 + 0,104 \cdot 0,212)^2 + (0,632 \cdot 0,212)^2} = 1,031.$$

Напряжение на шинах системы, при котором происходит затормаживание двигателей,

$$U_{*c.кр} = \sqrt{2P_* (x_{*s} + x_{*вн})} = \sqrt{2 \cdot 0,632 (0,253 + 0,01 + 0,202)} = 0,766.$$

Запас устойчивости по напряжению

$$K_{эУ} = (U_{*c0} - U_{*c.кр}) \cdot 100 / U_{*c0} = (1,031 - 0,766) \cdot 100 / 1,031 = 25,7 \%.$$

Пример 14.2. На рис. 14.9 изображена схема питания синхронного двигателя типа СНД-18-61-20. Определить максимально допустимую нагрузку двигателя, исходя из условия сохранения его статической устойчивости, и запас статической устойчивости двигателя в нормальном режиме. Исходные данные для расчета указаны на рисунке.

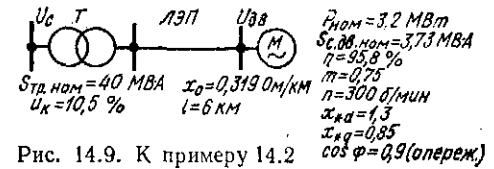


Рис. 14.9. К примеру 14.2

Решение. Параметры элементов схемы и параметры режима двигателя приводим к базисным значениям напряжения $U_0 = 6$ кВ ($U_{*0} = 1$) и мощности $S_0 = S_{с.дв.ном} = 3,73$ МВ · А.

Сопrotивление трансформатора

$$x_{*тр} = u_k S_0 / (100 S_{тр.ном}) = 10,5 \cdot 3,73 / (100 \cdot 40) = 0,0098.$$

Сопrotивление ЛЭП

$$x_{*л} = x_0 l S_0 / U_0^2 = 0,319 \cdot 6 \cdot 3,73 / 6^2 = 0,198.$$

Сопrotивления двигателя

$$x_{*d} = x_{*дв.ном} S_0 / S_{с.дв.ном} = 1,3;$$

$$x_{*q} = x_{*q.ном} S_0 / S_{с.дв.ном} = 0,85.$$

Активная и реактивная нагрузки двигателя

$$P_{*0} = m P_{ном} / S_0 = 0,75 \cdot 3,2 / 3,73 = 0,643;$$

$$Q_{*0} = P_{*0} \operatorname{tg} \varphi = 0,643 \operatorname{tg} (\arccos 0,9) = -0,312.$$

Напряжение в системе для исходного режима

$$U_{*c0} = \sqrt{(U_{*0} + Q_{*0} x_{*вн} / U_{*0})^2 + (P_{*0} x_{*вн} / U_{*0})^2} = \sqrt{[1 + 0,312 (0,098 + 0,198) / 1]^2 + [0,643 (0,098 + 0,198) / 1]^2} = 1,07.$$

Электродвижущая сила двигателя в исходном режиме

$$E_{*q} = [U_{*0}^4 - U_{*0}^2 Q_{*0} (x_{*q} + x_{*d}) + (P_{*0}^2 + Q_{*0}^2) x_{*q} x_{*d}] / (U_{*0} \sqrt{U_{*0}^4 - 2U_{*0}^2 Q_{*0} x_{*q} + (P_{*0}^2 + Q_{*0}^2) x_{*q}^2}) = [1^4 - 1^2 \cdot 0,312 (0,85 + 1,3) + (0,643^2 + 0,312^2) \times \times 0,85 \cdot 1,3] / (1 \sqrt{1^4 + 2 \cdot 1^2 \cdot 0,312 \cdot 0,85 + (0,643^2 + 0,312^2) \cdot 0,85^2}) = 1,61.$$

Максимальное значение активной мощности в системе

$$P_{*max} = U_{*c0} E_{*q} / (x_{*d} + x_{*вн}) = 1,07 \cdot 1,61 (1,3 + 0,208) = 1,14.$$

Значение напряжения в системе, соответствующее границе статической устойчивости двигателя,

$$U_{*c.кр} = P_{*0} (x_{*d} + x_{*вн}) / E_{*q} = 0,643 (1,3 + 0,208) / 1,61 = 0,602.$$

Запас статической устойчивости двигателя по напряжению

$$K_{эУ} = (U_{*c0} - U_{*c.кр}) \cdot 100 / U_{*c0} = (1,07 - 0,602) \cdot 100 / 1,07 = 47,7 \%.$$

Пример 14.3. Пользуясь результатами, полученными в двух предыдущих примерах, оценить изменение статической устойчивости узлов нагрузки в зависимости от параметров электропередачи.

Решение. Зависимости параметров режима от сопротивления электропередачи на основе выполненных в предыдущих примерах расчетов описываются уравнениями:

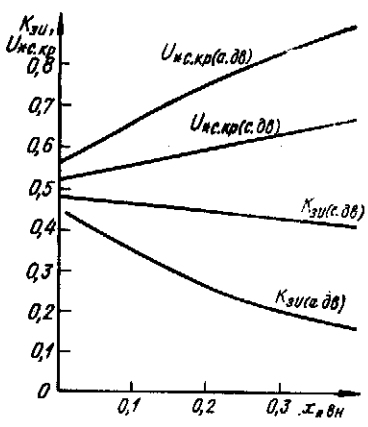


Рис. 14.10. К примеру 14.3

для узла нагрузки с асинхронными двигателями

$$U_{*с0} = \sqrt{(1 + 0,104x_{*вн})^2 + 0,399x_{*вн}^2}$$

$$U_{*с.кр} = \sqrt{0,32 + 1,264x_{*вн}}$$

для узла нагрузки с синхронным двигателем

$$U_{*с0} = \sqrt{(1 + 0,312x_{*вн})^2 + 0,413x_{*вн}^2}$$

$$U_{*с.кр} = 0,519 + 0,399x_{*вн}$$

Результаты расчета этих зависимостей сведены в табл. 14.3 и отражены на рис. 14.10. Видно, что узел нагрузки с синхронным двигателем сохраняет более высокие значения предельных параметров режима по статической устойчивости при увеличении сопротивления электропередачи, чем узел нагрузки с асинхронными двигателями.

Пример 14.4. Оценить условия статической устойчивости нагрузки распределительного пункта с напряжением 6 кВ, который подключен к ГПП завода посредством КЛ и питает шесть асинхронных двигателей типа АЗ-13-62-8, а также четыре синхронных двигателя типа СДЗ-13-34-6А (рис. 14.11, а). Исходные данные для расчета указаны на рисунке.

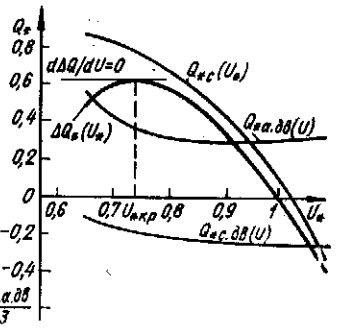
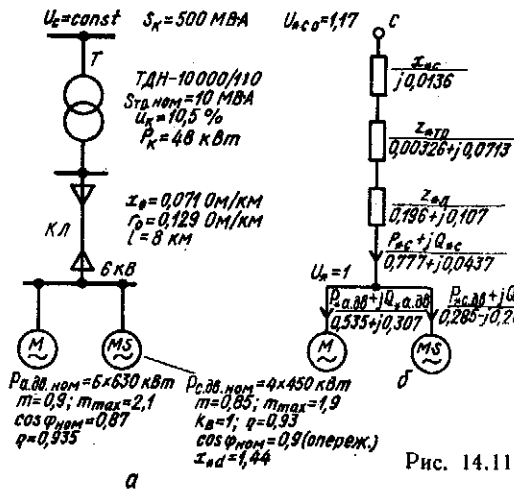


Рис. 14.11. К примеру 14.4

Решение. Составляем схему замещения сети (рис. 14.11, б) и определяем параметры ее элементов в относительных единицах, используя точное приведение к базисным условиям $U_6 = 6$ кВ и

$$S_6 = 6S_{а.дв.ном} + 4S_{с.дв.ном} = 6 \cdot 0,63 / (0,935 \cdot 0,87) + 4 \cdot 0,45 / (0,93 \cdot 0,9) = 6,8 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Сопротивление связи ГПП с питающей электрической системой $x_{*с} = S_6 / S_{тк} = 6,8 / 500 = 0,0136.$

Сопротивления трансформатора

$$|z_{*тр}| = u_{к} S_6 / (100 S_{тр.ном}) = 10,5 \cdot 6,8 / (100 \cdot 10) = 0,0714;$$

$$r_{*тр} = \Delta P_{к} S_6 / S_{тр.ном}^2 = 0,048 \cdot 6,8 / 10^2 = 0,0026;$$

$$x_{*тр} = \sqrt{z_{*тр}^2 - r_{*тр}^2} = \sqrt{0,0714^2 - 0,00326^2} = 0,0713.$$

Сопротивления КЛ

$$r_{*л} = r_0 S_6 / U_6^2 = 0,129 \cdot 8 \cdot 6,8 / 6^2 = 0,195;$$

$$x_{*л} = x_0 S_6 / U_6^2 = 0,071 \cdot 8 \cdot 6,8 / 6^2 = 0,107.$$

Результирующие сопротивления питающей сети

$$r_{*вн} = 0,00326 + 0,195 = 0,1983;$$

$$x_{*вн} = 0,0136 + 0,0713 + 0,107 = 0,1919.$$

Таблица 14.3. Результаты расчета параметров режима работы двигателей

Сопротивление трансформатора и КЛ	$x_{*вн}$	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
Узел с асинхронными двигателями	$U_{*с0}$	1,0	1,006	1,012	1,02	1,029	1,038	1,048	1,06	1,072
	$U_{*с.кр}$	0,566	0,619	0,668	0,714	0,757	0,797	0,836	0,873	0,909
	$K_{сУ}$	0,434	0,385	0,34	0,3	0,267	0,232	0,202	0,176	0,152
Узел с синхронным двигателем	$U_{*с0}$	1,0	1,016	1,033	1,051	1,07	1,09	1,11	1,13	1,154
	$U_{*с.кр}$	0,519	0,539	0,559	0,579	0,598	0,618	0,638	0,658	0,678
	$K_{сУ}$	0,481	0,469	0,459	0,449	0,441	0,433	0,425	0,418	0,412

Параметры эквивалентного асинхронного двигателя: для номинального режима

$$S_{*а.дв.ном} = (6 \cdot 0,63 / 0,935 \cdot 0,87) / 6,8 = 0,684;$$

$$P_{*а.дв.ном} = P_{а.дв.ном} / (\eta S_6) = 6 \cdot 0,63 / (0,935 \cdot 6,8) = 0,595;$$

$$Q_{*а.дв.ном} = P_{*а.дв.ном} \operatorname{tg} \varphi_{ном} = 0,595 \operatorname{tg} (\arccos 0,87) = 0,337;$$

для исходного режима ($U_{*6} = 1$)

$$P_{*а.дв} = m P_{*а.дв.ном} = 0,9 \cdot 0,595 = 0,535;$$

$$Q_{*а.дв} = Q_{*а.дв.ном} (c + m / (\operatorname{tg} \varphi_{ном} (m_{\max} / m + \sqrt{m_{\max}^2 / m^2 - 1}))),$$

где

$$c = 1 - 1 / ((m_{\max} + \sqrt{m_{\max}^2 - 1}) \operatorname{tg} \varphi_{ном}) = 1 - 1 / ((2,1 + \sqrt{2,1^2 - 1}) \operatorname{tg} (\arccos 0,87)) = 0,553;$$

$$Q_{*а.дв} = 0,337 (0,553 + 0,9 / (0,56 (2,1 / 0,9 + \sqrt{2,1^2 / 0,9^2 - 1}))) = 0,307.$$

Параметры эквивалентного синхронного двигателя: для номинального режима

$$S_{*с.дв.ном} = (4 \cdot 0,45 / (0,93 \cdot 0,9)) / 6,8 = 0,316;$$

$$P_{*с.дв.ном} = P_{с.дв.ном} / (\eta S_6) = 4 \cdot 0,45 / (0,93 \cdot 6,8) = 0,285;$$

Таблица 14.4. Результаты расчета составляющих баланса реактивной мощности в узле нагрузки

U_*	0,6	0,66	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95
$Q_{*с}$	0,9	0,87	0,84	0,775	0,68	0,56	0,41	0,33
$Q_{*а.дв}$	—	0,53	0,41	0,35	0,32	0,31	0,304	0,303
$Q_{*с.дв}$	0,137	0,166	0,183	0,201	0,217	0,232	0,244	0,254
ΔQ_*	—	0,506	0,613	0,623	0,577	0,482	0,35	0,28

для исходного режима ($U_{*0} = 1$)

$$P_{*с.дв} = mP_{с.дв.ном} = 0,85 \cdot 0,285 = 0,242;$$

$$Q_{*с.дв} = S_{*с.дв.ном} \sqrt{(k_b/k_{в.х})^2 - (x_{*d}P_{*с.дв}/S_{*с.дв.ном})^2} - 1/x_{*d},$$

где

$$k_{в.х} \approx 1/(x_{*d}m_{\max} \cos \varphi_{ном}) = 1/(1,44 \cdot 1,9 \cdot 0,9) = 0,406;$$

$$Q_{*с.дв} = 0,316 \sqrt{(1/0,406)^2 - (1,44 \cdot 0,242/0,316)^2} - 1/1,44 = 0,263,$$

Мощность, которая поступает в узел нагрузки от ГПП,

$$P_{*с} = P_{*а.дв} + P_{*с.дв} = 0,535 + 0,242 = 0,777;$$

$$Q_{*с} = Q_{*а.дв} - Q_{*с.дв} = 0,307 - 0,263 = 0,0437.$$

Напряжение на шинах ГПП в исходном режиме ($U_{*с0} = \text{const}$)

$$U_{*с0} = \sqrt{1 + (0,777 \cdot 0,1983 + 0,0437 \cdot 0,1919)/1)^2 + \dots + (0,777 \cdot 0,1919 - 0,0437 \cdot 0,1983)^2} = 1,17.$$

Изменение напряжения в узле нагрузки приводит к нарушению баланса реактивной мощности. Найдем составляющие реактивной мощности в узле нагрузки:

реактивная мощность, поступающая от ГПП, согласно (14.13)

$$Q_{*с}(U_*) = (U_*^2 - 0,777 \cdot 0,1983 + \sqrt{1,17^2 U_*^2 - 0,777^2 \cdot 0,1919^2})/0,1919 \Rightarrow Q_{*с}(U_*) = 5,21 (-U_*^2 - 0,154 + \sqrt{1,37U_*^2 - 0,0222});$$

реактивная мощность эквивалентного асинхронного двигателя согласно (14.15, б)

$$Q_{*а.дв}(U_*) = 0,337 [0,553U_*^2 + 0,9/(0,567 (2,1U_*^2/0,9 + \sqrt{2,1^2U_*^4/0,9^2 - 1}))] \Rightarrow Q_{*а.дв}(U_*) = 0,186U_*^2 + 0,535/(2,33U_*^2 + \sqrt{5,44U_*^4 - 1});$$

реактивная мощность эквивалентного синхронного двигателя согласно (14.23)

$$Q_{*с.дв}(U_*) = 0,316 \sqrt{U_*^2/0,406^2 - (1,44 \cdot 0,242/0,316)^2} - U_*^2/1,44 \Rightarrow Q_{*с.дв}(U_*) = 0,219 (\sqrt{6,067U_*^2 - 1,216} - U_*^2).$$

Результаты расчета этих составляющих сведены в табл. 14.4. Из их графического анализа по критерию $d\Delta Q/dU_* = 0$, показанного на рис. 14.11, а,

при различных значениях напряжения

	1,0	1,05	1,1	1,15
	0,04	-0,19	-0,44	-0,72
	0,307	0,313	0,323	0,335
	0,263	0,271	0,28	0,282
	0	-0,232	-0,483	-0,773

следует, что критическое напряжение в узле нагрузки $U_{*кр} = 0,73$. Запас статической устойчивости $K_{сU} = 100(1 - 0,73)/1 = 27\%$.

Пример 14.5. Установить изменение условий статической устойчивости по напряжению узла нагрузки с девятью асинхронными двигателями (рис. 14.12, а) при включении конденсаторной батареи, которая имеет в исходном режиме мощность, равную компенсирующей способности синхронных двигателей из предыдущего примера. Исходные данные для расчета указаны на рисунке; активная мощность, потребляемая узлом нагрузки, и параметры внешней сети в именованных единицах соответствуют данным, приведенным в предыдущем примере.

Решение. За базисные принимаем условия для шин узла нагрузки:

$$U_{*0} = U/U_0 = 6/6 = 1; S_0 = P_{а.дв.ном}/(\eta \cos \varphi_{ном}) = 9 \cdot 0,63/(0,935 \cdot 0,89) = 6,8 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Так как численные значения базисных величин совпадают с принятыми в примере 14.4, то и параметры внешней сети будут те же:

$$z_{*вн} = 0,1983 + j0,1919.$$

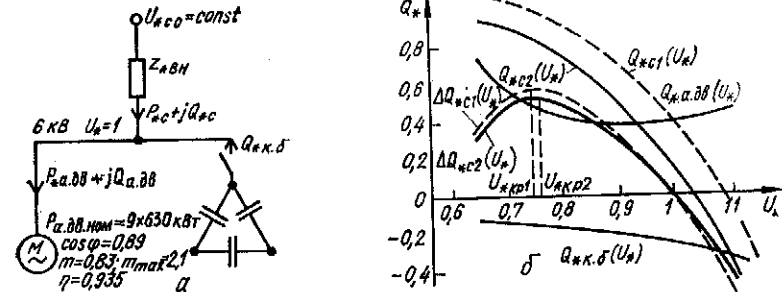


Рис. 14.12. К примеру 14.5

Параметры эквивалентного асинхронного двигателя для номинального режима

$$P_{*а.дв.ном} = P_{а.дв.ном}/(\eta S_0) = 9 \cdot 0,63/(0,935 \cdot 6,8) = 0,892;$$

$$Q_{*а.дв.ном} = P_{*а.дв.ном} \operatorname{tg} \varphi_{ном} = 0,892 \operatorname{tg} (\arccos 0,89) = 0,457;$$

для исходного режима

$$P_{*а.дв} = mP_{*а.дв.ном} = 0,87 \cdot 0,892 = 0,777;$$

$$Q_{*а.дв} = Q_{*а.дв.ном} [c + m/(m_{\max}/m + \sqrt{m_{\max}^2/m^2 - 1}) \operatorname{tg} \varphi_{ном}],$$

де

$$c \approx 1 - 1/((m_{\max} + \sqrt{m_{\max}^2 - 1}) \operatorname{tg} \varphi_{ном}) = 1 - 1/((2,1 + \sqrt{2,1^2 - 1}) \cdot 0,512) = 0,505;$$

$$Q_{*а.дв} = 0,457 [0,505 + 0,87/((2,1/0,87 + \sqrt{2,1^2/0,87^2 - 1}) \cdot 0,512)] = 0,399.$$

Активная мощность, которая поступает в узел нагрузки от ГПП,

$$P_{*c} = P_{*a,дв} = 0,777.$$

а реактивная мощность (при отсутствии компенсации ее в узле нагрузки)

$$Q_{*c1} = Q_{*a,дв} = 0,399.$$

Реактивная мощность при подключении конденсаторной батареи к узлу нагрузки

$$Q_{*c2} = Q_{*a,дв} - Q_{*к.б} = 0,399 - 0,263 = 0,136.$$

Напряжение на шинах ГПП в исходном режиме: при отсутствии компенсации реактивной мощности

$$U_{*c0,1} = \sqrt{(1 + (0,777 \cdot 0,198 + 0,399 \cdot 0,192))^2 + (0,777 \cdot 0,192 - \dots - 0,399 \cdot 0,198)^2} = 1,23;$$

при подключении конденсаторной батареи

$$U_{*c0,2} = \sqrt{(1 + (0,777 \cdot 0,198 + 0,136 \cdot 0,192))^2 + (0,777 \cdot 0,192 - \dots - 0,136 \cdot 0,198)^2} = 1,186.$$

Реактивная мощность, поступающая от ГПП,

$$Q_{*c1}(U_*) = 5,21(-U_*^2 - 0,154 + \sqrt{1,52U_*^2 - 0,0222});$$

$$Q_{*c2}(U_*) = 5,21(-U_*^2 - 0,154 + \sqrt{1,41U_*^2 - 0,0222}).$$

Реактивная мощность эквивалентного асинхронного двигателя

$$Q_{*a,дв}(U_*) = 0,457(0,505U_*^2 + 0,87/(0,512(2,1U_*^2/0,87 + \sqrt{2,1^2U_*^4/0,87^2 - 1}))) \Rightarrow Q_{*a,дв}(U_*) = 0,231U_*^2/0,777/(2,41U_*^2 + \sqrt{5,83U_*^4 - 1}).$$

Реактивная мощность, вырабатываемая конденсаторной батареей,

$$Q_{*к.б}(U_*) = Q_{*к.б,ном}U_*^2 = 0,263U_*^2.$$

Результаты расчета составляющих баланса реактивной мощности при различных напряжениях в узле нагрузки сведены в табл. 14.5 и отражены на рис. 14.12, б.

Таблица 14.5. Результаты расчета составляющих баланса реактивной мощности при различных значениях напряжения в узле нагрузки

U_*	Q_{*c1}	Q_{*c2}	$Q_{*a,дв}$	$Q_{*к.б}$	ΔQ_{*c1}	ΔQ_{*c2}
0,65	1,10	0,94	0,73	0,11	0,32	0,37
0,7	1,07	0,91	0,54	0,13	0,50	0,53
0,75	1,02	0,84	0,47	0,15	0,52	0,55
0,8	0,94	0,75	0,43	0,17	0,49	0,51
0,85	0,84	0,63	0,41	0,19	0,41	0,43
0,9	0,75	0,48	0,40	0,20	0,30	0,31
0,95	0,55	0,32	0,397	0,24	0,163	0,15
1,0	0,399	0,136	0,399	0,263	0	0

U_*	Q_{*c1}	Q_{*c2}	$Q_{*a,дв}$	$Q_{*к.б}$	ΔQ_{*c1}	ΔQ_{*c2}
1,05	0,15	-0,10	0,41	0,29	-0,22	-0,26
1,1	-0,08	-0,35	0,42	0,318	-0,45	-0,50
1,15	-0,35	-0,62	0,43	0,35	-0,70	-0,78

Из уравнений

$$\Delta Q_{*c1} = Q_{*c1} - Q_{*a,дв}; \quad \Delta Q_{*c2} = Q_{*c2} + Q_{*к.б} - Q_{*a,дв}$$

находим значения критического напряжения: при отсутствии компенсации $U_{*кр1} = 0,745$; при включении конденсаторной батареи $U_{*кр2} = 0,76$.

Таким образом, включение конденсаторной батареи снижает требования к уровню напряжения на шинах ГПП, но ухудшает условия статической устойчивости узла нагрузки: запас устойчивости снижается с $K_{зU1} = 100(1 - 0,745) = 25,5\%$ до $K_{зU2} = 100(1 - 0,76) = 24\%$.

Сравнение этих результатов с результатами, полученными в предыдущем примере, показывает, что замена части асинхронных двигателей синхронными более предпочтительна для снижения требований к уровню напряжения на шинах ГПП и обеспечения достаточного запаса статической устойчивости узла нагрузки.

Контрольные вопросы

1. Какие расчетные модели узла нагрузки используются для анализа его статической устойчивости?
2. По каким критериям может быть замещена расчетная модель узла нагрузки?
3. Как влияют параметры электрической сети на критические показатели, характеризующие устойчивость электродвигателей?
4. Каково влияние АРВ синхронных двигателей на условия их статической устойчивости?
5. Как изменится устойчивость узла с асинхронной нагрузкой при компенсации ее реактивной составляющей статическими конденсаторами и синхронными компенсаторами?
6. Что представляют собой статические характеристики узла комплексной нагрузки?
7. Какова суть понятия регулирующего эффекта нагрузки?
8. Что такое лавина напряжения и каковы причины ее возникновения?
9. По каким критериям оценивается статическая устойчивость узла комплексной нагрузки?

Темы рефератов

1. Составление расчетной модели узла нагрузки.
2. Нарушение устойчивости узла асинхронной нагрузки.
3. Влияние размещения ИРМ в распределительной сети на устойчивость СЭС.
4. Оценка статической устойчивости СЭС с регулированием напряжения трансформаторами.
5. Обобщенные характеристики нагрузки.

УСТОЙЧИВОСТЬ УЗЛОВ НАГРУЗКИ ПРИ СИЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ

15.1. Резкие изменения параметров режима в узлах системы электроснабжения

К резким изменениям режима работы СЭС, которые могут нарушить ее устойчивость, приводят разные причины:

1) аварии и перегрузки в распределительных или питающих сетях, когда в начальный момент времени t_0 напряжение резко уменьшается со значения U_0 до U_1 , а затем через время t_1 вновь восстанавливается до значения U_0 (рис. 15.1, а);

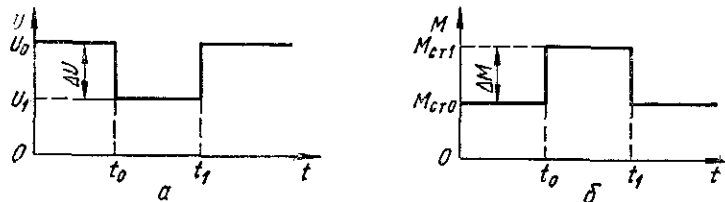


Рис. 15.1. Изменения режима работы СЭС при снижении напряжения на ΔU (а) и увеличении момента сопротивления на ΔM (б)

2) отключение узла нагрузки с последующим включением его через время t_1 , когда в течение времени от t_0 до t_1 наступает перерыв в электроснабжении потребителей ($U_1 = 0$);

3) изменение момента сопротивления при увеличении нагрузки на приводимом двигателем механизме ($M_{ст1} > M_{ст0}$) или при уменьшении ее ($M_{ст1} < M_{ст0}$) с последующим восстановлением прежнего момента $M_{ст0}$ через время t_1 (рис. 15.1, б).

Резкие изменения параметров режима могут быть вызваны толчкообразными электрическими нагрузками при появлении резкопеременных моментов сопротивления на валах синхронных и асинхронных двигателей прокатных станов и подъемных кранов, а также толчками нагрузки при работе дуговых плавильных печей, трубопрокатных и трубосварочных станов, которые приводят к отклонениям и колебаниям напряжения, изменениям его фазы по отношению к источнику питания и т. д.

В тех случаях, когда изменения параметров режима, характеризующие качество электрической энергии у потребителей, выходят за допустимые пределы, необходимы специальные меры, направленные на устранение отрицательного влияния толчкообразной нагрузки на работу СЭС. Это особенно важно при питании электродвигателей от источников соизмеримой с ними мощности.

Исследование переходных процессов в СЭС, содержащей двигатели с переменной нагрузкой, сводится к решению системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих движение ро-

торов двигателей и генераторов, изменения токов и напряжений в системе.

Методика расчета переходного процесса в СЭС основывается на следующих дополнительных упрощающих предположениях:

1) нагрузка на валу электродвигателя изменяется строго периодически (рис. 15.2, а), циклически (рис. 15.2, б) или случайным образом (рис. 15.2, в);

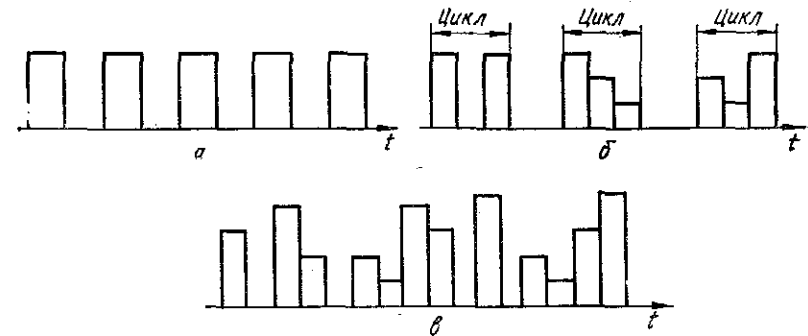


Рис. 15.2. Графики периодического (а), циклического (б) и случайного (в) изменений нагрузки

2) переходный процесс рассматривается при постоянстве э. д. с. генераторов $E_q \approx E' = \text{const}$ за переходным сопротивлением;

3) сопротивление асинхронных двигателей и другой нагрузки в момент коммутации постоянно;

4) действие демпферного момента синхронного двигателя и регулятор частоты вращения первичных двигателей (турбин электростанций) не учитывается.

Характерным переходным процессом, который оказывает существенное влияние на режим работы узла нагрузки, является про-

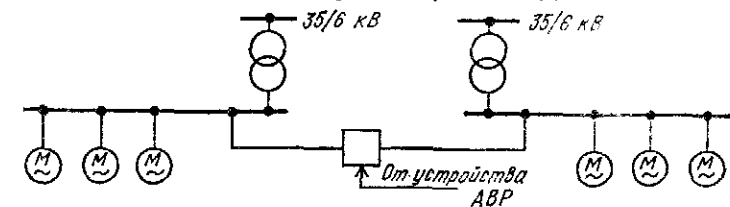


Рис. 15.3. Схема подстанции с АВР сборных шин

цесс, возникающий при АПВ и переходящих КЗ. Если на какой-либо подстанции выходит из строя один из ее трансформаторов, то питающиеся от него узлы двигательной нагрузки могут быть переключены на другой трансформатор подстанции (рис. 15.3), что резко повышает его нагрузку, вызывает снижение напряжения в СЭС и, как следствие, уменьшение вращающих моментов тех электродвигателей, которые работали до переключения. Часто встречающимися переходными процессами в узлах нагрузки являются процессы, связанные с пуском электродвигателей.

15.2. Наброс нагрузки на электродвигатели

Рассмотрим вначале наброс нагрузки на синхронный двигатель, что характерно для двух режимов его работы: снижения питающего напряжения и увеличения момента сопротивления.

Предположим, что произошло резкое снижение напряжения от U_0 до U_1 и соответственно изменилась угловая характеристика мощности двигателя (рис. 15.4, а). При этом новый установившийся режим (точка с) наступает после цикла качаний ротора двигателя.

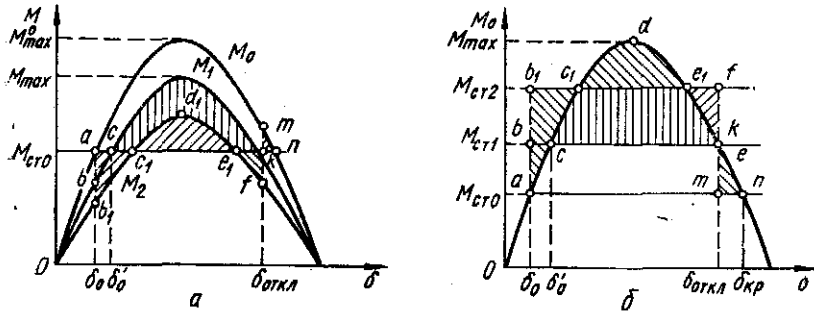


Рис. 15.4. Угловые характеристики мощности синхронного двигателя при уменьшении напряжения (а) и увеличении момента сопротивления (б)

В данном случае площадь ускорения меньше площади торможения, в результате чего система остается устойчивой.

При снижении напряжения до U_2 система переходит на характеристику M_2 (б) и оказывается неустойчивой. Чтобы сохранить устойчивость, необходимо повысить напряжение до U_0 . Для этого, используя метод площадей, надо так подобрать угол δ , чтобы сумма площадей ускорения была меньше суммы площадей торможения:

$$|F_{ab,c_1} + F_{e_1,fk}| < |F_{c_1,e,d_1} + F_{knm}|. \quad (15.1)$$

В общем случае снижения напряжения от U_0 до U_1 (моментов от M_0 до M_1) предельный угол, при котором нужно восстановить напряжение, определяется правилом площадей:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{откл}} (M_{ст0} - M_{\max}^{(1)} \sin \delta) d\delta - \int_{\delta_{откл}}^{\delta_{кр}} (M_{\max}^{(0)} \sin \delta - M_{ст0}) d\delta = 0. \quad (15.2)$$

После интегрирования (15.2) получим

$$M_{ст0} (\delta_{откл} - \delta_0) + M_{\max}^{(1)} \cos \delta_{откл} - M_{\max}^{(1)} \cos \delta_0 + M_{\max}^{(0)} \cos \delta_{кр} - M_{\max}^{(0)} \cos \delta_{откл} + M_{ст0} (\delta_{кр} - \delta_{откл}) = 0,$$

или

$$(M_{\max}^{(0)} - M_{\max}^{(1)}) \cos \delta_{откл} = M_{ст0} (\delta_{кр} - \delta_0) + M_{\max}^{(0)} \cos \delta_{кр} - M_{\max}^{(1)} \cos \delta_0,$$

откуда

$$\delta_{откл} = \arccos [M_{ст0} (\delta_{кр} - \delta_0) + M_{\max}^{(0)} \cos \delta_{кр} - M_{\max}^{(1)} \cos \delta_0] / (M_{\max}^{(0)} - M_{\max}^{(1)}). \quad (15.3)$$

При увеличении нагрузки на валу двигателя процесс протекает следующим образом. Если наброс момента сопротивления происходит от значения $M_{ст0}$ до $M_{ст1}$, то система будет устойчива, так как площадь ускорения меньше площади торможения (рис. 15.4, б).

При увеличении момента до $M_{ст2}$ система оказывается неустойчивой, поскольку площадь ускорения ab_1c_1 больше площади торможения c_1de_1 . Для сохранения устойчивости нужно снизить момент от $M_{ст2}$ до $M_{ст0}$ при значении угла δ , не превышающем предельного значения по условию устойчивости.

В случае наброса момента сопротивления от $M_{ст0}$ до некоторого значения $M_{ст}$, приводящего к нарушению устойчивости при неизменном питающем напряжении, предельный угол отключения двигателя можно найти из уравнения, составленного по методу площадей:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{откл}} (M_{ст} - M_{\max}^{(0)} \sin \delta) d\delta - \int_{\delta_{откл}}^{\delta_{кр}} (M_{\max}^{(0)} \sin \delta - M_{ст0}) d\delta = 0. \quad (15.4)$$

После интегрирования (15.4) и преобразований получим

$$\delta_{откл} = [M_{ст} \delta_0 - M_{ст0} \delta_{кр} - M_{\max}^{(0)} (\cos \delta_{кр} - \cos \delta_0)] / (M_{ст} - M_{ст0}). \quad (15.5)$$

При исследовании устойчивости синхронного двигателя практическое значение имеет предельное время наброса нагрузки на двигатель, работавший в предшествующий момент времени в номинальном или любом другом режиме, т. е. время, в течение которого допустимо понижение питающего напряжения или увеличение момента сопротивления. Это время можно определить, пользуясь методом последовательных интервалов либо упрощенным методом, при котором синусоида аппроксимируется прямой, проходящей через точки угловой характеристики мощности с углами δ_0^1 и $\delta_{откл}$.

Предельное время $t_{пр}$ при использовании упрощенного метода (рис. 15.5, а) определяется из уравнения переходного процесса при набросе нагрузки

$$T_J (d^2\delta/dt^2) = M_0 - M_{\max}^{(1)} \sin \delta, \quad (15.6)$$

которое после введения новых параметров $\tau = t \sqrt{M_{\max}^{(1)}/T_J}$ и $M_* = M_0/M_{\max}^{(1)}$ принимает вид

$$d^2\delta/d\tau^2 = M_* - \sin \delta, \quad (15.7)$$

где M_* — постоянное значение приведенного момента.

Решение уравнения (15.7) представляет большую трудность, так как синусоидальную функцию $\delta = f(\tau)$ нельзя выразить через конечную комбинацию известных трансцендентных величин.

Однако его можно проинтегрировать, если синусоиду заменить отрезком прямой bc (см. рис. 15.5, a). В этом случае разность между приведенным моментом M_* и электромагнитным моментом, равным $\sin \delta$, представляет относительное ускорение $\Delta M_* = M_* - \sin \delta$, которое на рис. 15.5, a обозначено отрезком $1-2$.

Заменив участок синусоиды $b2c$ соответствующим отрезком прямой, получим

$$\Delta M_* = (\delta_k - \delta) \operatorname{tg} \varepsilon, \quad (15.8)$$

где

$$\operatorname{tg} \varepsilon = (\sin \delta_{\text{откл}} - \sin \delta_0^1) / (\delta_{\text{откл}} - \delta_0^1) = c.$$

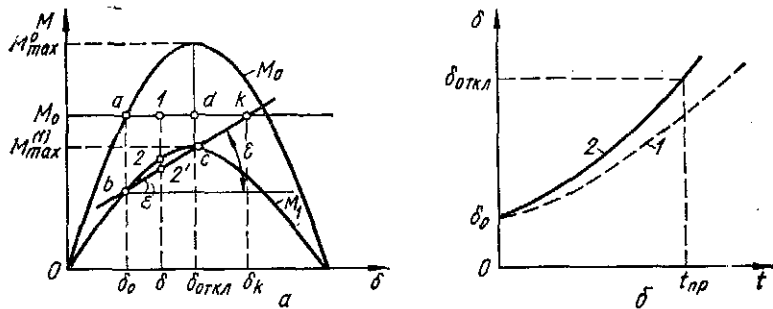


Рис. 15.5. Угловые характеристики мощности синхронного двигателя (a) и изменение угла δ при синусоидальной угловой характеристике (кривая I) и ее аппроксимации прямой (кривая 2)

Таким образом, уравнение (15.7) заменяется уравнением

$$d^2\delta/dt^2 = c\delta_k - c\delta. \quad (15.9)$$

Это уравнение легко интегрируется при начальных условиях $\delta_0 = \delta_0^1, \tau_0 = 0$. При этом

$$\delta = \delta_k - (\delta_k - \delta_0^1) \cos(\tau \sqrt{c}), \quad (15.10)$$

или

$$\cos(\tau \sqrt{c}) = (\delta_k - \delta) / (\delta_k - \delta_0^1).$$

Подставив $\delta_{\text{откл}}$ вместо δ , определим предельное время наброса нагрузки

$$\tau = (1/\sqrt{c}) \arccos(\delta_k - \delta_{\text{откл}}) / (\delta_k - \delta_0^1). \quad (15.11)$$

С учетом значений τ и c , а также замены

$$(\delta_k - \delta_{\text{откл}}) / (\delta_k - \delta_0^1) = (M_0 - M_{\text{max}}^{(1)} \sin \delta_{\text{откл}}) / (M_0 - M_{\text{max}}^{(1)} \sin \delta_0^1),$$

что следует из подобия треугольников akb и dkc ($kd/ka = dc/ab$), окончательно запишем

$$t_{\text{пр}} = [T_J (\delta_{\text{откл}} - \delta_0^1) / M_{\text{max}}^{(1)} (\sin \delta_{\text{откл}} - \sin \delta_0^1)] \times \\ \times \arccos [(M_0 / M_{\text{max}}^{(1)} - \sin \delta_{\text{откл}}) / (M_0 / M_{\text{max}}^{(1)} - \sin \delta_0^1)]. \quad (15.12)$$

По кривым рис. 15.5, b , характеризующим изменение угла $\delta = f(t)$ при набросе нагрузки, судят о погрешности аппроксимации синусоиды прямой bc . Таким образом, с приемлемой для инженер-

ных расчетов точностью по формуле (15.12) можно определить допустимое время резкого нарушения режима работы синхронной нагрузки.

Рассмотрим теперь влияние сильных возмущений на работу асинхронной нагрузки. При КЗ скольжение асинхронных двигателей увеличивается, в результате чего после отключения КЗ напряжение в системе может не восстановиться до нормального значения. Это обусловлено тем, что с повышением скольжения возрастает потребление реактивной мощности асинхронным двигателем, а при этом снижается напряжение.

Зависимость электромагнитного момента асинхронного двигателя от скольжения показана на рис. 15.6. При КЗ вращающий момент двигателя резко уменьшается (точка 2 на характеристике III), он начинает тормозиться, а его скольжение возрастает. Если КЗ отключается при скольжении $s_{\text{откл}}$ (точка 3 на той же характеристике), то вращающий момент двигателя снова увеличивается. В момент отключения КЗ процесс отражается точкой 4 на характеристике II , где вращающий момент больше тормозного. Двигатель ускоряется, его скольжение падает, и возникает новый установившийся режим (точка 5 на характеристике I).

Если длительность КЗ велика и оно отключается при скольжении $s_{\text{откл}}$ (за точкой 6 на характеристике II), то увеличение вращающего момента двигателя после отключения повреждения может оказаться недостаточным. Избыточный момент при этом становится тормозящим. Скольжение двигателя возрастает, и он останавливается.

При набросах нагрузки на асинхронный двигатель, вызывающих уменьшение питающего напряжения или увеличение момента на валу, скольжение двигателя повышается. Если при этом момент сопротивления окажется большим, чем максимальный ($M_{\text{ст}} > M_{\text{max}}$), то скольжение двигателя возрастает до значения $s = 1$, и он остановится. Чтобы этого не произошло, нужно своевременно восстановить напряжение или уменьшить момент на валу двигателя.

В нормальном режиме асинхронный двигатель работает при скольжении s_0 и моменте $M_{\text{ст}}$ (точка a на рис. 15.7, a). Предположим, что напряжение на зажимах двигателя снизилось с U_0 до U_1 . При этом электромагнитный момент двигателя уменьшится в U_0/U_1 раз:

$$M_1 = M_0 (U_1/U_0)^2 = 2M_{\text{max}} (U_1/U_0)^2 / (s/s_{\text{кр}} + s_{\text{кр}}/s). \quad (15.13)$$

При снижении электромагнитного момента с M_0 до M_1 двигатель будет тормозиться и остановится. Время, по истечении которого

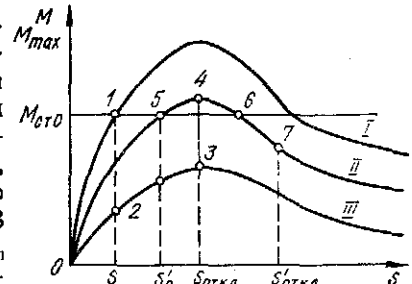


Рис. 15.6. Изменение режима работы асинхронного двигателя при сильных возмущениях

двигатель остановится, и изменение скольжения за это время можно найти, если проинтегрировать уравнение движения двигателя

$$T_J (ds/dt) = M_{ст0} - M_1. \quad (15.14)$$

При этом возникает задача определения предельного времени, в течение которого может снижаться напряжение с U_0 до U_1 без останова двигателя с продолжением его работы при восстановлении напряжения. Для этого скольжение не должно превышать значения, большего чем s_1 (точка b на рис. 15.7, a), поскольку при $s_3 > s_1$ двигатель переходит на неустойчивую часть характеристики, и восстановление питающего напряжения уже не сможет прекратить его торможения и останова.

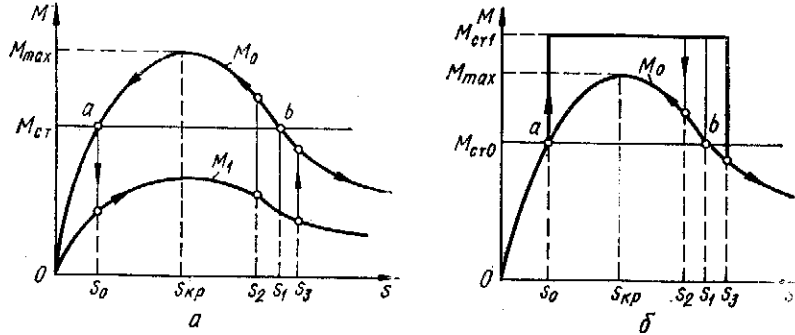


Рис. 15.7. Механические характеристики асинхронного двигателя при снижении питающего напряжения (a) и повышении момента сопротивления (b)

Подставив (15.13) в уравнение (15.14), последнее можно записать в виде

$$T_J (ds/dt) = M_{ст0} - 2M_{max} (U_1/U_0)^2 / (s/s_{кр} + s_{кр}/s),$$

откуда

$$dt = T_J ds / [M_{ст0} - 2M_{max} (U_1/U_0)^2 / (s/s_{кр} + s_{кр}/s)].$$

После интегрирования левой части этого уравнения от $t = 0$ до $t = t_{np}$, а правой от $s_0/s_{кр} = s_{*0}$ до $s_1/s_{кр} = s_{*1}$ определим время, при котором двигатель достигает скольжения s_{*1} :

$$t_{np} = s_{кр} T_J / M_{ст0} - \{s_* + k(s_*^2 - 2ks_* + 1) + (2k^2/\sqrt{1-k^2}) \arctg [(s_* - k)/\sqrt{1-k^2}]\} \Big|_{s_{*0}}^{s_{*1}}, \quad (15.15)$$

где

$$k = (M_{max}/M_{ст0}) (U_1/U_0)^2; \quad s_* = s/s_{кр}.$$

Значения s_{*0} и s_{*1} найдем из выражения

$$M_{ст0} = 2M_{max}/(s_* + 1/s_*), \text{ или } s_*^2 - 2M_{max}s_*/M_{ст0} + 1 = 0,$$

откуда

$$s_* = M_{max}/M_{ст0} \pm \sqrt{(M_{max}/M_{ст0})^2 - 1}. \quad (15.16)$$

Знак «+» здесь соответствует s_{*1} , а знак «-» — s_{*0} .

Поведение двигателя при повышении момента сопротивления на валу (рис. 15.7, b) полностью соответствует его поведению при снижении питающего напряжения, но при расчете t_{np} по формуле (15.15) $M_{ст0}$ нужно заменить на $M_{ст1}$.

15.3. Переходный процесс в узле нагрузки при пуске асинхронного двигателя

Пусковой режим электропривода, входящего в состав узла комплексной нагрузки, — это процесс перехода двигателя, и соответственно рабочего механизма, из неподвижного состояния ($\omega = 0$) в состояние вращения с номинальной угловой скоростью ($\omega = \omega_0$).

Пуск двигателя относится к числу нормальных переходных процессов. Во время пуска двигатель должен развивать вращающий момент, необходимый для преодоления момента сопротивления механизма и создания определенной кинетической энергии вращающихся масс агрегата. При пуске двигатель потребляет повышенное количество энергии, что отражается в увеличении его пускового тока. Кратность пускового тока по отношению к номинальному составляет 1,5—2 у асинхронных двигателей с фазным ротором и 5—8 у двигателей с короткозамкнутым ротором.

Повышенный нагрев двигателя при пуске накладывает определенные требования к электроприводу. Для облегчения пуска используют двигатели специальных конструкций и предусматривают различные меры.

Процесс движения асинхронного двигателя описывается уравнением

$$T_J (ds/dt) = M_{ст} - M = \Delta M, \quad (15.17)$$

где $M_{ст}$ — момент сопротивления рабочего механизма; M — электромагнитный момент двигателя. Исследуем уравнение (15.17) при разных значениях $M_{ст}$.

Пусть $M_{ст} = f(s)$, т. е. M и $M_{ст}$ определяются скольжением. В этом случае статические характеристики $M(s)$, $M_{ст}(s)$ и их разность $\Delta M(s)$ имеют вид, показанный на рис. 15.8. Разбив $\Delta M(s)$ на ряд равных интервалов по скольжению $\Delta s_1 = \Delta s_2 = \dots = \Delta s_i = \dots = \Delta s_n$, уравнение движения (15.17) на любом интервале можно представить в следующем виде:

$$\Delta M_i = T_J (\Delta s_i / \Delta t_i), \text{ или } \Delta s_i = (1/T_J) \Delta M_i \Delta t_i,$$

где ΔM_i — среднее значение избыточного момента на данном интервале Δs_i .

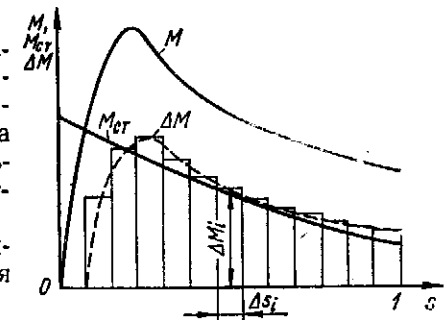


Рис. 15.8. Графоаналитический подход к расчету пуска асинхронного двигателя

Время от момента пуска двигателя до конца любого n -го интервала определяется выражением

$$t = T_J \sum_{i=1}^n (\Delta s_i / \Delta M_i). \quad (15.18)$$

Точность определения t по (15.18) возрастает с уменьшением Δs_i и соответственно с увеличением количества интервалов.

Предположим теперь, что $M_{ст} = \text{const}$ в течение всего процесса разгона двигателя, и пусть вращающий момент M определяется выражением, соответствующим упрощенной схеме замещения двигателя:

$$M = U^2 r_2 s / (x_s^2 s^2 + r_2^2). \quad (15.19)$$

В этом случае избыточный момент можно записать в виде

$$\Delta M = M_{ст} - U^2 r_2 s / (x_s^2 s^2 + r_2^2), \quad (15.20)$$

а время разгона двигателя от s_1 до s_2 — в виде

$$t = \int_{s_1}^{s_2} T_J (ds/dM) = T_J \int_{s_1}^{s_2} (x_s^2 s^2 + r_2^2) ds / [M_{ст} (x_s^2 s^2 + r_2^2) - U^2 r_2 s]. \quad (15.21)$$

Таким образом, допущение постоянства момента сопротивления приводит к сравнительно простой методике анализа переходного процесса в узле нагрузки при пуске асинхронного двигателя.

15.4. Переходный процесс в узле нагрузки при пуске синхронного двигателя

Синхронный двигатель при пуске подключают к сети невозбужденным. Его обмотка возбуждения закорочена или замкнута на сопротивление

$$\Delta R = (5 \div 10) R_b, \quad (15.22)$$

где R_b — сопротивление обмотки возбуждения двигателя.

Разгоняясь как асинхронный, он достигает частоты вращения, близкой к синхронной и называемой *подсинхронной частотой вращения*. При этом движение двигателя удовлетворяет уравнению

$$\Delta M = T_J (ds/dt),$$

где при синхронной частоте вращения

$$s = (-1/\omega_0) d\delta/dt.$$

После этого подают напряжение на обмотку возбуждения двигателя и он, приобретая свойства синхронного двигателя, входит в синхронизм. Таким образом, процесс пуска синхронного двигателя условно можно разбить на два этапа:

1) разгон до подсинхронной частоты вращения ($s \approx 0,1$) под действием среднего асинхронного момента;

2) вхождение в синхронизм под влиянием моментов, созданных возбуждением и зависящих от угла между осью ротора и вектором вращающегося поля статора.

На первом этапе определяющее значение имеют начальный толчок тока статора и длительность разгона до подсинхронной частоты вращения. Начальный толчок периодической составляющей тока статора определяется выражением

$$I = U / (x_d'' + x_{вн}), \quad (15.23)$$

где U — напряжение в той точке, где оно может быть принято не зависящим от режима работы двигателя; x_d'' — сверхпереходное сопротивление двигателя; $x_{вн}$ — внешнее сопротивление цепи статора между точкой с напряжением U и выводами статора.

Длительность разгона до подсинхронной частоты вращения можно определить так же, как и для асинхронного двигателя.

На втором этапе пуска на несинхронно вращающийся ротор синхронного двигателя, кроме асинхронного момента, действуют синхронный момент, зависящий от угла δ и обусловленный возбуждением, а также момент сопротивления механизма. Вхождение в синхронизм может произойти только после подачи возбуждения, при котором у двигателя создается дополнительный знакопеременный момент.

15.5. Самозапуск асинхронных двигателей

Для повышения устойчивости и надежности электроснабжения ряда наиболее ответственных установок при кратковременных снижениях или отключениях напряжения источника питания применяется система самозапуска электродвигателей. *Самозапуск* — это процесс восстановления нормальной работы двигателей после кратковременного отключения питающего напряжения.

При самозапуске значение остаточного напряжения на шинах или зажимах электроприемников должно быть таким, чтобы вращающий момент электродвигателей превышал статический момент сопротивления механизмов. Для этого в режиме самозапуска оставляют включенными только часть электродвигателей наиболее ответственных механизмов. Электродвигатели, самозапуск которых недопустим по условиям техники безопасности, обязательно отключаются защитой.

Для осуществления самозапуска определяют допустимое количество и суммарную мощность неотключаемых электродвигателей, при работе которых остаточное напряжение обеспечивает вращающий момент, превышающий статический момент механизма.

Считают самозапуск обеспеченным, если при пониженном питающем напряжении избыточный момент электродвигателей достаточен для доведения механизмов до номинальной частоты вращения и если за время разгона нагрев обмоток электродвигателей не превышает допустимого.

По условиям самозапуска электроприемники условно делятся на две группы:

1. *Электроприемники с постоянным моментом сопротивления.* Двигатели этих электроприемников при кратковременном перерыве в электроснабжении быстро теряют частоту вращения и медленно разгоняются (шаровые мельницы, конвейеры, прокатные станы и т. п.). Для обеспечения самозапуска приводов таких электроприемников необходимо, чтобы при восстановлении напряжения двигатель обладал моментом, равным $(0,8+0,9) M_{ном}$, а время перерыва

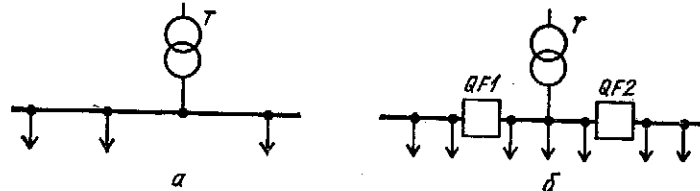


Рис. 15.9. Подключение электроприемников без секционирования (а) и с двумя межсекционными выключателями (б)

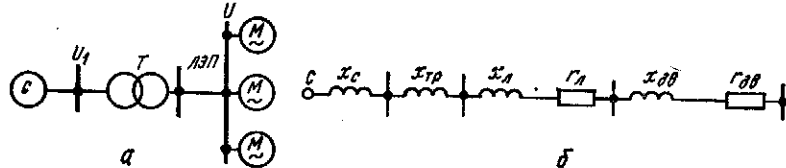


Рис. 15.10. Схема питания двигательной нагрузки (а) и ее схема замещения (б)

в электроснабжении должно быть сокращено до минимума, чтобы не произошло значительное снижение частоты вращения.

2. *Электроприемники, обладающие вентиляторными механическими характеристиками* (центробежные насосы, вентиляторы, центрифуги и т. д.). Самозапуск двигателей этой группы электроприемников обеспечивается легче, поскольку их момент сопротивления уменьшается со снижением частоты вращения.

Самозапуск группы электроприемников (рис. 15.9, а) может быть облегчен путем секционирования РУ (рис. 15.9, б) и уменьшения мощности двигателей, участвующих в самозапуске. Практическая задача самозапуска состоит в том, чтобы не допустить массового отключения электродвигателей и обеспечить бесперебойную работу электроприемников.

Расчет самозапуска асинхронных двигателей заключается в проверке возможности их самозапуска. Для этого необходимо выяснить, достаточен ли момент вращения при сниженном питающем напряжении, и установить допустимый нагрев при увеличении времени разгона двигателя.

Наиболее характерные схемы питания двигательной и смешанной нагрузок с осуществлением самозапуска показаны на рис. 15.10, а и 15.11, а.

Из схемы замещения, изображенной на рис. 15.10, б, следует, что остаточное напряжение на зажимах двигателей при самозапуске определяется выражением

$$U = U_1 |z_{дв}| / \sqrt{(r_{л} + r_{дв})^2 + (x + x_{дв})^2}, \quad (15.24)$$

где $|z_{дв}| = \sqrt{r_{дв}^2 + x_{дв}^2}$; $x = x_c + x_{тр} + x_{л}$; $r_{дв}$, $x_{дв}$ — эквивалентные активные и реактивное сопротивления двигателей при скольжении, соответствующем началу самозапуска.

Для схемы замещения, показанной на рис. 15.11, б, в которой нагрузка представлена двигателями и неизменным сопротивлением $z_{н}$, остаточное напряжение при самозапуске определяется так:

$$U = U_1 |z_{дв.н}| / \sqrt{(r_{л} + r_{дв.н})^2 + (x + x_{дв.н})^2}, \quad (15.25)$$

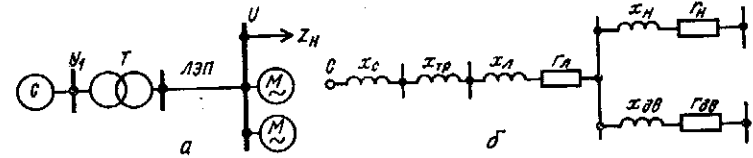


Рис. 15.11. Схема питания смешанной нагрузки (а) и ее схема замещения (б)

где $z_{дв.н} = z_{дв} z_{н} / (z_{дв} + z_{н})$, поскольку сопротивления двигателей и нагрузки включены параллельно.

Следовательно, между напряжениями U и U_1 при самозапуске должно соблюдаться соотношение

$$U \geq U_1 |z_{дв}| / (z_{дв} + x). \quad (15.26)$$

Зная минимально допустимое напряжение при самозапуске, можно определить допустимое значение неотключаемой мощности двигателей.

Сопротивление двигателя в момент самозапуска определяется выражением

$$|z_{дв}| = S_6 U_{ном}^2 / (U_6^2 S_c), \quad (15.27)$$

где S_6 — базисная мощность; $U_{ном}$ — номинальное питающее напряжение электродвигателя; U_6 — базисное напряжение; S_c — расчетная мощность двигателя при номинальном напряжении и скольжении, соответствующем моменту самозапуска.

Приняв в соотношении (15.26) знак равенства и подставив в него (15.27), получим

$$U = U_1 S_6 U_{ном}^2 / (S_6 U_{ном}^2 + x U_6^2 S_c). \quad (15.28)$$

Из (15.28) находим мощность самозапуска:

$$S_c = (U_1 S_6 U_{ном}^2 - U S_6 U_{ном}^2) / (U x U_6^2),$$

или

$$S_c = (U_{ном} / U_6)^2 (S_6 / x) (U_1 / U - 1). \quad (15.29)$$

Мощность самозапуска можно определить также по номинальной мощности двигателя:

$$S_c = P_{\text{ном}} K_s / (\eta_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}}), \quad (15.30)$$

где K_s — кратность тока двигателя при скольжении s_c , соответствующем началу самозапуска; $\cos \varphi_{\text{ном}}$, $\eta_{\text{ном}}$ — номинальные $\cos \varphi$ и к. п. д. двигателя.

Величина K_s определяется выражением

$$K_s = K \sqrt{1 + s_{\text{кр}}^2} / \sqrt{1 + (s_{\text{кр}}/s_c)^2},$$

где K — кратность пускового тока.

Приравняв правые части (15.29) и (15.30), можно получить выражение для определения допустимого значения неотключаемой мощности двигателя.

Неотключаемую мощность электроприемников, питаемых по схеме, изображенной на рис. 15.10, а, можно рассчитать по формуле

$$P_{\text{но}} = (U_{\text{ном}}/U_c)^2 (S_c \cos \varphi_{\text{ном}} \eta_{\text{ном}} / (x K_s)) (U_1/U - 1), \quad (15.31)$$

а в случае их питания по схеме, показанной на рис. 15.11, а, — по формуле

$$P_{\text{но}} = (\cos \varphi_{\text{ном}} \eta_{\text{ном}} / K_s) [(U_{\text{ном}}/U_c)^2 (S_c/x) (U_1/U - 1) - U^2 / |z_{\text{н}}|]. \quad (15.32)$$

Минимально допустимое напряжение на зажимах двигателя находят, исходя из условия возможности осуществления самозапуска:

для механизмов с постоянным моментом сопротивления

$$U^2 M_{\text{дв min}} \geq 1,1 M_{\text{ст}}; \quad (15.33)$$

для механизмов с вентиляторной характеристикой момента сопротивления

$$U^2 M_{\text{дв max}} \geq 1,1 M_{\text{ст}}, \quad (15.34)$$

где $M_{\text{дв min}}$ и $M_{\text{дв max}}$ — минимальный и максимальный моменты вращения двигателя; $M_{\text{ст}}$ — статический момент приводного механизма.

15.6. Самозапуск синхронных двигателей

При восстановлении напряжения после кратковременного перерыва в электроснабжении самозапуск синхронных двигателей возможен в случае, если в это время синхронные двигатели не были отключены или не выпали из синхронизма.

Если к моменту восстановления напряжения синхронный двигатель работает как асинхронный с каким-то скольжением, то процесс самозапуска нужно рассматривать как пуск асинхронного двигателя, но осуществляемый от той промежуточной частоты вращения, до которой он успел затормозиться за время отсутствия питания.

При расчете самозапуска синхронного двигателя решают следующие задачи:

проверяют влияние самозапуска на нормальную работу электроприемников и элементов сети;

определяют остаточное напряжение на зажимах двигателя, необходимое для разворачивания агрегатов;

находят момент двигателя, необходимый для надежного вхождения его в синхронизм;

вычисляют время пуска и температуру перегрева двигателя.

Во время отсутствия питания напряжение на зажимах двигателя падает по мере выбега. При уменьшении частоты вращения до 80 % номинального напряжения снижается до 60—70 % номинального. Для поддержания напряжения в допустимых пределах применяется форсировка возбуждения синхронного двигателя.

В зависимости от характера нагрузки в узле допускается снижение напряжения на его шинах во время самозапуска синхронных двигателей в разных пределах:

при совместном питании двигательной и осветительной нагрузок с частыми и длительными пусками $U \geq 0,9 U_{\text{ном}}$, а при редких и кратковременных пусках и самозапусках $U \geq (0,8 \div 0,85) U_{\text{ном}}$;

при отдельном питании двигательной и осветительной нагрузок независимо от частоты и длительности пусков и самозапусков $U \geq (0,75 \div 0,8) U_{\text{ном}}$;

при люминесцентной осветительной нагрузке $U \geq 0,9 U_{\text{ном}}$.

При питании двигателей через блок-трансформаторы напряжение ограничивается минимальным значением момента, необходимого для разгона агрегата.

Для проверки возможности самозапуска необходимо сопоставить средний асинхронный момент с моментом сопротивления механизма. Характеристика асинхронного момента определяется выражением, аналогичным приведенному выше для генератора.

В тех случаях, когда самозапуск неосуществим, можно применить автоматическую ресинхронизацию двигателя. Вхождение в синхронизм должно обеспечиваться действием форсировки возбуждения, повышающей максимальный синхронный момент. Для обеспечения ресинхронизации предусматривают разгрузку привода (механизма) и другие меры, облегчающие вхождение в синхронизм.

Время перерыва в электроснабжении, в течение которого двигатель не выпадает из синхронизма, определяется выражением

$$t_{\text{п}} \leq 0,06 \sqrt{T_J (M_{\text{max}} - 0,6 M_{\text{ст}}) / M_{\text{ст}}}, \quad (15.35)$$

где T_J — электромеханическая постоянная времени агрегата, состоящего из двигателя и механизма; M_{max} — максимальный электромагнитный момент; $M_{\text{ст}}$ — статический момент сопротивления.

На рис. 15.12 показана зависимость допустимого времени нарушения электроснабжения от электромеханической постоянной времени агрегата при различных значениях кратности максимального момента M_{max} и статическом моменте $M_{\text{ст}} = 0,8 M_{\text{ном}}$.

Среднее критическое скольжение, с которого после подачи напряжения возбуждения под действием входного момента обеспе-

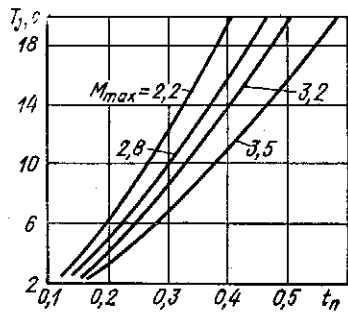


Рис. 15.12. Зависимость допустимого времени перерыва в питании синхронных двигателей по условиям самозапуска

чивается вхождение двигателя в синхронизм, можно рассчитать по формуле

$$s_{кр} = 0,06 \sqrt{K_B M_{max} / T_J}, \quad (15.36)$$

где K_B — кратность тока возбуждения при ресинхронизации; в случае отсутствия форсировки возбуждения $K_B = 1$.

Следовательно, критическим скольжением синхронного двигателя называется максимальное скольжение, при котором после подачи напряжения возбуждения обеспечивается вхождение двигателя в синхронизм. Чем больше критическое скольжение, тем меньше входной момент требуется для обеспечения самозапуска синхронного двигателя.

15.7. Самовозбуждение асинхронных двигателей во время пуска при последовательной емкостной компенсации в сети

Конденсаторные батареи при последовательном их включении в сеть, кроме компенсации реактивного сопротивления, позволяют автоматически изменять напряжение в зависимости от нагрузки двигателя. Однако при этом в сетях, питающих двигатели, могут возникать некоторые, необычные с точки зрения нормальной эксплуатации, явления:

- качание синхронных машин;
- «застывание» асинхронных двигателей при частотах вращения, меньших чем номинальная;
- самовозбуждение при асинхронном пуске синхронных двигателей;
- появление резонансных колебаний на частотах ниже номинальной, что приводит к возникновению субгармонических токов и напряжений.

Условия самовозбуждения асинхронного двигателя при пуске можно оценить с помощью тех же соотношений, что и при анализе режимов работы синхронного двигателя. Однако строгое и точное рассмотрение этих условий требует более полного и сложного их анализа.

Считают, что асинхронный двигатель так же, как и генератор, можно характеризовать сопротивлениями x'_d и x_d . При изменении угловой скорости двигателя ω изменяются его индуктивные сопротивления x_d и x'_d (кривые 1 и 2 на рис. 15.13).

Если в сеть, питающую двигатель, включить конденсаторную батарею продольной компенсации с емкостным сопротивлением,

$$x_c = 1/(\omega C),$$

то в зависимости от угловой скорости ω емкостное сопротивление при разных значениях C изменяется так, как показано на рис. 15.13 (кривые 3—5). Эти кривые различным образом расположены относительно области $x'_d - x_d$, представляющей собой зону самовозбуждения двигателя.

Если x_c во время пуска двигателя изменяется по кривой 3, то самовозбуждение не происходит. Если x_c изменяется по кривой 4, то самовозбуждение будет от угловой скорости ω_3 до нормального режима, соответствующего $\omega_{ном}$. При изменении x_c по кривой 5 во время пуска двигателя в интервале угловых скоростей от ω_1 до ω_2 самовозбуждение появится. Оно может исчезнуть, не развившись полностью, если двигатель быстро пройдет зону самовозбуждения. Скорости ω_1 и ω_2 соответствуют границам зоны самовозбуждения двигателя.

Самовозбуждение двигателей не следует допускать по следующим причинам:

ток статора и мощность, потребляемые двигателем из сети, могут в несколько раз превышать их номинальные значения; при этом двигатель сильно перегревается, напряжение на его зажимах снижается, вращающий момент уменьшается;

во время пуска двигатель может «застрять», не достигнув номинальной частоты вращения из-за уменьшения вращающего момента в процессе разгона; при этом появляются биения тока и момента, что приводит к качанию ротора машины.

При рассмотрении процесса самовозбуждения асинхронного двигателя необходимо учитывать следующие факторы:

- во время разгона двигателя его сопротивление изменяется от минимального значения до максимального;
- при некотором значении скольжения ротора индуктивность двигателя может резонировать с емкостью последовательной компенсации, в результате чего создается контур самовозбуждения с частотой ниже промышленной. В этом случае двигатель вращается с частотой, соответствующей частоте свободных колебаний контура;

во время разгона двигателя может возникать отрицательное скольжение ротора, при котором двигатель переходит в генераторный режим по отношению к контуру самовозбуждения. При равенстве потерь в контуре ротора и генерирующей мощности создается условие для устойчивой работы в этом режиме. Если потери больше генерируемой мощности, то самовозбуждение либо не возникает, либо становится неустойчивым, что дает возможность двигателю вращаться с номинальной частотой;

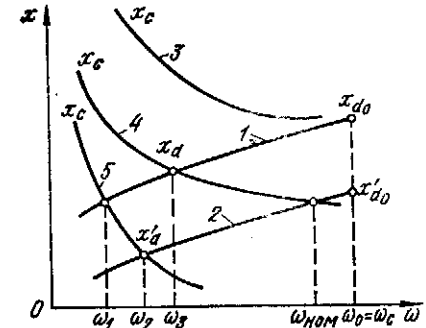


Рис. 15.13. К рассмотрению самовозбуждения асинхронного двигателя

частота генерирующего контура зависит от параметров сети, емкостного сопротивления конденсаторной батареи и сопротивления самого двигателя. Поэтому для предотвращения самовозбуждения необходимо либо выбрать соответствующую емкость продольной компенсации, либо включить последовательно или параллельно емкости активное сопротивление.

В зависимости от соотношения сопротивления x_c и параметров двигателя могут возникать три характерных режима его работы, соответствующих кривым 3—5 на рис. 15.13.

В первом режиме (кривая 3)

$$x_c \geq x_{ц0}, \quad (15.37)$$

где $x_{ц0}$ — реактивное сопротивление цепи намагничивания двигателя. При этом вся зона самовозбуждения двигателя лежит в диапазоне частот вращения больше синхронной, а в пределах изменения частоты вращения от нуля до синхронной двигатель практически не самовозбуждается.

Во втором режиме (кривая 4)

$$x_s/(r_2/r_1 + 1)^2 \leq x_c < x_{ц0}, \quad (15.38)$$

где x_s — сопротивление рассеяния обмотки статора; R_2 и r_1 — активные сопротивления обмоток ротора и статора двигателя. В этом

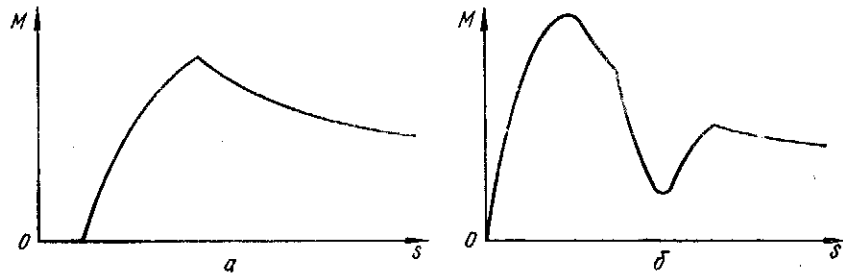


Рис. 15.14. Зависимость вращающего момента асинхронного двигателя от скольжения при самовозбуждении (а) и разгоне (б)

случае одна часть зоны самовозбуждения двигателя находится в диапазоне частот вращения от нуля до синхронной, а другая выходит за пределы синхронной частоты вращения.

Зависимость вращающего момента двигателя от скольжения имеет вид, показанный на рис. 15.14, а. Эффект самовозбуждения здесь проявляется в уменьшении частоты вращения двигателя на 35—40 % номинальной.

В третьем режиме

$$x_c < x_s/(r_2/r_1 + 1)^2. \quad (15.39)$$

При этом условии самовозбуждение двигателя начинается от небольшой частоты вращения, близкой к нулю, и зона самовозбуждения находится в диапазоне частот вращения от нулевой до синхронной.

Зависимость вращающего момента асинхронного двигателя от скольжения при разгоне показана на рис. 15.14, б. Если после подключения к сети двигатель разгоняется настолько медленно, что процесс его самовозбуждения успевает закончиться за время прохождения зоны самовозбуждения, то двигатель «застывает» на пониженной частоте вращения и возникают качания.

При малых значениях момента инерции двигателя и момента сопротивления механизма, а также при большом питающем напряжении двигатель может разогнаться настолько быстро, что самовозбуждение не успевает развиваться. В этом случае двигатель быстро проходит зону самовозбуждения и разгоняется до номинальной частоты вращения. Этому режиму соответствует кривая 5 на рис. 15.13.

15.8. Примеры расчетов

Пример 15.1. Определить предельный угол снятия наброса нагрузки при периодически меняющейся нагрузке от холостого хода до максимальной, график которой изображен на рис. 15.15, а. При $\delta_0 = 0$ момент $M_{ст0} = M_0 = 0$, $M_{ст} = M_1$.

Решение. Предельный угол снятия наброса нагрузки при $\delta = 180^\circ$ согласно формуле (15.5)

$$\delta_{откл} = 2M_{max}^{(0)}/M_1.$$

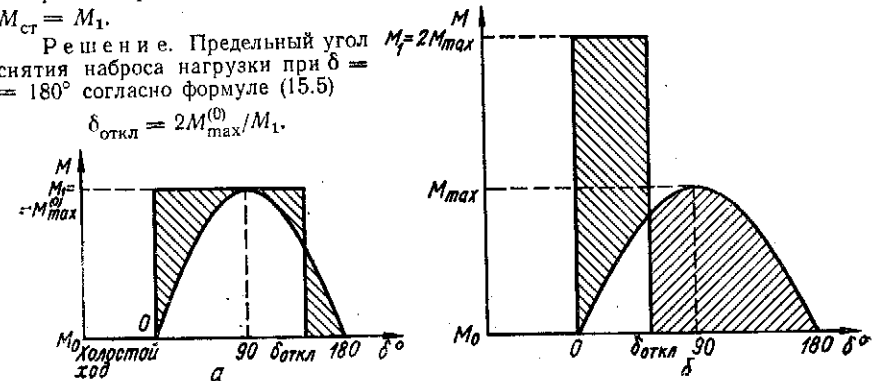


Рис. 15.15. К примеру 15.1

Следовательно, при $M_1 = M_{max}^{(0)}$ предельный угол $\delta_{откл} = 2$ рад, или

$$\delta_{откл} = 2 \cdot 180/\pi = 144^\circ \quad (\text{рис. 15.6}).$$

Если $M_1 = 2M_{max}^{(0)}$ (рис. 15.15, б), то угол $\delta_{откл} = 1$ рад, или

$$\delta_{откл} = 1 \cdot 180/\pi = 57^\circ.$$

Пример 15.2. Промышленное предприятие снабжается электрической энергией от энергетической системы по двум ЛЭП через трансформаторы $T1$ и $T2$ (рис. 15.16, а). К каждой секции шин, соединяемых между собой нормально разомкнутым выключателем $Q1$, присоединены синхронные двигатели привода турбокомпрессоров номинальной мощностью 6 и $2 \times 3,5$ МВт. Нагрузка остальных электроприемников одной секции равна 10 МВ · А при $\cos \varphi = 0,8$. Кратности моментов сопротивления m_c турбокомпрессоров, асинхронных моментов m_a и пусковых токов I_p двигателей в зависимости от скольжения s приведены в табл. 15.1. Маховые моменты турбокомпрессоров равны: 0,5 и 0,356 т · м² для двигателей мощностью 3,5 МВт, 1 и 1,3 т · м² для двигателей мощностью 6 МВт. Мощность энергетической системы составляет 670 МВ · А. Схема замещения узла нагрузки показана на рис. 15.16, б.

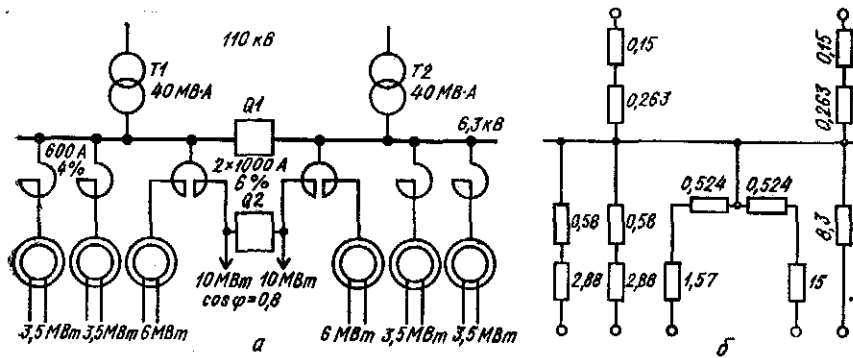


Рис. 15.16. К примеру 15.2

Проверить возможность группового самозапуска трех двигателей с турбокомпрессорами при отключении одной секции шин и автоматическом ее включении через 4 с секционным выключателем. Правильно ли выбраны реакторы, если при пуске двигателя напряжение на шинах должно быть не ниже 85 %, а напряжение на зажимах пускаемого двигателя — не выше 85 % номинальных значений?

Решение. Механические постоянные времени двигателей с турбокомпрессорами:

$$T_{J1} = \sum_{i=1}^n (GD^2)_i n_0^2 / (364 P_{\max i}) = (0,356 + 0,5) \cdot 3000^2 / (364 \cdot 3500) = 6,1 \text{ с};$$

$$T_{J2} = \sum_{i=1}^n (GD^2)_2 n_0^2 / (364 P_{\max 2}) = (1 + 1,3) \cdot 3000^2 / (364 \cdot 600) = 9,5 \text{ с},$$

где GD^2 — маховый момент.

Таблица 15.1. Параметры элементов схемы

Элемент схемы	Обозначение параметра	Скольжение, s							
		1	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	0,05	0
Турбокомпрессор	m_c	0,05	0,08	0,16	0,3	0,5	0,62	0,69	0,75
Синхронный двигатель мощностью 3,5 МВт	m_a	2	2,35	2,35	2,26	1,98	1,6	1,2	—
	i_{Π}	7,75	7,4	6,95	6,35	5,35	4,35	3,4	—
Синхронный двигатель мощностью 6 МВт	m_a	2,27	2,24	2,2	2,4	1,88	1,69	1,47	—
	i_{Π}	8,3	7,7	7,05	6,47	5,7	5,2	4,73	—

Эквивалентный момент сопротивления трех самозапускаемых агрегатов

$$m_{c.эк} = \sum_{i=1}^3 (P_{mi} K_{zi}) / \sum_{i=1}^3 P_{ном i} = (0,75 \cdot 2 \cdot 3,5 + 0,75 \cdot 6) / (2 \cdot 3,5 + 6) = 0,75,$$

где $K_z = 0,75$ — коэффициент загрузки до подачи напряжения на секцию.

Эквивалентная механическая постоянная времени

$$T_{Jэк} = \left(\sum_{i=1}^3 T_{Ji} P_{ном i} \right) / \sum_{i=1}^3 P_{ном i} = (6,1 \cdot 2 \cdot 3,5 + 9,5 \cdot 6) / (2 \cdot 3,5 + 6) = 7,7 \text{ с}.$$

Скольжение, до которого затормозятся агрегаты при перерыве в электропитании ($t_{\Pi} = 4$ с),

$$s = m_{c.эк} t_{\Pi} / T_{Jэк} = 0,75 \cdot 4 / 7,7 = 0,4.$$

Реактивные сопротивления элементов схемы, отнесенные к напряжению 6 кВ и мощности 100 МВ · А: системы и трансформатора

$$x_{*c} = 100 / S_c = 100 / 670 = 0,15;$$

$$x_{*тр} = 0,105 \cdot 100 / 40 = 0,263;$$

реактора при $x_p = 4\%$ и базисном токе 9,2 кА

$$x_{*р1} = x_p I_6 U_6 / (100 I_p U_{ном}) = 0,04 \cdot 9,2 \cdot 6 / (0,6 \cdot 6,3) = 0,58;$$

сдвоенного реактора

$$x_{*р2} = x_{*0,5} = 0,06 \cdot 9,2 \cdot 6 / (1 \cdot 6,3) = 0,524;$$

двигателей

$$x_{*дв1} = 100 (U_6 / U_{ном})^2 / (7,75 \cdot 4,03) =$$

$$= 100 (6/6,3)^2 / (7,75 \cdot 4,03) = 2,88,$$

где 7,75 — кратность пускового тока (из табл. 15.1); 4,03 — номинальная мощность, МВ · А;

$$x_{*дв2} = 100 (6/6,3)^2 / (8,3 \cdot 6,9) = 1,57,$$

где 8,3 — кратность пускового тока (из табл. 15.1); 6,9 — номинальная мощность, МВ · А.

Реактивная нагрузка остальных электроприемников

$$x_{*н1} = (S_6 / (S_{ном} \sin \varphi)) (U_6 / U_{ном})^2 = (100 / 10 \cdot 0,6) (6/6,3)^2 = 15,$$

где $\sin \varphi = 0,6$ при $\cos \varphi = 0,8$.

Проверка возможности пуска двигателя мощностью 3,5 МВт: сопротивление двигателя с реактором

$$x_{*р.дв} = x_{*р1} + x_{*дв1} = 0,58 + 2,88 = 3,46;$$

эквивалентное сопротивление двигателя с реактором и нагрузки

$$x_{*эк1} = x_{*р.дв} x_{*н1} / (x_{*р.дв} + x_{*н1}) = 3,46 \cdot 15 / (3,46 + 15) = 2,8;$$

напряжения на шинах подстанции и на зажимах двигателя

$$U' = 1,05 x_{*эк1} / (x_{*c} + x_{*эк1} + x_{*тр}) = 1,05 \cdot 2,8 / (0,15 + 0,263 + 2,8) = 0,91 > 0,85;$$

$$U'_{дв} = U' x_{*дв1} / x_{*р.дв} = 0,91 \cdot 2,88 / 3,46 = 0,76 < 0,85;$$

момент двигателя при пуске

$$m_{a1} = m_a U'_{дв}^2 = 2 \cdot 0,76^2 = 1,16,$$

где $m_a = 2$ — кратность асинхронного момента двигателя (из табл. 15.1); $P_{др} = 3,5$ МВт при $s = 1$, что значительно больше момента сопротивления турбокомпрессора.

Проверка возможности пуска двигателя мощностью 6 МВт:

параметры сдвоенного реактора, отнесенные к базисным значениям $x_{*0,5} = 0,524$; $k_{св} = 0,606$ — коэффициент связи между ветвями реактора; $x_{*0,5} (1 - k_{св}) = 0,206$; $x_{*0,5} (1 + k_{св}) = 0,84$;

отношения токов в обоих плечах реактора при пуске двигателя

$$I_1 / I_2 = (x_{*н1} + 0,84) / (x_{*дв2} + 0,84) = (15 + 0,84) / (1,57 + 0,84) = 6,6;$$

$$I_2 / I_1 = 0,152;$$

сопротивления ветвей двоянного реактора

$$x_{*в1} = x_{*0,5} (1 - k_{св} I_2 / I_1) = 0,524 (1 - 0,606 \cdot 0,152) = 0,48;$$

$$x_{*в2} = x_{*0,5} (1 - k_{св} I_1 / I_2) = 0,524 (1 - 0,606 \cdot 6,6) = -1,57;$$

результатирующее сопротивление двоянного реактора при пуске двигателя

$$x_{*рез} = (x_{*в1} - x_{*в2}) (x_{*в2} + x_{*н1}) / [(x_{*в1} - x_{*в2}) + (x_{*в2} + x_{*н1})] = \\ = (0,48 + 1,57) (-1,57 + 15) / [0,48 + 1,57 - 1,57 + 15] = 1,78;$$

напряжение на шинах при пуске двигателя

$$U'_2 = 1,05 x_{*рез} / (x_{*с} + x_{*рез} - x_{*тр}) = 1,05 \cdot 1,78 / (0,15 + 0,223 + 1,78) = \\ = 0,862 > 0,85;$$

напряжение на зажимах двигателя

$$U_{дв2} = U'_2 x_{*дв2} / (x_{*в1} + x_{*дв2}) = 0,86 \cdot 1,57 / (0,48 + 1,57) = 0,66 < 0,85;$$

пусковой момент при этом напряжении

$$m_{а2} = m_a U_{дв2}^2 = 2,27 \cdot 0,66^2 = 0,99,$$

где $m_a = 2,27$ — кратность асинхронного момента двигателя (из табл. 15.1); $P_{дв} = 6$ МВт при $s = 1$, что значительно больше момента сопротивления турбокомпрессора;

напряжение на зажимах электроприемников, присоединенных ко второй ветви реактора,

$$U''_{дв2} = U'_2 x_{*н1} / (x_{*н1} + x_{*в2}) = 0,86 \cdot 15 / (15 - 1,57) = 0,96.$$

Проверка возможности выпадения двигателя мощностью 3,5 МВт из синхронизма и вхождения в синхронизм:

время, в течение которого двигатель не выпадает из синхронизма,

$$t_n \leq 0,06 \sqrt{T_{J1} (m_{max} - 0,6 m_c) / m_c} = \sqrt{6,1 (1,63 - 0,6 \cdot 0,75) / 0,75} = 0,6 \text{ с},$$

где m_{max} — максимальный электромагнитный момент; $m_c = 0,75$ — кратность момента сопротивления турбокомпрессора (из табл. 15.1). При отсутствии питающего напряжения в течение 4 с двигатель выпадает из синхронизма, и при самозапуске потребуются его ресинхронизация;

среднее критическое скольжение, с которым будет обеспечено вхождение двигателя в синхронизм после подачи напряжения возбуждения под действием входного момента,

$$s_{кр} \approx 0,06 \sqrt{m_{max} i_B / T_J} = 0,06 \sqrt{1,63 \cdot 1,5 / 6,1} = 0,04,$$

где i_B — кратность тока возбуждения при ресинхронизации.

Проверка возможности самозапуска при групповом выбеге трех двигателей с турбокомпрессорами до скольжения $s = 0,04$:

сопротивление двигателей при этом скольжении

$$x_{*дв1} = S_6 (U_p / U_{ном})^2 / (i_{н1} S_{н1}) = 100 (6/6,3)^2 / (6,35 \cdot 4,03) = 3,5;$$

$$x_{*дв2} = S_6 (U_p / U_{ном})^2 / (i_{н2} S_{н2}) = 100 (6/6,3)^2 / (6,47 \cdot 6,9) = 2;$$

сопротивление двигателей с реакторами

$$x_{*дв.р1} = x_{*дв1} + x_{*р1} = 3,5 + 0,58 = 4,08;$$

$$x_{*дв.р2} = x_{*дв2} + x_{*р2} = 2 + 0,524 = 2,524$$

(нагрузка второй ветви реактора при самозапуске двигателя мощностью 6 МВт отключается);

эквивалентное сопротивление самозапускаемых двигателей

$$x'_{*эк} = 1 / (n_1 / x_{*дв.р1} + n_2 / x_{*дв.р2}) = 1 / (2/4,08 + 1/2,52) = 1,13,$$

где n_1 и n_2 — количество двигателей мощностью 3,5 и 6 МВт;

сопротивление нагрузки второй секции шин (нагрузка равна 25 МВ · А, а $\cos \varphi = 0,4$)

$$x_{*н2} = S_6 (U_p / U_{ном})^2 / (S_{н} \sin \varphi) = 100 (6/6,3)^2 / (25 \cdot 0,434) = 8,3;$$

эквивалентное сопротивление самозапускаемых двигателей первой секции шин и нагрузки второй секции

$$x'_{*Σ} = 1 / (1/x'_{*эк} + 1/x_{*н2}) = 1 / (1/1,13 + 1/8,3) = 1;$$

напряжения на шинах и зажимах двигателей

$$U' = 1,05 x'_{*Σ} / (x_{*с} + x'_{*Σ} + x_{*тр}) = 1,05 / (0,15 + 1 + 0,263) = 0,74;$$

$$U'_{дв1} = U' x_{*дв1} / x_{*дв.р1} = 0,74 \cdot 3,5 / 4,08 = 0,635;$$

$$U'_{дв2} = U' x_{*дв2} / x_{*дв.р2} = 0,74 \cdot 2 / 2,524 = 0,585;$$

избыточные моменты в начале самозапуска

$$m_{изб1} = 2,26 \cdot 0,635^2 - 0,3 = 0,6;$$

$$m_{изб2} = 2,1 \cdot 0,585^2 - 0,3 = 0,41.$$

По этим данным, а также аналогичным данным, полученным для двигателя мощностью 6 МВт при $s = 0,2; 0,1; 0,05$ на рис. 15.17 построена зависимость избыточного момента двигателя от скольжения.

Из рисунка следует, что избыточный момент двигателя при всех значениях скольжения положителен. Поэтому групповой самозапуск при коэффициенте загрузки двигателей $K_{г} = m_c = 0,75$ и при отсутствии питающего напряжения в течение 4 с возможен.

Длительность самозапуска двигателя мощностью 6 МВт на основании рис. 15.17

$$t_{пер} = 9,5 (0,1/0,38 + 0,1/0,31 + 0,1/0,2 + 0,05/0,18) = 13 \text{ с}.$$

Пример 15.3. Предприятие питается от сети 110 кВ через два трансформатора 110/6,3 кВ, соединяемых между собой нормально разомкнутым секционным выключателем. При отключении одного из трансформаторов электроприемники соответствующей секции присоединяются автоматически ко второму трансформатору. При этом длительность перерыва в электроснабжении равна 1 с. Сопротивление сети, приведенное к мощности 100 МВ · А и напряжению 6,3 кВ, составляет 0,76. Определить остаточное напряжение при самозапуске синхронных и асинхронных двигателей, питающихся напряжением 6000 и 380 В.

Решение. Исходя из длительности перерыва в электроснабжении, равной 1 с, рассчитаем реактивные сопротивления всех элементов сети и самозапускаемых двигателей, сделав следующие допущения:

напряжение в системе и э. д. с. синхронных двигателей одинаковы, угол сдвига между их векторами не учитываем;

сопротивление синхронных двигателей неповрежденной секции шин сверхпереходное, как и в режиме КЗ за сопротивлением самозапускаемых двигателей, поскольку у синхронных двигателей резервирующей секции должна быть опережающая форсировка возбуждения.

Результатирующее сопротивление всех самозапускаемых синхронных двигателей оказалось равным 1,98, а асинхронных — 7,45. Эквивалентное сопротивление

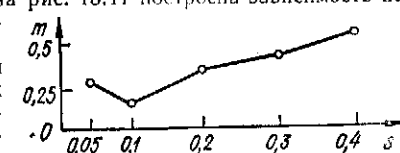


Рис. 15.17. К примеру 15.2

ние синхронных двигателей

$$x_{*эк} = 0,76 \cdot 1,98 / (0,76 + 1,98) = 0,55.$$

Остаточное напряжение на шинах 6 кВ при самозапуске асинхронных двигателей, питающихся напряжением 380 В,

$$U_{*ост} = 7,45 / (7,45 + 0,76) = 0,93.$$

Без учета влияния асинхронных двигателей

$$U'_{*ост} = 7,45 / 7,45 + 0,76 = 0,91,$$

т. е. влияние синхронных двигателей на остаточное напряжение у асинхронных двигателей при самозапуске незначительно.

Пример 15.4. Проверить, при каком остаточном напряжении может быть осуществлен самозапуск технологической машины с постоянным моментом сопротивления ($m_c = 0,7$; $T_J = 2$ с) при следующих параметрах приводного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором: $m_{пуск} = 1,2$; $m_{max} = 2,2$; $s_{ном} = 0,05$. Перерыв в электроснабжении $t_{пер} = 1,4$ с.

Решение. Скольжение, до которого затормозится агрегат при перерыве в электроснабжении,

$$s = m_c t_{пер} / T_J = 0,7 \cdot 1,4 / 2 = 0,5.$$

Критическое скольжение, до которого затормозится двигатель,

$$s_{кр} / s_{ном} = m_{max} + \sqrt{m_{max}^2 - 1} = 4,16;$$

$$s_{кр} = 4,16 \cdot 0,05 \approx 0,21.$$

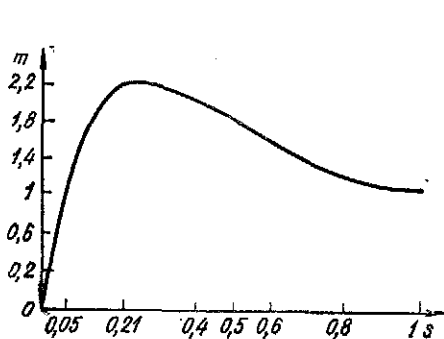


Рис. 15.18. К примеру 15.4

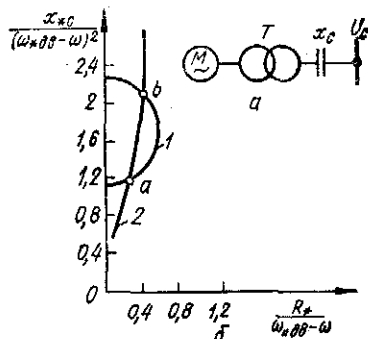


Рис. 15.19. К примеру 15.5

Строим механическую характеристику приводного двигателя (рис. 15.18). Скольжению $s = 0,5$ соответствует $m = 1,7$. Чтобы при восстановлении питающего напряжения электромагнитный момент был выше момента сопротивления машины ($m_c \geq 0,8 \rightarrow 0,85$), остаточное напряжение на зажимах двигателя должно быть

$$U_{*ост} = \sqrt{0,85 / 1,7} \approx 0,7.$$

Пример 15.5. Узел нагрузки, представленный эквивалентным асинхронным двигателем, питается от шин мощной системы через скомпенсированную емкостью одноцепную ЛЭП (рис. 15.19, а). Параметры ЛЭП: $U = 11$ кВ, $x_{*л} = 0,3$, $r_{*л} = 0,1$, $x_{*с} = 0,15$; параметры трансформатора: $K_{тр} = 110/11$ кВ, $x_{*тр} = 0,1$, $r_{*тр} = 0$; параметры двигателя: $s = 0,5$, $x_{*дв} = 1,9$, $x'_{*дв} = 0,6$, $T = 200$ рад. Напряжение на шинах системы $U_{*с} = 1$. Базисными величинами являются мощность $S_6 = 121$ МВ · А и напряжение $U_6 = 110$ кВ.

Проверить, возможно ли самовозбуждение асинхронного двигателя при угловой скорости $\omega_{*дв} = 0,97$.

Решение. Составляем уравнение границы самовозбуждения асинхронного двигателя:

$$[x_c / (\omega_{*дв} - \omega)^2 - (x_* + x'_*) / 2]^2 + [R_* / (\omega_{*дв} - \omega)]^2 = [(x_* - x'_*) / 2]^2.$$

Здесь $\omega_{*дв}$ — угловая скорость ротора, равная 0,2; ω — частота свободных колебаний;

$$x_* = x_{*дв} + x_{*тр} + x_{*л} = 1,9 + 0,1 + 0,3 = 2,3;$$

$$x'_* = x'_{*дв} + x_{*тр} + x_{*л} = 0,6 + 0,1 + 0,3 = 1.$$

В координатах $R_* / (\omega_{*дв} - \omega)$, $x_{*с} / (\omega_{*дв} - \omega)^2$ граница зоны самовозбуждения представляет собой полуокружность радиусом, равным $(x_* - x'_*) / 2 = (2,3 - 1) / 2 = 0,65$, с центром на оси ординат на расстоянии от начала координат, равном $(x_* + x'_*) / 2 = (2,3 + 1) / 2 = 1,65$. Эта зона изображена на рис. 15.19 (кривая 1).

Для определения возможности самовозбуждения асинхронного двигателя нанесем на рис. 15.19 характеристику внешней сети, описываемую уравнениями

$$x_{*с.вн} = x_{*с} / (\omega_{*дв} - \omega)^2 = 0,15 / (\omega_{*дв} - \omega)^2;$$

$$R_{*вн} = r_{*л} / (\omega_{*дв} - \omega) = 0,1 / (\omega_{*дв} - \omega).$$

Изменяя $(\omega_{*дв} - \omega)$ от 0 до 1, рассчитываем эту характеристику (табл. 15.2) и строим ее на рис. 15.19, б (кривая 2).

Пересечение характеристики внешней сети и границы зоны самовозбуждения двигателя возможно при $\omega_{*дв} - \omega = 0,377$ (точка а; $x_{*с} = 1,06$) и $\omega_{*дв} - \omega = 0,263$ (точка б; $x_{*с} = 2,17$).

Таблица 15.2. Результаты расчета характеристики внешней сети

Аргумент	Функция									
$\omega_{*дв} - \omega$	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,25	
$R_{*вн}$	0,10	0,11	0,13	0,14	0,17	0,20	0,25	0,33	0,40	
$(\omega_{*дв} - \omega)^2$	1	0,81	0,64	0,49	0,36	0,25	0,16	0,09	0,06	
$x_{*с.вн}$	0,15	0,185	0,23	0,36	0,42	0,60	0,94	1,67	2,40	

Чтобы решить вопрос о возможности самовозбуждения асинхронного двигателя, надо найти частоту свободных колебаний ω . Это можно сделать, рассмотрев условия резонанса в схеме (см. рис. 15.19, а) при представлении двигателя его частотными характеристиками.

Условиям резонанса соответствует уравнение

$$x_{*с} / (\omega_{*дв} - \omega)^2 = (x_* + \omega^2 T^2 x'_*) / (1 + \omega^2 T^2).$$

Для точки б имеем

$$2,17 = (2,3 + \omega^2 \cdot 200^2 \cdot 1) / (1 + \omega^2 \cdot 200^2);$$

$$2,17 = 2,17 \cdot 200^2 \omega^2 = 2,3 + 200^2 \omega^2;$$

$$1,17 \cdot 200^2 \omega^2 = 0,13; \quad \omega = \pm 0,005 \sqrt{0,13 / 1,17} = \pm 0,00167.$$

В точке a частота свободных колебаний $\omega = 0,072$. Поскольку угловая скорость двигателя $\omega_{\text{дв}} = 0,97$, действительное значение $\omega_{\text{дв}} - \omega$ в рассматриваемых условиях больше, чем разность частот (0,377 и 0,263), при которой возможно возникновение самовозбуждения асинхронного двигателя.

Контрольные вопросы

1. Каковы основные причины возникновения резких изменений режимов в узлах СЭС?
2. В чем особенность методики исследования переходного процесса в узле нагрузки при резких изменениях режима его работы?
3. Как влияет резкое снижение напряжения в точке питания на устойчивость синхронного двигателя?
4. Как протекает переходный процесс в синхронном двигателе при резком увеличении нагрузки на его валу?
5. Как определяется допустимое время наброса нагрузки на синхронный двигатель?
6. В чем заключается расчет устойчивости асинхронного двигателя при набросах нагрузки?
7. Каковы особенности расчета пускового режима синхронного и асинхронного двигателей?
8. Что такое самозапуск электродвигателей и с какой целью он предусматривается?
9. Какие параметры необходимо определять для проверки самозапуска электродвигателей?
10. В чем заключается расчет самозапуска синхронных и асинхронных двигателей?
11. Какие причины самовозбуждения асинхронных двигателей при компенсации реактивной мощности?
12. Каковы последствия самовозбуждения электродвигателей?

Темы рефератов

1. Влияние толчкообразной нагрузки на режим работы СЭС.
2. Выбор условий пуска синхронных и асинхронных двигателей.
3. Переходные процессы при самозапуске синхронных и асинхронных двигателей в узлах нагрузки.
4. Методы расчета устойчивости узлов нагрузки при сильных возмущениях с помощью ЭВМ.

Глава 16

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

16.1. Классификация мероприятий по повышению устойчивости систем электроснабжения

Для повышения устойчивости СЭС промышленных предприятий, транспорта, объектов городского хозяйства и предприятий агропрома предусматриваются экономически и технически обоснованные мероприятия. Различают мероприятия на стадии проектирования СЭС и вводимые дополнительно в процессе их эксплуатации.

Считая условно, что некоторые элементы системы являются основными (турбины, генераторы, трансформаторы, ЛЭП, синхронные компенсаторы, выключатели), а другие элементы — дополнительными (переключательные пункты, установки компенсации индуктивных сопротивлений электропередачи, активные и индуктивные сопротивления в нейтрали трансформаторов, нагрузочные сопротивления для торможения генераторов при сбросах нагрузки, устройства для ресинхронизации генераторов и т. д.), мероприятия по повышению устойчивости СЭС и качества переходных процессов можно разделить на две группы:

- 1) *основные мероприятия*, предусматривающие изменение параметров СЭС с помощью основных элементов;
- 2) *дополнительные мероприятия*, осуществляемые путем установки дополнительных устройств.

По влиянию на показатели СЭС различают мероприятия, направленные на изменение параметров режима, и мероприятия, направленные на изменение параметров СЭС, а по влиянию на устойчивость СЭС — мероприятия, направленные на повышение статической устойчивости, и мероприятия по обеспечению динамической устойчивости.

При рассмотрении всех мероприятий необходимо учитывать возможности автоматического управления и регулирования, позволяющие в ряде случаев с минимальными затратами добиваться желательного повышения устойчивости и надежности электроснабжения. Ниже описываются мероприятия, которые получили наиболее широкое практическое применение.

16.2. Использование регуляторов электростанций

Электростанции могут влиять на устойчивость СЭС своими средствами АРВ, автоматической частотной разгрузки и аварийной разгрузки турбин.

Автоматическое регулирование возбуждения. Со снижением напряжения на шинах генератора при КЗ в СЭС вступает в действие устройство АРВ. При этом увеличивается ток в ОВГ и повышается амплитуда электромагнитной мощности аварийного режима, в результате чего происходит соответствующий переход с угловой характеристики мощности II на характеристики II' , II'' и т. д. (рис. 16.1).

Таким образом, под действием АРВ изменение электромагнитной мощности при КЗ совершается не по характеристике II , а по кривой плавного перехода с характеристики II на характеристики II' , II'' и т. д. (кривая bc') в соответствии с плавным увеличением э. д. с. возбуждения.

После отключения КЗ электромагнитная мощность изменяется не по харак-

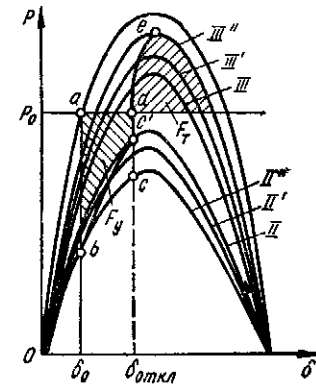


Рис. 16.1. Влияние АРВ генератора на динамическую устойчивость СЭС.

теристике III, а по кривой *de* путем плавного перехода с характеристики III на характеристики III', III" и т. д. В данном случае роль АРВ сводится к уменьшению площади ускорения F_y и увеличению площади возможного торможения F_T .

В настоящее время устройства АРВ интенсивно совершенствуются в направлении превращения их в многофункциональные средства решения ряда важных задач, включая:

поддержание необходимого уровня напряжения в заданной точке СЭС;

обеспечение высоких пределов статической и динамической устойчивости СЭС;

демпфирование малых и больших колебаний;

формирование возбуждения в аварийных режимах;

ограничение перегрузки машины по токам ротора и статора с выдержкой времени, зависящей от перегрузки;

поддержание постоянства тока возбуждения в режиме выбега генератора.

Кроме того, с помощью устройств АРВ можно дистанционно изменять уставку, выполнять ручное управление возбуждением, изменять статизм регулирования, подгонять уставку напряжения при автоматической синхронизации и осуществлять дополнительно некоторые другие функции.

Во вновь создаваемых СЭС начинают применяться адаптивные регуляторы возбуждения и регуляторы с переменной структурой. Для их создания все шире используются полупроводники, интегральные микросхемы и элементы цифровой вычислительной техники. В этом смысле устройства АРВ по своей конструкции приближаются к аналоговым и цифровым ЭВМ.

Автоматическая разгрузка по частоте. При снижении частоты в СЭС уменьшается генерирование реактивной мощности источниками и увеличивается потребление реактивной мощности нагрузкой. Это приводит к понижению напряжения в узлах нагрузки, а при определенных условиях — к лавине частоты и лавине напряжения, при которых происходит массовое отключение потребителей и нарушение параллельной работы электростанций.

Снижение частоты до опасных пределов практически может быть предотвращено путем ввода вращающегося резерва или автоматического отключения некоторой части нагрузки, т. е. автоматической частотной разгрузкой. Роль ее особенно велика в СЭС небольшой и средней мощностей с малым числом электростанций и слабо развитыми электрическими сетями. По мере укрупнения СЭС относительная доля возможного аварийного небаланса мощности снижается.

В настоящее время особое внимание уделяется выбору и строгому технико-экономическому обоснованию специальной автоматики отключения нагрузки. Эта автоматика позволяет в различных ситуациях повышать как устойчивость СЭС в целом, так и устойчивость нагрузки, предотвращая лавину напряжения или хаотические самоотключения электроприемников, в результате чего обеспечи-

вается нормальная работа основной массы ответственных потребителей.

При подключении промышленных предприятий к системам специальной автоматики отключения нагрузки приходится решать задачи, близкие к тем, которые должны быть решены для обеспечения бесперебойности технологических процессов при перерывах в питании и т. д. Комплексное решение этих задач дает возможность повысить устойчивость в тяжелых аварийных ситуациях.

Аварийная разгрузка турбин генераторов. Действие устройства аварийной разгрузки заключается в том, что спустя некоторое время после возникновения КЗ подается сигнал на закрытие задвижки аппарата впуска энергоносителя (воды или пара) в турбину. При этом механическая мощность турбины падает с $P_{0\max}$ до $P_{0\min}$ (рис. 16.2). Площадь ускорения F_y уменьшается, а площадь возможного торможения F_T увеличивается, что приводит к повышению запаса динамической устойчивости СЭС.

После ликвидации аварии первичные двигатели автоматически или при участии персонала станции вновь набирают прежнюю мощность.

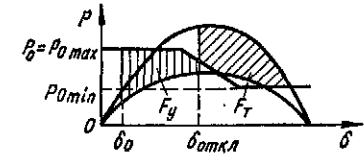


Рис. 16.2. Изменение площадей ускорения и торможения при уменьшении мощности турбины

16.3. Использование устройств релейной защиты и автоматики

Устройства релейной защиты и автоматики позволяют весьма эффективно влиять на устойчивость путем изменения режимов СЭС.

Уменьшение времени отключения КЗ. Сокращение времени отключения КЗ приводит к уменьшению площади ускорения F_y и увеличению площади возможного торможения F_T (рис. 16.3, а). Поскольку ротор генератора при КЗ ускоряется весьма интенсивно (рис. 16.3, б), даже незначительное уменьшение времени отключения КЗ Δt приводит к существенному уменьшению угла отключения $\Delta\delta$.

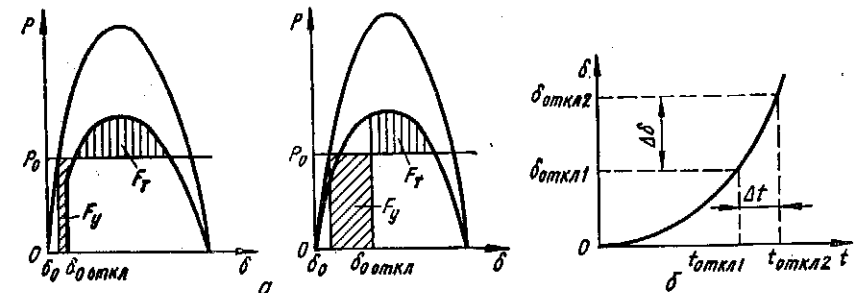


Рис. 16.3. К рассмотрению влияния продолжительности КЗ на устойчивость СЭС

На рис. 16.4 изображена зависимость коэффициента запаса динамической устойчивости K_d от продолжительности КЗ, из которой следует, что сокращение времени отключения КЗ является эффективным способом увеличения запаса динамической устойчивости.

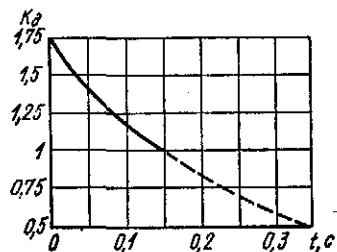


Рис. 16.4. Зависимость коэффициента запаса динамической устойчивости СЭС от продолжительности КЗ

Время отключения КЗ складывается из времени действия релейной защиты и времени срабатывания выключателя:

$$t_{откл} = t_a + t_b.$$

Применяемые воздушные выключатели имеют собственное время срабатывания $t_b = 0,06 \div 0,08$ с. Для работы релейной защиты требуется $t_a = 0,02 \div 0,04$ с. Общее время отключения $t_{откл} = 0,08 \div 0,12$ с. В перспективе возможно сокращение времени отключения КЗ до $0,05 - 0,08$ с.

Автоматическое повторное включение. Преобладающая часть аварийных отключений ВЛ является следствием неустойчивых повреждений, которые самоустраиваются после снятия напряжения путем отключения линии. Обычно подобные нарушения нормального режима работы СЭС возникают при появлении дуги в результате грозových перенапряжений, набросах на провода, перекрытии изоляции и по другим причинам.

Таблица 16.1. Характеристика АПВ электропередачи

Вид АПВ	Напряжение ЛЭП, кВ	Успешность действия АПВ, %
Однократное	2—10	53,5
Двукратное	2—10	56,2
Однократное	110—330	75
Двукратное	110—330	77—80
Однократное	440—500	50

Из опыта эксплуатации известно, что более 50 % всех КЗ прекращаются после временного отключения электропередачи. После повторной подачи напряжения путем АПВ на ЛЭП, в которой произошло неустойчивое повреждение, нормальный режим ее работы восстанавливается. В тех случаях, когда повторное включение оказывается неуспешным, ЛЭП вновь отключается. Успешность действия устройств АПВ характеризуется статистическими данными, приведенными в табл. 16.1.

Автоматическое повторное включение электропередачи позволяет быстро ликвидировать аварию и восстановить нормальную ра-

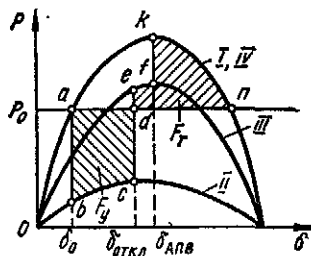


Рис. 16.5. Влияние АПВ на динамическую устойчивость СЭС

боту СЭС не только после самоустраивающихся повреждений, но и при ложном срабатывании средств релейной защиты, самопроизвольном отключении выключателей или ошибочных действиях персонала.

Успешное АПВ увеличивает площадь возможного торможения F_T (рис. 16.5), что способствует сохранению динамической устойчивости СЭС.

На рис. 16.6 изображены схемы электропередачи в режимах, которые соответствуют различным угловым характеристикам мощности, показанным на рис. 16.5.

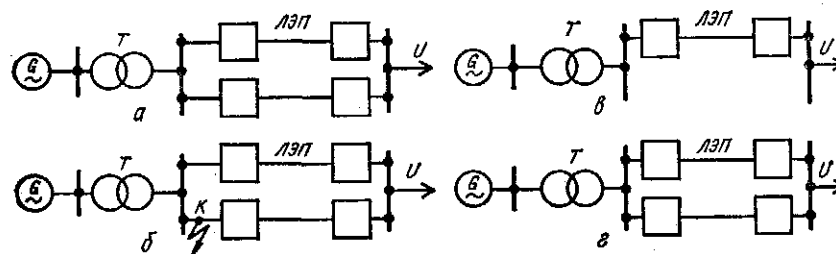


Рис. 16.6. Схемы электропередачи, соответствующие нормальному (а), аварийному (б), послеаварийному (в) режимам и режиму работы после успешного АПВ (г)

Номинальный режим, угловая характеристика мощности которого соответствует кривой I, характеризуется параметрами

$$P_I = E_q U / x_I; \quad x_I = x_d + x_{тр} + x_n / 2.$$

При аварийном режиме (кривая II)

$$P_{II} = E_q U / x_{II}; \quad x_{II} = x_d + x_{тр} + x_n / 2 + (x_d + x_{тр}) x_n / (2x_n).$$

В послеаварийном режиме (кривая III)

$$P_{III} = E_q U / x_{III}; \quad x_{III} = x_d + x_{тр} + x_n.$$

В режиме, соответствующем успешному АПВ, кривая IV совпадает с кривой I и характеризуется параметрами

$$P_{IV} = E_q U / x_{IV}; \quad x_{IV} = x_I = x_d + x_{тр} + x_n / 2.$$

Опыт эксплуатации устройств АПВ показывает, что повторное включение является одним из эффективных средств повышения устойчивости СЭС. Успешное действие устройств АПВ на одиночных питающих ЛЭП позволяет быстро ликвидировать перерывы в электроснабжении и предотвратить полное нарушение электроснабжения, а значит, и технологического процесса на производстве.

Эффективность применения АПВ также высока на ЛЭП с двусторонним питанием, в особенности на мощных межсистемных связях, отключение которых может привести к серьезной аварии в СЭС. Поэтому согласно Правилам устройства электроустановок применение АПВ является обязательным для ЛЭП всех напряжений выше 1 кВ.

Необходимо отметить, что самоустраняющиеся повреждения, помимо ЛЭП, часто происходят на сборных шинах электростанций и подстанций, на трансформаторах и электрических аппаратах. В связи с этим широкое распространение получили также устройства АПВ шин трансформаторов, успешность действия которых составляет 60—75 %.

Регулирование напряжения в узловых точках СЭС. В сложных разветвленных сетях СЭС имеется большое количество узлов электрических нагрузок, связанных различными ЛЭП. Поэтому на уровень напряжения у потребителя, подключенного к какой-либо точке распределительной сети, можно воздействовать, изменяя следующие параметры СЭС:

напряжения центров питания ЭЭС и узловых точек питающих сетей;

коэффициенты трансформации между питающими и распределительными сетями;

потери напряжения, зависящие от схем и параметров СЭС, нагрузок, мест подключения и режимов работы ИРМ.

От значения напряжения зависит срок службы изоляции электрооборудования, расход электрической энергии, запас устойчивости узлов нагрузки и устойчивости СЭС в целом. С целью поддержания напряжения в допустимых пределах применяют следующие способы регулирования напряжения в распределительных сетях:

встречное регулирование напряжения на шинах электростанций и центров питания ЭЭС (регулирование с отрицательным статизмом по определяющим нагрузкам);

изменение коэффициентов трансформации трансформаторов и автотрансформаторов;

регулирование мощности компенсирующих устройств, включенных в точки, где регулируется напряжение (синхронные компенсаторы и двигатели, управляемые батареи статических конденсаторов);

изменение реактивности управляемых реакторов;

применение более быстродействующих по сравнению с синхронными компенсаторами ИРМ с плавным регулированием.

Наибольший эффект от регулирования напряжения достигается при использовании автоматических устройств местного регулирования или систем централизованного контроля и управления с применением вычислительной техники. Целесообразно также использование систем совместного регулирования напряжения и перетоков реактивной мощности. Регулятор напряжения и реактивной мощности должен обеспечивать регулирование напряжения на шинах подстанций и загрузку трансформатора реактивной мощностью в заданных пределах для создания необходимого запаса устойчивости и высокого к. п. д. ЛЭП.

16.4. Мероприятия по повышению устойчивости на стадии проектирования систем электроснабжения

Увеличение реактивной нагрузки генераторов удаленных станций. Повышение реактивной мощности генератора приводит к уменьшению начального угла сдвига φ в связи с увеличением э. д. с. (рис. 16.7, а). Поэтому при выборе коэффициента мощности генератора следует иметь в виду, что с уменьшением $\cos \varphi_{\text{ном}}$ при данной его активной мощности $P_{\text{ном}}$ номинальная полная мощность увеличивается:

$$S_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / \cos \varphi_{\text{ном}}$$

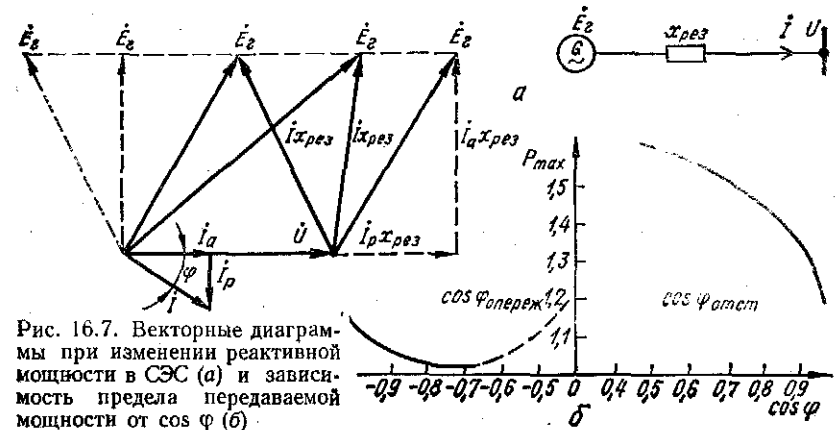


Рис. 16.7. Векторные диаграммы при изменении реактивной мощности в СЭС (а) и зависимость предела передаваемой мощности от $\cos \varphi$ (б).

Для получения возросшей мощности необходимо располагать более мощным генератором. При этом его индуктивное сопротивление будет меньше, а постоянная инерции T_J больше. С этой точки зрения более предпочтительны низкие значения $\cos \varphi_{\text{ном}}$, поскольку увеличение реактивной мощности (уменьшение $\cos \varphi$) приводит к повышению э. д. с. генератора.

На рис. 16.7, а показаны условия передачи одной и той же активной мощности в СЭС при различных значениях $\cos \varphi$. С изменением $\cos \varphi$ конец вектора тока \dot{I} перемещается по вертикали, а активная составляющая \dot{I}_a не меняется. Соответственно концы векторов падения напряжения $\dot{I}x_{res}$ и э. д. с. \dot{E} перемещаются по горизонтали, поскольку значение $\dot{I}_a x_{res}$ при изменении реактивной мощности остается неизменным. Из векторной диаграммы следует, что в области отстающих значений $\cos \varphi$ его увеличение приводит к уменьшению э. д. с., а следовательно, к снижению амплитуды угловой характеристики мощности $P_{max} = EU/x_{res}$. Амплитуда мощности продолжает убывать и при опережающем значении $\cos \varphi$ (рис. 16.7, б).

Практически стремятся ограничить возможные режимы работы генераторов минимумом характеристики $P_{max} = f(\cos \varphi)$, при котором достигается предел устойчивости.

Таким образом, с точки зрения повышения устойчивости работы генераторов их режим при пониженных значениях $\cos \varphi$ более предпочтителен.

Обеспечение резервов активной и реактивной мощностей. Условия надежной работы СЭС требуют определенного резерва мощности как на электростанциях, так и в различных элементах СЭС.

На характер переходного процесса в первую очередь оказывает влияние резерв электростанций, состоящий из аварийного, нагрузочного и ремонтного резервов. С точки зрения влияния на переходные процессы наибольший интерес представляет вращающийся аварийный резерв. Его минимально необходимое значение определяется вероятностью наиболее тяжелых аварий и зависит от способа регулирования возбуждения и автоматической разгрузки СЭС.

Наличие резерва активной мощности в генераторах улучшает как статическую, так и динамическую устойчивость СЭС, обеспечивая их работу с малыми углами δ . Наличие резерва реактивной мощности за счет недогрузки генераторов в исходном режиме приводит к ухудшению устойчивости системы, так как при этом они работают с пониженными значениями токов возбуждения и, следовательно, с большими начальными углами δ .

Распределение резерва и обменных потоков активной мощности имеет большое значение в современных энергетических системах при автоматическом регулировании частоты.

Управляющие системы, используемые для этой цели, развиваются по «вертикали» с совершенствованием регулирования отдельных процессов и одновременно по «горизонтали» с улучшением связей между различными устройствами и регуляторами. Это приводит к созданию объединенных комплексных управляющих устройств с применением ЭВМ, использованием переменной структуры, функциональных зависимостей и т. д. Совмещение регуляторов дает конструктивные выгоды благодаря применению общих измерительных преобразователей, цепей питания и защиты, позволяет повысить эффективность и качество процессов управления за счет использования перекрестных связей между контурами регулирования при взаимной согласованности управляющих воздействий.

Изменение параметров СЭС. Для повышения устойчивости СЭС могут применяться мероприятия, направленные на уменьшение реактивного сопротивления генераторов, трансформаторов и ЛЭП.

При отсутствии АРВ генераторов или применении регулирования с зоной нечувствительности на статическую устойчивость СЭС влияет синхронное сопротивление x_d , на динамическую — переходное сопротивление x_d' . Протекание процессов ресинхронизации и самосинхронизации, а также условия работы генераторов в асинхронном режиме определяются конструкцией их демпферных обмоток и эквивалентных им цепей, что находит отражение в параметрах x_d' и x_d'' .

Рассматривая влияние изменения параметров генераторов на

статическую и динамическую устойчивость СЭС, необходимо различать генераторы без АРВ или с пропорциональным регулированием возбуждения и генераторы с сильным АРВ. Влияние изменения сопротивления генераторов без АРВ видно из соотношения

$$P_{\max} = E_d U / (x_d + x_c),$$

а генераторов с пропорциональным регулированием возбуждения — из соотношения

$$P_{\max} = E' U / (x_d' + x_c).$$

Эффективность улучшения параметров генераторов с сильным АРВ намного ниже.

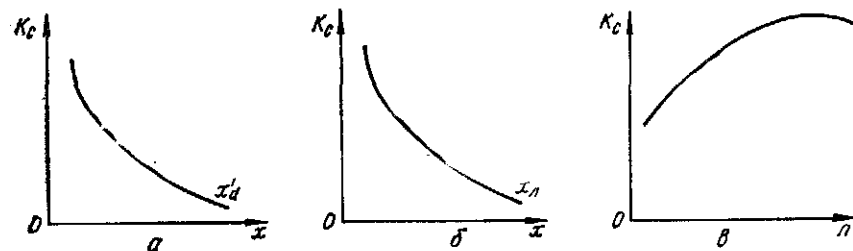


Рис. 16.8. Влияние переходного сопротивления генератора (а), индуктивного сопротивления ЛЭП (б) и числа проводов в фазах ВЛ (в) на запас статической устойчивости СЭС

Характер изменения коэффициента запаса статической устойчивости СЭС при изменении сопротивлений генератора и ЛЭП отражен на рис. 16.8, а и б.

Конструктивные изменения ЛЭП. Из конструктивных решений, предпринимаемых для повышения устойчивости СЭС, в настоящее время применяется только один путь — расщепление каждой фазы на несколько проводов, что приводит к уменьшению сопротивления ВЛ. Этот путь особенно эффективен при дальних электропередачах, где даже при весьма высоких напряжениях пропускная способность электропередач была бы недостаточной. Зависимость коэффициента запаса статической устойчивости СЭС от числа проводов в фазах ВЛ показана на рис. 16.8, в.

Увеличение электромеханической постоянной инерции агрегата. Влияние постоянной инерции T_J на запас динамической устойчивости СЭС и, в частности, на предельное время отключения КЗ удобно показать на простейшем примере трехфазного КЗ у шин станции. В этом случае изменение угла δ определяется выражением

$$\delta - \delta_0 = 180 P / t^2 T_J.$$

Очевидно, для повышения предельного времени отключения КЗ в n раз постоянную инерции агрегата при том же критическом угле δ (т. е. при том же запасе устойчивости) следует увеличить в n^2 раз. Следовательно, при удвоении постоянной инерции агрегата предельное время отключения КЗ возрастает примерно на 45 %.

Обычно при изменении постоянной инерции изменяются и другие параметры и характеристики генераторов, в том числе их стоимость. Зависимость стоимости генератора от постоянной инерции изображена на рис. 16.9.

Заземление нейтралей трансформаторов. Если нейтрали трансформаторов заземлить через небольшие сопротивления, не повышающие существенно напряжение нейтрали, то условия работы изоляции не изменятся, но устойчивость СЭС при несимметричных КЗ заметно увеличится.

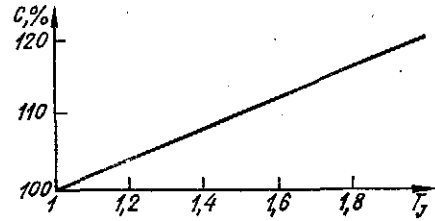


Рис. 16.9. Зависимость стоимости генератора от постоянной инерции

В качестве примера рассмотрим однофазное КЗ в СЭС, где обмотки трансформаторов соединены в звезду, а их нейтрали заземлены через активные сопротивления (рис. 16.10, а).

Схема замещения нулевой последовательности изображена на рис. 16.10, б, а комплексная схема замещения СЭС при однофазном КЗ имеет вид, показанный на рис. 16.10, в.

Увеличение сопротивления аварийного шунта z_k , состоящего из суммарного сопротивления обратной последовательности $x_{2\text{рез}}$

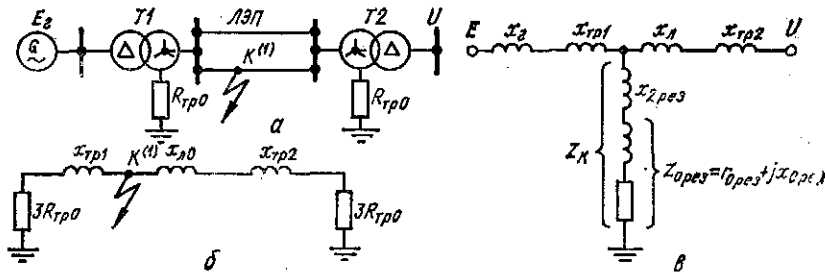


Рис. 16.10. Схема СЭС с заземленными нейтралью трансформаторов (а), схема замещения нулевой последовательности (б) и комплексная схема замещения (в)

и суммарного сопротивления нулевой последовательности $Z_{0рез}$ (см. рис. 16.10, в), приводит к увеличению амплитуды угловой характеристики мощности в аварийном режиме, а значит, к повышению динамической устойчивости СЭС.

Контрольные вопросы

1. Каковы мероприятия по повышению устойчивости и надежности СЭС?
2. Как влияет регулирование возбуждения генератора на статическую и динамическую устойчивость СЭС?
3. Каковы наиболее эффективные методы повышения устойчивости СЭС с помощью регуляторов электростанций?
4. Как влияет продолжительность КЗ на динамическую устойчивость СЭС?
5. Как влияет вид КЗ на динамическую устойчивость СЭС?
6. Влияет ли регулирование напряжения на повышение устойчивости СЭС?

7. Как влияет реактивная мощность на статическую и динамическую устойчивость СЭС?
8. Какие мероприятия режимного характера применяются для повышения устойчивости СЭС и какова их эффективность?
9. Какие методы и средства повышения устойчивости предусматриваются при проектировании СЭС?

Темы рефератов

1. Основные рекомендации по улучшению устойчивости действующей СЭС.
2. Техно-экономическое сравнение мероприятий по повышению устойчивости и надежности СЭС.
3. Основные направления повышения устойчивости СЭС за счет использования их конструктивных и режимных особенностей.
4. Применение вычислительной техники для реализации мероприятий по повышению устойчивости СЭС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андерсон П., Фуад А.* Управление энергосистемами и устойчивость.— М.: Энергия, 1980.—568 с.
2. *Авербух А. М.* Примеры расчетов неполнофазных режимов и коротких замыканий.— Л.: Энергия, 1979.—184 с.
3. *Бернас С., Цяк З.* Математические модели элементов электроэнергетических систем.— М.: Энергоиздат, 1982.—313 с.
4. *Буслова Н. В.* и др. Электрические системы и сети.— К.: Вища шк. Головное изд-во, 1986.—584 с.
5. *Вагин Г. Я.* Режимы электросварочных машин.— М.: Энергоатомиздат, 1985.—192 с.
6. *Важнов А. И.* Переходные процессы в машинах переменного тока.— Л.: Энергия, 1980.—256 с.
7. *Веников В. А.* Переходные электромеханические процессы в электрических системах.— М.: Высш. шк., 1985.—536 с.
8. *Жданов П. С.* Вопросы устойчивости электрических систем.— М.: Энергия, 1979.—456 с.
9. *Жежелевко И. В.* Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях.— М.: Энергоатомиздат, 1986.—168 с.
10. *Жежелевко И. В.* и др. Эффективные режимы работы электротехнологических установок.— К.: Техніка, 1987.—183 с.
11. *Кнеллер И. О.* Применение ЭВМ в энергосистемах.— М.: Энергоиздат, 1981.—182 с.
12. *Львов А. П.* Электрические сети повышенной частоты.— М.: Энергоиздат, 1981.—104 с.
13. *Лосев С. В., Чернин А. В.* Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем.— М.: Энергоиздат, 1983.—528 с.
14. *Маркович И. М.* Режимы энергетических систем.— М.: Госэнергоиздат, 1969.—350 с.
15. *Методические указания по определению устойчивости энергосистем.*— М.: СПОСсоюзтехэнерго, 1979.— Ч. 2.— 152 с.
16. *Неклепаев Б. Н.* Электрическая часть электростанций.— М.: Энергия, 1986.—640 с.
17. *Неклепаев Б. Н.* Координация и оптимизация уровней токов короткого замыкания в электрических системах.— М.: Энергия, 1978.—152 с.
18. *Применение аналоговых вычислительных машин в энергетических системах: Методы исследования переходных процессов / Под ред. Н. И. Соколова.*— М.: Энергия, 1970.—400 с.
19. *Расчеты токов короткого замыкания с использованием аналоговых устройств (моделей) и цифровых электронных вычислительных машин.*— М.: Энергия, 1976.—89 с.
20. *Регулирование напряжения в электроэнергетических системах / В. А. Веников, В. И. Идельчик, М. С. Лысеев.*— М.: Энергоатомиздат, 1985.—316 с.
21. *Руководящие указания по расчету коротких замыканий, выбору и проверке аппаратов и проводников по условиям короткого замыкания.*— М.: МЭИ, 1980.—321 с.
22. *Рюденберг Р.* Эксплуатационные режимы электроэнергетических систем и установок.— Л.: Энергия, 1981.—578 с.
23. *Справочник по проектированию электроснабжения / Под ред. В. И. Крупвича и др.*— М.: Энергия, 1980.—456 с.
24. *Сыромятников И. А.* Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / Под ред. Л. Г. Мамиконяца.— М.: Энергоатомиздат, 1985.—216 с.
25. *Ульянов С. А.* Электромагнитные переходные процессы в электрических системах.— М.: Энергия, 1970.—520 с.
26. *Ульянов С. А.* Сборник задач по электромагнитным переходным процессам в электрических системах.— М.: Энергия, 1968.—456 с.
27. *Устойчивость нагрузки электрических систем / Ю. Е. Гуревич, Л. Е. Либова, Э. А. Хачатрян.*— М.: Энергоиздат, 1981.—208 с.
28. *Шидловский А. К.* и др. Оптимизация несимметричных режимов систем электроснабжения.— К.: Наук. думка, 1987.—176 с.
29. *Щербачев О. В.* и др. Применение цифровых вычислительных машин в электроэнергетике.— Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1980.—240 с.
30. *Шукин Б. Д., Лыков Ю. Ф.* Применение ЭВМ для проектирования систем электроснабжения.— М.: Энергоиздат, 1982.—174 с.
31. *Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях / Под ред. В. А. Веникова.*— М.: Энергоатомиздат, 1983.—456 с.

Аварии 215
 Автоматы коммутационные 107, 242
 Аппараты токоограничивающие коммутационные 250

Величины переходные 271
 Включение в фазы несимметричных сопротивлений 188
 — повторное автоматическое 17, 410
 Воздействия возмущающие сильные 266
 — слабые 266

Время критическое 66
Выключатели автоматические 252

Граница D-разбиения 306
 — устойчивости апериодическая 303
 — колебательная 303

Двигатель асинхронный 26, 28, 55
 — синхронный 25, 28, 55
 — эквивалентный 97

Движение асимптотически устойчивое 300

Деление сети автоматическое 244
Диаграммы токов и напряжений векторные 158

Длительность переходного процесса 234

Заземление нейтралей трансформаторов 416

— нейтрали рабочее 255
Замыкание короткое двухфазное 145, 156

— на землю 146, 157

— на зажимах генератора без АВР 57

— с АВР 62

— однофазное 144, 156

— с разрывом фазы 199

— малоудаленное 24

— на землю двойное 191

— удаленное 24

Замыкания короткие 19

— в питающих сетях 212

— в сетях повышенной частоты 220
 — постоянного тока 215
 — удаленных точках СЭС 63
 — на землю в сетях с изолированной нейтралью 166, 221

Изменение режима нейтрали 242
Источник реактивной мощности 24, 367

Качество электромагнитных переходных процессов 234
Колебания напряжения 226, 236
 — частоты 236

Компенсатор синхронный 25, 27
Координация уровней токов КЗ 259
Коэффициент затухания составляющей тока КЗ аperiодической 235

— периодической 235
 — несимметрии 236
 — несимметричности 236
 — ступени КЗ 108
 — ударный 60, 95, 99, 111

Коэффициенты регулирующего эффекта нагрузки 372

Кривая Михайлова 304

Кривые токов КЗ расчетные 79

— типовые 83

Критерии устойчивости 302

Критерий устойчивости Гурвица 302, 321

— Жданова 298

— Льенара — Шипара 303

— Михайлова 304

— Рауса 303

Лавина напряжения 371

Линия воздушная 26, 29, 107, 166

— кабельная 27, 29, 107, 166

Метод D-разбиения 306, 327

— площадей 329

— последовательных интервалов 311

— расчета токов КЗ прямой 116
 — симметричных составляющих 124
Методы определения динамической устойчивости СЭС 308
Модели СЭС 289
 — элементов СЭС 284
Модель переменного тока динамическая 333
 — статическая 333
Мощность генератора асинхронная 280, 328
 — синхронизирующая 275

Наброс нагрузки на электродвигатели 384, 387
Нагрузка обобщенная 26, 28, 56
 — статическая 346
Напряжение на зажимах двигателя критическое 296
Несимметрия двукратная 191
 — поперечная 138, 142
 — продольная 138, 182

Ограничители ударного тока 251

Площадь торможения 310
 — ускорения 310

Повреждения изоляции элементов неустойчивые 16

Показатели качества переходных процессов 234

Правило эквивалентности прямой последовательности 150

Предел мощности идеальный 274

Предохранители токоограничивающие 251

Приведение параметров элементов СЭС приближенное 31

— точное 29

Процесс переходный в синхронной машине без демпферных обмоток 42

— с демпферными обмотками 45

— узле нагрузки 389

— при пуске асинхронного двигателя 389

— ресинхронизации 328

— синхронизации 328

Процессы переходные в особых условиях 212

— обусловленные особенностями технологии производства 226

— электромагнитные 11

— электромеханические 266

Разгрузка по частоте автоматическая 408

— турбин генераторов аварийная 409

Разрыв двух фаз трехфазной цепи 186

— фазы трехфазной цепи 185

Расчет КЗ 22

Реактор 26, 29, 247
Реакторы токоограничивающие 245
 — одноцепные 246
 — сдвоенные 246, 248
 — секционные 248
Регулирование возбуждения автоматическое 12, 316, 407
 — напряжения в узловых точках СЭС 412
 — под нагрузкой 32
Регуляторы возбуждения автоматические 317
Режим асинхронный 279
 — КЗ установившийся 69
 — номинального напряжения генератора 70
 — предельного возбуждения генератора 71
 — системы 14, 277
Режимы переходные нормальные 14
 — аварийные 15
 — послеаварийные 15
 — установившиеся 14
Резерв электростанций 414

Самовозбуждение асинхронных двигателей 396

Самозапуск двигателей асинхронных 391

— синхронных 394

Система уравнений Парка — Горева 53

Скольжение синхронного двигателя критическое 396

Сопrotивление переходное продольное индуктивное 43

— сверхпереходное реактивное поперечное 46

— продольное 46

Сопrotивления плоских шин 106

— первичных обмоток трансформатора тока 107

— прямой, обратной и нулевой последовательностей 127

— результирующие 140

— фазы комплектных шинопроводов 107

— элементов СЭС токам отдельных последовательностей 129

Способ утяжеления режима 291

Способы ограничения токов КЗ 236

Стойкость элементов СЭС термическая 235

— электродинамическая 235

Схемы замещения комплексные 153

— отдельных последовательностей 137

— элементов СЭС 27, 287, 293, 298, 328, 353, 369

Таблица Рауса 304

Токи КЗ в электроустановках напряжением до 1 кВ 105
Ток КЗ в произвольный момент времени 68, 79
— начальный 66, 71
— ударный 60, 96, 111
— переходный начальный 45
Точка удаленная 64
Трансформаторы 26, 28, 106, 244

Удаленность электрическая 24
Узел нагрузки 344, 346
Уравнение электромеханических переходных процессов 268
Уравнения переходного процесса 48
Уровни токов КЗ 234, 256
Условие ресинхронизации генератора 330
— двигателя 332
Условия аварийные 16
Установки электрические осветительные 345
— преобразовательные 345
— электротехнологические 345

Устойчивость двигателей асинхронных 361
— синхронных 362
— динамическая 15, 275, 308, 312, 324
— режима СЭС 15, 266, 406
— результирующая 15, 279, 328
— статическая 15, 271, 290, 299, 318, 351, 353
— узлов нагрузки при возмущениях сильных 382
— слабых 357, 363, 371

Фаза особая 124, 142

Характер изменения э. д. с. генератора 325
— переходного процесса 235
Характеристика мощности генератора угловая 274, 276, 278
— срабатывания 253
— токоограничения 253
Характеристики асинхронного двигателя 350, 387, 388
— идеализированные вращающего момента турбины 286
— мощности синхронного двигателя угловые 384
— системы угловые 309, 352
— нагрузки 289, 347
— динамические 349
— статические 348

Частота вращения подсинхронная 390

Шины и шинопроводы 107

Э. д. с. переходная поперечная 43
Э. д. с. результирующие 140
— сверхпереходные 46
Эксплуатация нормальная 16
Электродвигатели производственных механизмов 345
Электростанции ведомые по частоте 270
— ведущие 270
Энергия избыточная 272
Эффект нагрузки регулирующий 352

Учебник

ВИНОСЛАВСКИЙ
Василий Николаевич
ПИБНЯК
Геннадий Григорьевич
НЕСЕН
Лариса Ивановна
РЫБАЛКО
Анатолий Яковлевич
ПРОКОПЕНКО
Владимир Васильевич

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ
В СИСТЕМАХ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Оформление художника
Г. М. Балюна

Художественный редактор
С. П. Духленко

Технический редактор
Н. Н. Горбунова

Корректор Н. И. Кунцевская

ИБ № 12806

Сдано в набор 12.09.88. Подписано в печать 06.07.89. БФ 03107. Формат 60×90/16. Бумага типографская № 2. Гарнитура литературная. Высокая печать. Усл. печ. л. 26,5. Усл. кр.-отт. 26,5. Уч.-изд. л. 27,71. Тираж 5000 экз. Изд. № 8204. Заказ № 8-3755. Цена 1 р. 20 к.

Главное издательство издательского объединения «Выща школа», 252054, Киев-54, ул. Гоголевская, 7.

Отпечатано с матриц Главного предприятия РПО «Полиграфкнига», 252057, Киев, ул. Довженко, 3, в Киевской книжной типографии научной книги, 252004 Киев, ул. Репина, 4. Зак. 9-710.

**В Головном издательстве
издательского объединения «Выща школа»
готовится к выпуску в свет в 1990 году
справочник:**

**Кривоногов Ю. А., Морозов А. А. Мини- и микроЭВМ (номен-
клатура и технико-эксплуатационные характеристики) / Под ред.
д-ра техн. наук В. В. Свиридова. 14 л., ил. Язык русский. 90 к.**

Рассмотрены номенклатура и технико-эксплуатационные харак-
теристики современных и перспективных образцов мини- и микро-
ЭВМ, а также автоматизированных рабочих мест на их основе, ко-
торые применяются в различных сферах народного хозяйства.

Для преподавателей вузов, студентов, научных и инженерно-
технических работников, а также тех, кто интересуется вопросами
новой техники.

Уважаемые товарищи!

*Эту книгу можно заказать в магазинах облкниготоргов, облпот-
ребсоюзов, а также в специализированном магазине «Книга — поч-
той» (252117, г. Киев — 117, ул. Попудренко, 26).*