

Г.И. Атабеков

**Теоретические основы релейной защиты
высоковольтных сетей**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 621.39
ББК 32
Г11

Г11 **Г.И. Атабеков**
Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей / Г.И. Атабеков – М.: Книга по Требованию, 2023. – 344 с.

ISBN 978-5-458-48959-1

ISBN 978-5-458-48959-1

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2023
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2023

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3	3-3. Применимость однофазных схем замещения для расчета переходных процессов при несимметричных режимах	60
Введение	8	3-4. Расчет переходного процесса операторным методом	65
В-1. Развитие техники релейной защиты в СССР	8	3-5. Метод интеграла Фурье	68
В-2. Задачи теоретического анализа, выдвигаемые практикой эксплуатации и проектирования релейной защиты высоковольтных сетей	11	3-6. Метод характеристик	71
Глава первая. Построение и применение комплексных схем замещения при сложных несимметричных режимах		Глава четвертая. Фильтры симметричных составляющих	
1-1. Нарушения нормального режима работы высоковольтных сетей ...	15	4-1. Развитие фильтров симметричных составляющих	79
1-2. Комплексные схемы замещения при поперечной несимметрии в одной точке	18	4-2. Исходные теоретические положения	80
1-3. Комплексные схемы замещения при продольной несимметрии	20	4-3. Исследование фильтров методом эквивалентного источника	82
1-4. Комплексные схемы замещения при сложных несимметричных режимах	22	4-4. Условие отдачи максимума мощности фильтром в нагрузку	84
1-5. Применение комплексных схем замещения при расчете сложных несимметричных режимов	22	4-5. Разновидности фильтров. Требования, предъявляемые к фильтрам ..	86
Глава вторая. Метод геометрических мест в применении к исследованию режимов работы электропередач		4-6. Устранение влияния составляющих нулевой последовательности	87
2-1. Комплексные уравнения и геометрические места на комплексной плоскости	33	4-7. Фазовые сдвиги, осуществляемые в фильтрах	87
2-2. Обращение прямой	34	4-8. Сопоставление фильтров напряжения и тока на основе метода дуальных цепей	91
2-3. Обращение окружности	35	4-9. Схемы внутренних соединений, векторные диаграммы и параметры фильтров обратной последовательности	96
2-4. Расчетные схемы	36	4-10. Выбор наиболее выгодной схемы фильтра обратной последовательности	96
2-5. Диаграммы полных сопротивлений на зажимах реле при изменении э. д. с. по концам электропередачи	38	4-11. Комбинированные фильтры тока	96
2-6. Диаграммы полных проводимостей на зажимах реле при изменении э. д. с. по концам электропередачи	49	4-12. Фильтры-сумматоры	101
2-7. Диаграммы токов по концам поврежденной линии электропередачи	54	4-13. Общая методика расчета фильтров	103
2-8. Диаграммы токов и напряжений при изменении сопротивления в месте повреждения	55	4-14. Расчетные выражения для четырехэлементного фильтра обратной последовательности	106
2-9. Диаграммы полных сопротивлений на зажимах реле при изменении сопротивления в месте повреждения	57	4-15. Расчет параметров реле	109
Глава третья. Методы расчета переходных процессов в высоковольтных сетях		Глава пятая. Органы направления мощности	
3-1. Состояние вопроса	58	5-1. Назначение органов направления мощности	110
3-2. Комплексная форма расчета переходных процессов	59	5-2. Разновидности органов направления мощности. Требования, предъявляемые к органам направления мощности	110
		5-3. Характеристики органов направления мощности	111
		5-4. Принципы конструктивного выполнения органов направления мощности	114
		5-5. Распределение мощностей прямой, обратной и нулевой последовательностей при повреждениях в системе	120

5-6. Трехфазное трехэлементное реле направления мощности	122	7-2. Классификация высокочастотных защит	251
5-7. Трехфазное одноэлементное реле направления мощности	130	7-3. Основные требования, предъявляемые к высокочастотной защите	253
5-8. Трехсистемное и двухсистемное исполнение органов направления мощности	131	7-4. Работа направленной высокочастотной защиты при качаниях ..	254
5-9. Односистемное исполнение органа направления мощности, реагирующего на полные токи и напряжения	138	7-5. Особенности высокочастотной защиты с органом направления в фазах	256
5-10. Органы направления мощности обратной и нулевой последовательностей	141	7-6. Быстродействующая фильтровая направленная высокочастотная защита	263
Глава шестая. Дистанционная защита		7-7. Работа направленной высокочастотной защиты при неполнофазном режиме	269
6-1. Назначение дистанционных реле ..	144	7-8. Дифференциально-фазная высокочастотная защита	270
6-2. Классификация типов дистанционных реле	147	7-9. Фазовые соотношения токов при повреждениях в защищаемой зоне	271
6-3. Характеристики дистанционных реле на комплексной плоскости полных сопротивлений и проводимостей	148	7-10. Фазовые погрешности при внешних коротких замыканиях	275
6-4. Принципы конструктивного выполнения дистанционных реле ..	154	7-11. Органы сравнения и пуска	277
6-5. Способы компенсации напряжения при различных видах коротких замыканий	169	7-12. Принципы, положенные в основу отечественной дифференциально-фазной высокочастотной защиты ..	279
6-6. Включение дистанционных реле при работе линии электропередачи в блоке с трансформатором	177	7-13. Особенности высокочастотной защиты продольно-компенсированных линий электропередачи	281
6-7. Влияние присоединений между местом установки защиты и местом повреждения	179	Глава восьмая. Устройства для выбора поврежденной фазы в системах с ОАПВ	
6-8. Влияние сопротивлений в месте короткого замыкания на работу дистанционных реле	180	8-1. Однофазные отключения и автоматические повторные включения ..	285
6-9. Особенности дистанционной защиты параллельных линий электропередачи	192	8-2. Требования, предъявляемые к устройствам для выбора поврежденной фазы	288
6-10. Особенности дистанционной защиты продольно-компенсированных линий электропередачи	196	8-3. Принципы выполнения устройств для выбора поврежденной фазы при помощи органов направления мощности	289
6-11. Работа дистанционных реле при расхождении э. д. с. генераторов по фазе, не сопровождаемых короткими замыканиями	206	8-4. Дистанционные избиратели фаз ..	293
6-12. Работа дистанционных реле при несимметричных режимах и коротких замыканиях с учетом расхождения э. д. с. генераторов по фазе	210	Глава девятая. Дифференциальная токовая защита линий и шин	
6-13. Влияние трансформации звезда—треугольник на работу дистанционных реле	220	9-1. Дифференциальный принцип	296
6-14. Работа дистанционных реле при неполнофазном режиме	227	9-2. Продольная дифференциальная токовая защита линий	297
6-15. Работа быстродействующих дистанционных реле при переходных режимах	229	9-3. Поперечная балансная токовая защита параллельных линий	301
6-16. Трехсистемное выполнение дистанционной защиты	232	9-4. Поперечная дифференциальная направленная защита параллельных линий	306
6-17. Двухсистемное выполнение дистанционной защиты	236	9-5. Особенности поперечной защиты продольно-компенсированных параллельных линий электропередачи ..	309
6-18. Односистемное выполнение дистанционной защиты	238	9-6. Дифференциальная защита шин ..	309
Глава седьмая. Высокочастотная защита		Глава десятая. Устройства, предотвращающие неправильные действия релейной защиты при качаниях и при неисправностях во вторичных цепях трансформаторов напряжения	
7-1. Назначение высокочастотной защиты	249	10-1. Меры повышения устойчивости параллельной работы электростанций в энергосистемах	317

10-2. Устройства для предотвращения неправильных действий защиты при качаниях	317
10-3. Устройства для предотвращения неправильных действий защиты при неисправностях во вторичных цепях трансформаторов напря- жения	324

ПРИЛОЖЕНИЯ.

Приложение 1. Зоны действия отсечек, применяемых в качестве основной защиты линий электропередачи	327
--	-----

Приложение 2. Проверка необходимо- сти выведения из дей- ствия односистемной защиты полного сопро- тивления от замыка- ний между фазами при замыканиях на землю	331
---	-----

Приложение 3. Выражения реактивных сопротивлений на за- жимах омметров при замыканиях на землю на одной из параллель- ных линий	333
--	-----

Л и т е р а т у р а	336
А л ф а в и т н ы й у к а з а т е л ь	343

ВВЕДЕНИЕ

В-1. РАЗВИТИЕ ТЕХНИКИ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В СССР

В СССР в больших масштабах осуществлено экономически целесообразное сочетание работы тепловых электростанций с гидроэлектрическими станциями. Созданы объединенные энергетические системы, имеющие сложные высоковольтные сети: Уральская энергосистема, объединяющая электростанции Челябинской, Свердловской и Молотовской областей; Южная энергосистема, объединяющая электростанции Донбасса, Днепра и Ростовской области; Центральная энергосистема, объединяющая электростанции Москвы, Московской, Тульской, Ивановской, Владимирской, Ярославской и Горьковской областей.

С соединением существующих энергосистем с Куйбышевской и Сталинградской гидроэлектростанциями создается крупнейшая в мире единая энергетическая система, охватывающая европейскую часть Советского Союза.

Нормальная эксплуатация электроэнергетических систем немыслима без широкой автоматизации производственных процессов.

Автоматизация необходима не только для облегчения человеческого труда, но и для улучшения качества выполнения отдельных производственных операций и для осуществления таких функций, которые не могут выполняться непосредственно человеком.

Задачи внедрения автоматизации и телемеханизации в производственные процессы электрических станций и сетей неоднократно занимали важное место в решениях высших партийных и советских органов.

XVIII съезд ВКП(б) принял решение: «Широко внедрить новейшую энергетическую технику, высокое давление и перегрев пара, применение новейших

теплофикационных турбин и автоматизацию производственных процессов электростанций и сетевого хозяйства»¹.

В законе о пятилетнем плане восстановления и развития народного хозяйства СССР перед советскими энергетиками вновь была поставлена задача «Широко развернуть работы по автоматизации производственных процессов электростанций и электросетей; в первую очередь проводить полную автоматизацию работы гидроэлектростанций»².

В Директивах XIX съезда КПСС по пятому пятилетнему плану развития СССР на 1951—1955 годы указано: «Осуществить широкое применение автоматизации производственных процессов на электростанциях. Завершить полную автоматизацию районных гидроэлектростанций, а также приступить к внедрению телемеханизации в энергетических системах»³.

Наконец, Директивами XX съезда КПСС по шестому пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1956—1960 годы предусмотрено «...осуществление комплексной автоматизации управления на всех тепловых электростанциях, начинаемых строительством в шестой пятилетке»⁴.

В общем комплексе средств автоматизации, предназначенных для повышения качества производства электроэнергии

¹ КПСС в резолюциях и решениях съездов, конференций и пленумов ЦК, ч. II, стр. 889, изд. 7-е.

² Закон о пятилетнем плане восстановления и развития народного хозяйства СССР на 1946—1950 годы, раздел II, п. 10.

³ Директивы XIX съезда КПСС по пятому пятилетнему плану развития СССР на 1951—1955 годы, раздел I, п. 6.

⁴ Директивы XX съезда КПСС по шестому пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1956—1960 годы, раздел II, п. 3.

и обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей, центральное место занимает техника релейной защиты энергосистем. Предупреждая развитие аварий и пресекая возможность распространения влияния повреждений на остальную часть системы, релейная защита вместе с устройствами электроавтоматики и телемеханики является важным звеном в техническом оснащении наших энергосистем.

Представляя относительно молодую отрасль электротехники, релейная защита завоевала весьма ответственное место в эксплуатации современных электрических систем.

Развитие техники релейной защиты неуклонно сопутствовало общему прогрессу электроэнергетики, ставившей перед техникой релейной защиты все новые и новые задачи.

Расширение высоковольтных систем, их взаимное объединение, повышение требований в отношении бесперебойности электроснабжения привели к необходимости проведения в энергосистемах, на заводах-изготовителях, в проектных и научно-исследовательских организациях большой творческой работы по изучению явлений, происходящих в электрических системах, по разработке методов расчетов, по созданию новых принципов защиты и конструированию реле, обеспечивающих немедленную локализацию и ликвидацию коротких замыканий.

Будучи неразрывно связанной с развитием смежных с ней областей современной электротехники — электроматериаловедения, техники высокой частоты, электроизмерительной техники, электроники и т. д., — релейная защита за сравнительно короткий срок своего существования выросла в большую область техники, охватывающую значительный комплекс разнохарактерных проблем.

Углубленная теоретическая и экспериментальная разработка вопросов релейной защиты была начата в Советском Союзе в тридцатых годах в Лаборатории высокого напряжения имени А. А. Смурова в Ленинграде, на Харьковском электромеханическом заводе, в ОРГРЭС, в Теплоэлектропроекте и в

крупнейших энергосистемах Советского Союза — Мосэнерго, Ленэнерго, Уралэнерго и др.

Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные в отделении релейной защиты Лаборатории высокого напряжения имени А. А. Смурова под руководством В. И. Иванова и П. И. Рыжова, положили начало систематическому изучению действия различных типов реле при ненормальных режимах работы энергетических систем и позволили объективно и критически оценить разнообразные конструкции реле и схемы защит.

Примерно к этому же периоду времени относятся также теоретические исследования, проводившиеся в секторе сетей проектного управления «Энергострой», продолженные затем в Теплоэлектропроекте.

Период, предшествовавший началу второй мировой войны, примерно с 1930 по 1940 г. — ознаменован быстрым прогрессом техники релейной защиты. Энергосистемы и релейная промышленность непрерывно обогащались новыми конструкциями и типами защиты.

Характерными для этого периода тенденциями в развитии техники релейной защиты являлись:

- 1) переход от медленно действующих реле и выключателей к быстродействующим;
- 2) переход от малочувствительных защит к высокочувствительным;
- 3) начало внедрения устройств автоматизации электрической части станций и подстанций.

На ХЭМЗ было освоено производство многочисленных типов и серий реле, в результате чего номенклатура аппаратуры релейной защиты и электроавтоматики, выпущенной ХЭМЗ, была значительно расширена.

В свою очередь персоналом служб релейной защиты энергосистем была проведена большая работа по изучению опыта эксплуатации релейной защиты, по реконструкции старых типов защиты, освоению и внедрению в эксплуатацию новых типов реле и схем защиты.

Этому в значительной мере способствовали также работы электроцеха

ОРГРЭС по исследованию действия релейной защиты при ненормальных режимах и по разработке методов испытания реле и защитных устройств, вводимых в эксплуатацию.

Параллельно с разработкой принципов защиты, конструированием реле и созданием схем в Советском Союзе велась глубокая и всесторонняя разработка методов расчета токов короткого замыкания и устойчивости параллельной работы электрических систем.

В результате работ, выполненных в этот период времени в Советском Союзе, был накоплен богатый опыт проектирования и расчета релейной защиты; разработаны оригинальные отечественные конструкции и схемы защиты; выявлены основные недостатки конструктивного выполнения реле и компоновки схем защиты иностранных фирм и проведены мероприятия по усовершенствованию релейной защиты и повышению надежности ее действия.

Большая методическая работа по обобщению накопленного опыта проектирования и методов расчета релейной защиты проведена в Теплоэлектропроекте, где, начиная с 1932 г., разрабатывались и неоднократно выпускались в свет «Руководящие указания по релейной защите».

В числе мероприятий, способствовавших развитию техники релейной защиты в СССР, следует также отметить систематическую подготовку кадров, проводившуюся на курсах повышения квалификации работников служб релейной защиты и в вузах.

Реализуя решения XVIII съезда ВКП(б) о широком внедрении новейшей энергетической техники и автоматизации основных производственных процессов электростанций и сетевого хозяйства, работники энергосистем Советского Союза приступили к массовому внедрению в эксплуатацию быстродействующих защит и устройств электроавтоматики, обеспечивающих устойчивую и бесперебойную работу электрических систем. В свою очередь ХЭМЗ, используя типовые разработки ТЭП и других организаций, приступил к комплектной поставке защитных устройств.

Война временно прервала плодотворную деятельность по усовершенствованию

релейной защиты и созданию новых конструкций и принципов защиты и принудила заняться в первую очередь приспособлением к условиям военного времени релейной защиты эксплуатируемых, сооружаемых и восстанавливаемых электроэнергетических установок.

Следует особо отметить успешную работу персонала служб релейной защиты в тяжелых военных условиях — при воздушных налетах противника (Мосэнерго, Ленэнерго, Горэнерго, Ярэнерго и др.), в условиях блокады (Ленинград), при быстром росте установленных мощностей и развитии высоковольтных сетей (Урал, Кемерово, Узбекистан).

Повышению надежности работы энергосистем и обеспечению бесперебойности снабжения потребителей как в военный, так и в последующий период времени способствовало сочетание релейной защиты энергосистем с отдельными видами электроавтоматики, широко внедрявшейся в эксплуатацию. Трехфазное и пофазное автоматическое повторное включение линий (АПВ), автоматическое включение резерва (АВР), автоматическая частотная разгрузка энергосистем (АЧР) и другие виды автоматизации электрических систем сочетались с современной релейной защитой и были включены в круг деятельности работников релейных служб.

Послевоенный период отмечен дальнейшим развитием техники релейной защиты и автоматизации энергосистем. Большая работа была проведена по восстановлению релейной защиты на территориях, находившихся в зоне военных действий или временно оккупированных противником (Донбасс, Ростов, Днепродзержинск и др.). В энергосистемах Советского Союза в массовых масштабах были внедрены быстродействующие защиты и устройства электроавтоматики.

Выполнение задач, поставленных перед советскими электроэнергетиками в области релейной защиты и электроавтоматики, потребовало совместных усилий работников энергосистем, заводоизготовителей, проектных и научно-исследовательских организаций.

В целом ряде организаций (ЦНИЭЛ, ТЭП, ОРГРЭС и т. д.), заводов и энергосистем Советского Союза была раз-

вернута работа по созданию новых принципов действия и конструкций реле, по дальнейшему внедрению новой техники и усовершенствованию методов эксплуатации устройств.

Отличительной особенностью развития отечественной техники релейной защиты за последние годы явились: дальнейшее упрощение защиты, например за счет расширения области применения отсечек в качестве основной защиты линий электропередачи; более тесное сочетание релейной защиты с устройствами электроавтоматики (АПВ, АВР, АЧР) и телемеханики (телеуправление, телеблокировка и т. д.); создание и внедрение в эксплуатацию новых, более простых и надежных систем релейной защиты; разработка и внедрение прогрессивных методов эксплуатации релейной защиты и т. д.

Благодаря упорному труду работников служб релейной защиты и системной автоматики энергосистем Советского Союза достигнута высокая культура эксплуатации релейной защиты, обусловившая значительное повышение среднего процента правильных действий устройств защиты и автоматики и сокращение аварийного недоотпуска электроэнергии.

Успешному развитию релейной защиты и автоматизации энергетических систем способствует широкое привлечение общественности к работам всесоюзных конференций и совещаний, а также творческое содружество работников науки и промышленности.

Большие успехи советского народа, достигнутые в различных областях науки и техники, являются залогом того, что отечественные специалисты по релейной защите с честью разрешат стоящие перед ними задачи по дальнейшему обеспечению бесперебойной работы энергетических систем.

В-2. ЗАДАЧИ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА, ВЫДВИГАЕМЫЕ ПРАКТИКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СЕТЕЙ

Развитие техники релейной защиты идет по пути обобщения опыта, накопленного в энергосистемах, и разре-

шения технических задач, выдвигаемых практикой эксплуатации и проектирования современных электрических систем. В своем неуклонном развитии техника релейной защиты опирается на всесторонний анализ и изучение режимов работы электрических систем, на совершенствование аппаратуры и схем релейной защиты и на сочетание средств защиты с различными видами системной и сетевой автоматики.

Исследования разнообразных видов коротких замыканий и нарушений нормальной работы энергосистем, имеющих место на практике, а также разработка и совершенствование методов расчета токов короткого замыкания являлись тем теоретическим фундаментом, на котором постоянно базировался анализ работы релейной защиты и на основе которого создавались новые конструкции, схемы и типы релейной защиты.

Применение в энергосистемах однофазного отключения и автоматического повторного включения (ОАПВ) потребовало дальнейшей разработки методов расчета сложных видов повреждений — коротких замыканий при неполнофазных режимах, представляющих собой различные комбинации разрыва фазы с короткими замыканиями.

Вместе с тем применение ОАПВ с переходом в ряде случаев на длительную работу двумя фазами (при устойчивом повреждении или пофазном ремонте) потребовало коренного пересмотра принципов и схем релейной защиты высоковольтных сетей с точки зрения обеспечения правильной работы релейной защиты как на линиях с отключенной фазой, так и на смежных участках сети. Этот вопрос является актуальным не только для вновь проектируемых систем, но и для эксплуатируемых высоковольтных сетей, в которых неполнофазные режимы не предусматривались, и поэтому возможность длительного появления в эксплуатационных условиях симметричных составляющих величин обратной или нулевой последовательностей не учитывалась.

Рассчитанные на появление симметричных составляющих величин обратной и нулевой последовательностей только при коротких замыканиях, многие устройства релейной защиты не

приспособлены к неполнофазным режимам работы сети. Сюда относятся преимущественно устройства и типы защиты, основанные на применении фильтров симметричных составляющих и реагирующие соответственно на токи, напряжения или мощности обратной и нулевой последовательностей (например, устройства, блокирующие защиту при качаниях при помощи реле обратной последовательности, направленные защиты фильтрового типа и др.). Эти устройства могут неселективно действовать в сети, смежной с линией, работающей двумя фазами, или отказывать в действии при коротких замыканиях.

Поэтому проверка работы защиты при неполнофазных режимах и создание новых типов защиты, приспособленных к длительным или кратковременным неполнофазным режимам, представляют одну из современных задач теоретического анализа, выдвигаемых практикой эксплуатации и проектирования релейной защиты высоковольтных сетей.

Эта задача тесно связана с общей проблемой обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей и передачи больших мощностей на большие расстояния.

Проектирование и сооружение протяженных и сильно нагруженных линий электропередачи поставили перед техникой релейной защиты целый ряд принципиально новых вопросов, в том числе создание быстродействующих АПВ, ОАПВ и АПВ без контроля синхронизма.

Потребовалось повышение скорости действия защиты линий электропередачи и применение различных видов автоматики с целью сохранения устойчивости параллельной работы электрических систем. Потребовалась разработка принципов построения защиты, обладающей необходимой чувствительностью и не реагирующей на токи нагрузки и расхождение э. д. с. по концам электропередачи. В технику релейной защиты стали внедряться новые способы анализа работы защиты, основанные на применении метода геометрических мест.

С ростом протяженности линий электропередачи начинает сказываться р а с-

пределенный характер параметров линий, обуславливающий волновые процессы, происходящие в них.

При этом уже не представляется возможным довольствоваться упрощенными методами расчетов, учитывающими только сосредоточенные индуктивности. Передача больших мощностей на дальние расстояния связана также с применением устройств поперечной и продольной компенсации, вносящих дополнительные осложнения в исследования установившихся и в особенности переходных процессов в электропередаче.

Влияние емкостной проводимости линий приводит к появлению высших гармонических составляющих в токе короткого замыкания, а наличие продольной емкостной компенсации приводит к возникновению субгармонических составляющих (имеющих частоту ниже промышленной).

При коротких замыканиях, а также в момент отключения короткого замыкания возможны значительные повышения напряжений на зажимах батареи продольной емкостной компенсации, могущие вывести из строя конденсаторы. В связи с этим в целях сохранности конденсаторов при появлении недопустимых перенапряжений требуется автоматическое закорачивание конденсаторных батарей при помощи искровых разрядников.

В процессе действия искровых разрядников параметры защищаемого участка электропередачи изменяются и возникают дополнительные переходные процессы в линии. При этом разрядники в фазах могут работать неодновременно.

При проектировании и разработке быстродействующих типов релейной защиты продольно-компенсированных линий электропередачи необходимо учитывать эти сложные явления. Однако аналитический учет всех факторов крайне затруднителен. Кроме того, встает задача исследования не только первичных электрических величин (токов, напряжений) на стороне высокого напряжения, но и переходных процессов во вторичных цепях измерительных трансформаторов.

Переход расчетным путем от первичных электрических величин к вторич-

ным сопряжен с трудностями, которые в настоящее время практически еще не преодолены. Существующие методы теоретических исследований переходных процессов во вторичных цепях трансформаторов тока не являются достаточно общими, они практически разработаны пока только для одиночно работающих трансформаторов тока (а не для группы трансформаторов тока, включенных в трехфазной схеме), причем первичный ток предполагается заданным в виде суммы двух слагаемых — периодической и аperiodической.

Соединение трансформаторов тока в трехфазную группу, включение во вторичные цепи трансформаторов тока и трансформаторов напряжения фильтров симметричных составляющих и фильтров гармоник, наличие нелинейных элементов в самих реле и т. п. вносят столь значительные усложнения, что методика проектирования и анализа работы быстродействующей релейной защиты на базе получаемых из обычного расчета первичных электрических величин до настоящего времени остается еще не разработанной. В этом отношении следует ориентироваться на методы физического моделирования и на экспериментальную проверку релейной защиты в лабораторных и эксплуатационных условиях.

В силу указанных причин результаты аналитических исследований переходных процессов на первичной стороне представляют для релейной защиты в основном пока только познавательный интерес. Они дают возможность судить о степени асимметрии кривых токов и напряжений, о гармоническом составе этих кривых, о пиковых значениях соответствующих величин и т. д.

Разработка методов проектирования и анализа работы быстродействующих реле, надо полагать, явится в будущем предметом особого рассмотрения.

В числе основных современных проблем техники релейной защиты высоковольтных сетей, выдвинутых практикой проектирования и эксплуатации энергосистем, следует особо отметить проблему максимально возможного упрощения защиты, сокращения количества сложных типов реле

и количества контактов в схемах и более широкого внедрения простейших типов быстродействующих реле и средств защиты: отсечек по току или напряжению, малорелейных схем защиты, сочетания защиты с АПВ, рациональных способов резервирования и т. д.

Упрощение защиты в целях повышения надежности ее действия и облегчения эксплуатационного обслуживания, естественно, не должно идти в ущерб остальным качествам защиты: чувствительности, селективности и скорости действия. Задача рационального упрощения защиты заключается именно в том, что высокие качества защиты должны сочетаться с простотой ее конструктивного и схемного выполнения.

На очереди стоит задача более широкого использования для целей релейной защиты переменного оперативного тока. Проведение этого мероприятия на практике особенно важно для электроэнергетических установок, работающих без постоянно обслуживающего эксплуатационного персонала.

Важной проблемой современной релейной защиты является дальнейшее внедрение высокочастотной техники и электроники. Осуществление быстродействующей защиты высоковольтных линий электропередачи во многих случаях возможно при обязательном условии широкого использования токов высокой частоты для передачи блокирующих или отключающих импульсов.

До последнего времени в технике релейной защиты токи высокой частоты использовались преимущественно в диапазоне длинных волн. Однако в связи с необходимостью увеличения числа каналов связи и повышения надежности защиты высоковольтных электропередач в настоящее время возникла также необходимость использования радиоканалов с весьма высокими несущими частотами.

Директивами XX съезда КПСС предусмотрено создать широкую сеть радиорелейных линий связи, которые, надо полагать, могут использоваться также и для целей релейной защиты высоковольтных линий электропередачи.

Дальнейшее повышение надежности работы энергосистем достигается комплексным сочетанием средств релейной

защиты, электроавтоматики и телемеханики. Автоматическое отключение и включение выключателей на расстоянии (автоматическое телеуправление) обеспечивает устойчивую работу электрических систем, например, путем автоматического отключения генераторов или переключения конденсаторов продольной емкостной компенсации в зависимости от режима работы электропередачи. Осуществление телеуправления способствует более широкому внедрению автоматики системного назначения: автоматов повторного включения линий, шин и трансформаторов, автоматов включения резервного питания и оборудования, автоматов разгрузки по частоте и т. д. Поэтому комплексное использование средств релейной защиты, электроавтоматики и телемеханики является актуальной задачей современной электроэнергетики.

Широкие перспективы дальнейшего развития техники релейной защиты, по-

вышения чувствительности и конструктивного упрощения устройств релейной защиты открыты в связи с практическим применением полупроводниковых приборов. Большие успехи науки, достигнутые в разработке и промышленном освоении полупроводниковых триодов, дают основание ожидать широкого внедрения их в технику релейной защиты в качестве усилительных, фазочувствительных и других элементов и замены ими электронных ламп в приеме-передатчиках, что, несомненно, явится важным фактором дальнейшего прогресса техники релейной защиты.

Вопросами, затронутыми выше, естественно, не исчерпывается все многообразие задач, выдвигаемых перед современной техникой релейной защиты и практикой эксплуатации и проектирования высоковольтных электрических сетей. По мере совершенствования техники и накопления практического опыта эти задачи будут расширяться.