

**Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ**

С.М. Силюк, Л. Н. Свита

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ
ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ**

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ

Кафедра «Электрические станции»

С.М. Силюк
Л.Н. Свита

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Допущено Министерством образования
Республики Беларусь в качестве
учебного пособия для студентов
специальностей
“Электроэнергетика” и
“Автоматизация и управление
энергетическими процессами”
высших учебных заведений

Минск, 2000

УДК 621.311(075.8)

ББК 31.27я78

П-27

Рецензенты: кафедра “Электроснабжение” Белорусского
аграрного технического университета;
Щур Е. В. – директор ГП “Белэнергосетьпроект”, к.т.н.

Силюк С.М., Свита Л.Н.

П 27 Электромагнитные переходные процессы. Учебное пособие
для вузов. - Мн.: “Технопринт”, 2000

ISBN 985-6582-62-8

В учебном пособии рассматриваются электромагнитные переходные процессы в электроэнергетической системе. Излагаются физические явления, обусловленные переходными процессами, методы их анализа и расчета. Материал иллюстрируется практическими примерами.

Для студентов вузов обучающихся по специальности “Электроэнергетика” и “Автоматизация и управление энергетическими процессами”. Может быть использовано также студентами других энергетических специальностей и инженерно-техническими работниками, занятыми проектированием и эксплуатацией электроэнергетических систем.

УДК 621.311(075.8)

ББК 3127я78

ISBN 985-6582-62-8

© Силюк С.М., Свита Л. Н., 2000

Предисловие

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

Сооружение и эксплуатация ЭС связаны со значительным расходом материальных ресурсов. В связи с этим большое значение имеет повышение надежности и экономичности электрической системы 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 энергии у потребителей.

Применение вычислительной техники при исследованиях и расчетах переходных процессов позволило повысить точность схемных решений и электрических характеристик электроэнергетических систем (ЭС), благодаря чему могут достигаться более высокие показатели надежности и экономичности. В связи с увеличением мощностей отдельных нагрузок в последние годы в стране и за рубежом много внимания уделяется анализу и разработке методов исследования переходных процессов в электрических системах, направленных на повышение их устойчивости.

В научных и производственно-технических журналах по этим вопросам появился ряд работ. Однако обобщающих книг, изданных для студентов в качестве учебников или учебных пособий по переходным процессам в электрических системах, до сих пор нет.

Основными направлениями перестройки высшего образования в республике Беларусь предусматривается целевое индивидуализированное, творческое обучение студентов, повышается их ответственность за качественное овладение знаниями.

Исходя из назревшей потребности, авторы поставили перед собой цель — создать учебное пособие, которое удовлетворяло бы учебной программе дисциплины «Электромагнитные переходные процессы», читаемой в вузах для специальностей «Электроэнергетика», «Автоматизация и управление энергетическими процессами».

При его написании авторы опирались преимущественно на свой многолетний опыт преподавания данного курса в Белорусской государственной политехнической академии. Преследовались и такие цели, как иллюстрация рассматриваемых тем примерами практических расчетов, способствующих более глубокому пониманию излагаемого материала, а также привитию студентам навыков моделирования и использования вычислительной техники при исследованиях и расчетах переходных процессов в СЭС.

В основу учебного пособия положены многочисленные труды ученых Московского энергетического института Н.Н. Щедрина, С.А. Ульянова, Б.Н. Неклепаева по переходным процессам, а также последние работы других советских и зарубежных авторов.

Для закрепления теоретического материала, кроме примеров практических расчетов, в конце каждой главы пособия помещены контрольные вопросы, которые способствуют самостоятельному усвоению изучаемого материала.

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 возмущений как в рабочих режимах, так и в аварийных ситуациях.

С увеличением единичной мощности машин и осуществлением их параллельной работы резко возрос размер повреждений машин при коротких замыканиях (КЗ). 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.

В начале столетия 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 сложноразветвленных электрических сетях, разработки методов ограничения токов 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. Хашинским, Н.Н. Щедриным и А.А. Смуровым были исследованы переходные процессы в син-

хронных электрических машинах. 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 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.

По мере развития энергетических систем и их объединения усложнялись 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, ВНИИЭ, СибНИИЭ и других организациях. Аналоговые машины применялись для исследования автоматического регулирования возбуждения (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, особенностей режимов линий электропередач (ЛЭП) и др.

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.

Для расчета токов КЗ с помощью ЭВМ широко применяются программы, разработанные в ИЭД АН УССР, институте «Энергосетьпроект», ЛПИ, БГПА. В настоящее время при расчетах токов КЗ и решения 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.

1.2. Режимы электрической системы

Нормальный режим работы электроэнергетической системы (ЭЭС) характеризуется балансом между вырабатываемой и потребляемой энергией, а также неизменностью или незначительным изменением в пределах допустимых ГОСТом параметров системы.

Изменения условий работы ЭЭС сопровождаются переходными процессами, которые приводят к изменению режимов ЭЭС и параметров ее элементов. Совокупность процессов, характеризующих условия работы ЭЭС 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 сопротивления и проводимости, коэффициенты трансформации, постоянные времени, коэффициенты усиления и другие параметры, определяемые физическими свойствами и схемой соединения элементов, а также расчетными данными.

В ЭЭС 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 ЭЭС 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 эксплуатационным изменениям в ЭЭС (включение, отключение, переключение, изменение нагрузки и др.). Эти режимы характеризуются относительно быстрым и резким изменением параметров некоторых элементов ЭЭС при незначительных изменениях в ее узловых точках;
- 3) аварийные установившиеся и переходные, возникающие в ЭЭС 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 ЭЭС, обусловленного необходимостью ликвидации аварии. В этих режимах параметры оставшихся в работе элементов ЭЭС могут быть близкими к параметрам нормального режима или значительно отличаться от них. Соответственно будет иметь место благополучный или неблагополучный исход аварии в ЭЭС.

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

Устойчивость режима — это способность ЭЭС при внезапных случайных возмущениях ее режима сохранять допустимые значения параметров в узловых точках.

Различают статическую и динамическую устойчивость.

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

Динамическая устойчивость — это способность ЭЭС 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.

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

При нарушении статической или динамической устойчивости ЭЭС 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 гашения их магнитного поля;

внезапные набросы и сбросы нагрузки;

синхронный пуск двигателей и синхронных компенсаторов;

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 ЭЭС, а также при обосновании эксплуатационных режимов.

В данной работе рассматриваются только методы решения задач, относящихся к определению области допустимых режимов в аварийных условиях, а именно исследования электромагнитных переходных процессов (расчет токов КЗ, анализ неполнофазных 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) перекрытие гирлянд подвесных изоляторов, сближение проводов при определенных климатических условиях, приближение к проводам ветвей деревьев, а также набросы на провода различных предметов;

в кабельных линиях (КЛ) — пробой изоляции, самоустраиваемые 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 или 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 пробоям изоляции КЛ, а 18% — к пробоям других элементов системы.

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

1.4. Значимость исследований и расчетов переходных процессов

Переходные процессы в ЭЭС изучаются после получения необходимых знаний из общеобразовательных и специальных дисциплин (ТОЭ, электрические машины, аппараты и сети), в которых рассматриваются режимы отдельных элементов ЭЭС. Переходные процессы в элементах ЭЭС 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 ЭЭС, 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 ЭЭС. Эти задачи

связаны с исследованием электромагнитных переходных процессов, выбором принципов действия и настройки автоматических устройств противоаварийного управления, разработки мероприятий для обеспечения непрерывности работы всех отраслей народного хозяйства в различных режимах ЭЭС.

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

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

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

выполнение требований, предъявляемых к качественным показателям переходного процесса;

оценка устойчивости режима, наступившего после окончания переходных процессов;

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

испытание аппаратуры и ЭЭС в переходных режимах.

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

1) надежности всей ЭЭС;

2) поведение системы и ее отдельных элементов при изменениях условий их работы.

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

При аналитических исследованиях переходных процессов используются комплексные величины для записи мгновенных значений переменных, метод симметричных составляющих, схемы замещения для различных режимов ЭЭС и др. Для решения слож-

ных 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 ЭЭС?
4. Что такое параметры режима и параметры ЭЭС?
5. Что понимается под статической и динамической устойчивостью?
6. Какие причины возникновения переходных процессов в ЭЭС?
7. Для чего необходимо рассчитывать переходные процессы?

КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

2.1. Виды, причины и последствия коротких замыканий

В процессе эксплуатации ЭЭС 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 землей.

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

Вид КЗ определяется способом связи нейтралей генераторов и трансформаторов с землей. Нейтралями электроустановок называют общие точки обмоток генераторов или трансформаторов, соединенных в звезду.

В зависимости от режима нейтрали электрические сети разделяют на четыре группы: 1) сети с незаземленными нейтралями; 2) сети с резонансно-заземленными нейтралями; 3) сети с эффективно-заземленными нейтралями; 4) сети с глухозаземленными нейтралями.

К первой и второй группам относятся сети напряжением 3-35 кВ, нейтрали трансформаторов или генераторов в которых изолированы от земли или заземлены через дугогасящие реакторы.

К сетям с эффективно-заземленными нейтралями в соответствии с рекомендациями Международного электротехнического комитета (МЭК) относятся сети высокого и сверхвысокого напряжения, нейтрали которых соединены с землей непосредственно или через небольшое активное сопротивление. К этой группе относятся сети напряжением 110 кВ и выше, работающие, как правило, с глухозаземленной нейтралью.

К четвертой группе относятся сети напряжением 220 и 380 В.

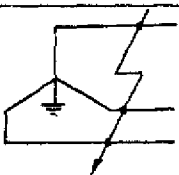
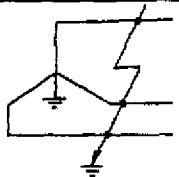
Замыкание в глухо- или эффективно-заземленных сетях через дугу либо непосредственные соединения различных точек электроустановки называют короткими замыканиями. Замыкания в незаземленных или резонансно-заземленных сетях относят к простым замыканиям, которые обычно называют замыканиями. В ряде случаев переходные сопротивления могут быть столь малы, что практически ими можно пренебречь. Такие замыкания называют металлическими.

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

В количественном отношении КЗ в сетях, по усредненным данным согласно [6], распределяются следующим образом: $k^{(3)} \approx 5\%$; $k^{(2)} \approx 10\%$; $k^{(1)} \approx 65\%$; $k^{(1,1)}$ и $k^{(1+1)} \approx 20\%$. Однако статические исследования, проведенные в последние годы МЭИ показали, что относительная частота различных видов КЗ существенно зависит от напряжения сети (табл. 2.2).

Т а б л и ц а 2.1

Виды коротких и простых замыканий в электрических сетях

Схема замыкания	Режим нейтрали сети			
	глухо- или эффективно-заземленная нейтраль		незаземленная или резонансно-заземленная нейтраль	
	Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
1	2	3	4	5
	Трехфазное КЗ	$k^{(3)}$	Трехфазное КЗ	$k^{(3)}$
	Трехфазное КЗ на землю	$k^{(1,1,1)}$	Трехфазное КЗ на землю (имеет контакт с землей)	$k^{(3,3)}$

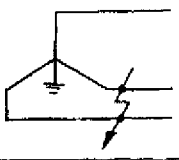
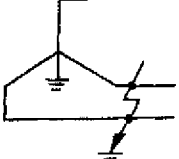
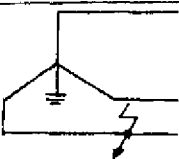
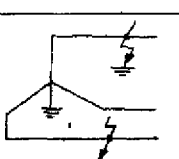
1	2	3	4	5
	Двухфазное КЗ	$k^{(2)}$	Двухфазное КЗ	$k^{(2)}$
	Двухфазное КЗ на землю	$k^{(1,1)}$	Двухфазное КЗ на землю (имеет контакт с землей)	$k^{(2,3)}$
	Однофазное КЗ	$k^{(1)}$	Однофазное замыкание на землю	$z^{(1)}$
	Двойное КЗ на землю	$k^{(1+1)}$	Двойное замыкание на землю	$z^{(1+1)}$

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	83	88	91
$k^{(2)}$	17	20	18	5	3	4
$k^{(1,1)}$	11	15	7	8	7	4
$k^{(3)}$	11	5	8	4	2	1

Из статистических исследований мощной ЭЭС 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 электростанции — 19%, на силовую часть электростанций — 26% и на другие элементы системы — 8%.

Короткие замыкания возникают в результате нарушений изоляции электроустановок, являющихся следствием разных причин: старение 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, токоведущих частей и их 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 1с 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 электродвижущих сил (ЭДС) в соседних линиях связи и сигнализации, опасных для обслуживающего персонала и используемой аппаратуры;

нарушение устойчивости отдельных элементов и режима ЭЭС 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

незначительное повышение нагрузки, а сильное снижение напряжения происходит только вблизи места трехфазного КЗ.

Чтобы обеспечить безаварийное электроснабжение всех потребителей, необходимо проектировать и сооружать ЭЭС 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 ЭЭС и обеспечения устойчивости нагрузки вводят быстродействующие релейные защиты отдельных элементов, применяют специальные устройства автоматического включения резерва, предусматривают разделение во времени процессов самозапуска различных групп двигателей, устанавливают устройства регулирования возбуждения синхронных машин и др.

2.2. Назначение расчетов коротких замыканий

Расчет электромагнитных переходных процессов в ЭЭС 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 ЭЭС. 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 конечных целей:

- сопоставления, оценки и выбора схем электрических соединений ЭЭС;

- выбора электрических аппаратов электроустановок по условиям термической и электродинамической стойкости;

- проектирования и настройки устройств релейной защиты и автоматики ЭЭС;

- определения влияния токов КЗ на линии связи;

- оценки устойчивости работы ЭЭС;

- разработки мероприятий по координации и оптимизации значений токов КЗ;

проектирования заземляющих устройств;
выбора разрядников;
анализа аварий в электроустановках;
проведения различных испытаний в ЭЭС.

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 устройств релейной защиты и автоматики точность расчета аварийных режимов должна быть значительно выше. В этом случае необходимо определить наибольшее и наименьшее значения токов и напряжений, возможный фазовый сдвиг между ними в отдельных фазах либо между симметричными составляющими и т.п.

2.3. Допущения при расчетах токов короткого замыкания

Расчет токов КЗ в современных ЭЭС 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 1кВ основные допущения следующие:

пренебрегают насыщением магнитных систем всех элементов цепи КЗ (генераторов, трансформаторов и электродвигателей);

все нагрузки представляют постоянными индуктивными сопротивлениями, величина которых зависит от исследуемой стадии переходного процесса;

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 аperiodических составляющих токов КЗ);

не учитывают сдвиг по фазе ЭДС источников энергии, входящих в расчетную схему;

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

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

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

пренебрегают токами намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов;

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

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

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 $U_c = const$.

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 $r_{рез} \geq x_{рез}/3$ индуктивной составляющей можно пренебречь.

2.4. Расчетные схемы и условия

Расчетная схема соответствует аварийным режимам ЭЭС и на ней в однолинейном изображении показывают источники ЭЭС, точки КЗ и все силовые элементы, по которым возможно протекание тока КЗ или его составляющих, т.е. генераторы, синхронные компенсаторы, 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) 100 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 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 ЭЭС максимальные режимы КЗ следует определять с учетом развития сети.

2.5. Составление схемы замещения

Схему замещения ЭЭС составляют на основе ее расчетной схемы для начального момента переходного процесса (источники замещаются сверхпереходными ЭДС 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 ЭДС и неизменные сопротивления, и к приведению параметров элементов и ЭДС различных ступеней ЭЭС к базисным условиям (к одной ступени напряжения, выбранной за основную).

Схема замещения ЭЭС представляет собой совокупность схем замещения ее отдельных элементов, соединенных между собой в той же последовательности, что и на расчетной схеме. 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, ЭДС источников питания, а также токи ветвей и напряжения в любых точках схемы замещения могут быть выражены в именованных или в относительных единицах (о.е.). Под относительным значением какой-либо величины следует понимать ее отношение к другой одноименной величине, выбранной за единицу измерения. Обычно относительные значения параметров элементов заданы при номинальных условиях. Пересчет ЭДС источников питания и сопротивлений элементов из о.е. в именованные выполняют по формулам

$$E = E_{ном} U_{ном}; \quad z = z_{ном} U_{ном}^2 / S_{ном}. \quad (2.1)$$

Пользуются точным и приближенным приведениями ЭДС и параметров элементов, заданных на различных ступенях напряжения ЭЭС. При точном приведении параметров используют действительные коэффициенты трансформации трансформаторов между ступенями напряжения расчетной схемы ЭЭС.

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

$$\left. \begin{aligned} \dot{E} &= k_1 k_2 \dots k_n E; \\ \dot{U} &= k_1 k_2 \dots k_n U; \\ \dot{I} &= I / (k_1 k_2 \dots k_n); \\ \dot{z} &= (k_1 k_2 \dots k_n)^2 z. \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

Здесь $k_1 k_2 \dots k_n$ — коэффициенты трансформации трансформаторов (автотрансформаторов), представляющие собой отношение линейных 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 о.с. 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). 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

$$I_6 = S_6 / (\sqrt{3} U_6). \quad (2.3)$$

Для других ступеней напряжения базисные условия пересчитывают по формулам

$$\begin{aligned} \dot{U}_6 &= U_6 / (k_1 k_2 \dots k_n); \\ \dot{I}_6 &= (k_1 k_2 \dots k_n) I_6 \text{ или } \dot{I}_6 = S_6 / (\sqrt{3} \dot{U}_6). \end{aligned} \quad (2.4)$$

Формулы (2.4) используют для вычисления относительных значений параметров схемы замещения не на основной ступени напряжения:

$$z_{*б} = z\sqrt{3} \dot{I}_б / \dot{U}_б = zS_б / \dot{U}_б^2, \quad (2.5)$$

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

$$z_{*б} = z_{*ном} S_б U_{ном}^2 / (S_{ном} \dot{U}_б^2), \quad (2.6)$$

если сопротивление элемента задано в о.е. при номинальных напряжениях $U_{ном}$ и мощности $S_{ном}$ (генераторы, электродвигатели, трансформаторы);

$$z_{*б} = z_{*ном} \dot{I}_б U_{ном} / (I_{ном} \dot{U}_б), \quad (2.7)$$

если сопротивление элемента задано в о.е. при номинальных напряжениях $U_{ном}$ и токе $I_{ном}$ (реакторы);

$$E_{*б} = E / \dot{U}_б, \quad (2.8)$$

если ЭДС источника питания задана в именованных единицах;

$$E_{*б} = E_{*ном} U_{ном} / \dot{U}_б, \quad (2.9)$$

если ЭДС источника питания задана в о.е. при номинальном напряжении $U_{ном}$.

Из выражений (2.5)-(2.9) 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 ЭЭС 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: 765; 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_{cp} тех ступеней, которые он связывает, а результирующий коэффициент трансформации каскада (всех трансформаторов расчетной схемы) определяется отношением средних номинальных напряжений крайних ступеней. Расчетные выражения при этом становятся проще.

Выражения (2.2), используемые для определения в именованных единицах параметров элементов, приведенных к основной ступени трансформации, где находится точка КЗ упрощаются и принимают вид

$$\dot{E} = EU_{\theta}/U_{cp}; \quad \dot{U} = U U_{\theta}/U_{cp}, \quad (2.10)$$

где U_{cp} — среднее номинальное напряжение ступени, с которой выполняется приведение;

U_{θ} — то же самое основной ступени.

Если сопротивление элемента задано в о.е., то

$$\dot{z} = z_{ном} U_{\theta}^2 / S_{ном}. \quad (2.11)$$

Выполняя приближенное приведение параметров элементов схемы к базисным условиям и выражая их в о.е., за базисное напряжение для любой ступени трансформации n рекомендуется принимать среднее номинальное напряжение этой ступени ($U_{\theta} = U_{cp}$). Тогда базисный ток

$$I_{\theta} = S_{\theta} / (\sqrt{3} U_{cp}). \quad (2.12)$$

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

$$z_{* \theta} = z \sqrt{3} I_{\theta} / U_{cp} = z S_{\theta} / U_{cp}^2, \quad (2.13)$$

если сопротивление элемента задано в омах;

$$z_{* \theta} = z_{ном} S_{\theta} / S_{ном}, \quad (2.14)$$

если сопротивление элемента задано в о.е. (генераторы, электродвигатели и трансформаторы);

$$x_{* р \theta} = x_{р, ном} I_{\theta} / I_{р, ном}, \quad (2.15)$$

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

$$x_{* р \theta} = x_{р, ном} I_{\theta} U_{р, ном} / (I_{р, ном} U_{cp}), \quad (2.16)$$

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

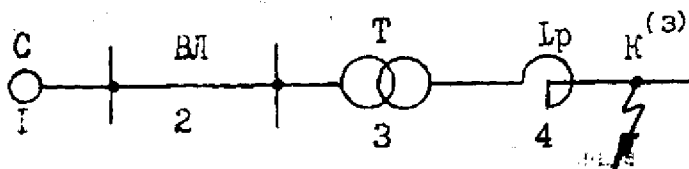
$$E_{*0} = E/U_{cp}, \quad (2.17)$$

если ЭДС источника питания задана в именованных единицах

$$E_{*0} = E_{*ном}, \quad (2.18)$$

если ЭДС источника питания задана в о.е.

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



$$\begin{array}{lll}
 U_c = \text{const}; \quad l = 20 \text{ км}; & S_{гр.ном} = 63 \text{ МВ} \cdot \text{А}; & U_{р.ном} = 10 \text{ кВ}; \\
 U_c = 166 \text{ кВ}; \quad x_0 = 0,4 \text{ Ом/км}; & U_k = 12\%; & I_{р.ном} = 4000 \text{ А}; \\
 x_c = 0; & U_B/U_n = 160/6,6 \text{ кВ}; & x_p = 0,105 \text{ Ом}
 \end{array}$$

Рис. 2.1,а. К примеру 2.1.

Решение. Схема замещения электрической сети показана на рис. 2.1,б.

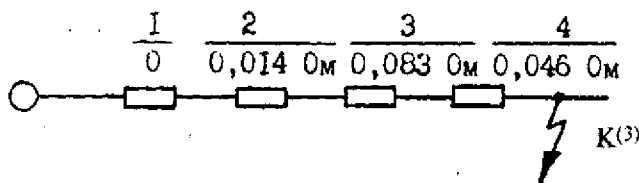


Рис. 2.1,б. К примеру 2.1.

Расчет в именованных единицах с точным приведением параметров короткозамкнутой цепи к базисным условиям. За ба-

зиснос принимаем напряжение ступени, где произошло КЗ, т.е. $U_{\sigma} = U_{II}$. Тогда

$$\begin{aligned} U_c &= U_c U_{II} / U_{\sigma} = 166 \cdot 6,6 / 160 = 6,85 \text{ кВ}; \quad x_1 = 0; \\ x_2 &= x_{0I} U_{II}^2 / U_{\sigma}^2 = 0,4 \cdot 20 \cdot 6,6^2 / 160^2 = 0,014 \text{ Ом}; \\ x_3 &= (U_{II} / 100) U_{\sigma}^2 U_{II}^2 / (S_{гр.ном} U_{B}^2) = 12 \cdot 160^2 \cdot 6,6^2 / (100 \cdot 63 \cdot 160^2) = 0,083 \\ &\text{Ом}; \\ x_4 &= x_p U_{cp}^2 / U_{p.ном}^2 = 0,105 \cdot 6,6^2 / 10^2 = 0,046 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} U_c &= U_c U_{cp II} / U_{cp \sigma} = 166 \cdot 6,3 / 158 = 6,62 \text{ кВ}; \quad x_1 = 0; \\ x_2 &= x_{0I} U_{cp II}^2 / U_{cp \sigma}^2 = 0,4 \cdot 20 \cdot 6,3^2 / 158^2 = 0,013 \text{ Ом}; \\ x_3 &= (U_{II} / 100) U_{cp \sigma}^2 U_{cp II}^2 / (S_{гр.ном} U_{cp II}^2) = 12 \cdot 158^2 \cdot 6,3^2 / (100 \cdot 63 \cdot 158^2) = \\ &= 0,076 \text{ Ом}; \\ x_4 &= x_p U_{cp II}^2 / U_{p.ном}^2 = 0,105 \cdot 6,3^2 / 10^2 = 0,042 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

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 $S_{\sigma} = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ и приводим к ней параметры элементов короткозамкнутой цепи:

на ступени напряжения, где произошло КЗ, $U_{\sigma} = 6,6 \text{ кВ}$;

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

на ступени высшего напряжения

$$U_{B\sigma} = U_{н\sigma} U_B / U_{II} = 6,6 \cdot 160 / 6,6 = 160 \text{ кВ};$$

$$I_{B\sigma} = I_{н\sigma} U_{II} / U_B = 8,75 \cdot 6,6 / 160 = 0,361 \text{ кА}.$$

Относительное напряжение системы

$$U_{*c} = U_c / U_{об} = 166 / 160 = 1,04.$$

Сопротивления, приведенные к базисным условиям,

$$x_{*1} = 0; \quad x_{*2} = x_0 S_\theta / U_{об}^2 = 0,4 \cdot 20 \cdot 100 / 160^2 = 0,031;$$

$$x_{*3} = (U_k / 100) S_\theta / S_{гр,ном} = 12 \cdot 100 / 100 \cdot 63 = 0,19;$$

$$x_{*4} = x_{гр} S_\theta / U_{р,ном}^2 = 0,105 \cdot 100 / 10^2 = 0,105.$$

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

$$U_{*c} = U_c / U_{ср.в} = 166 / 158 = 1,05; \quad x_{*1} = 0;$$

$$x_{*2} = x_0 S_\theta / U_{ср.в}^2 = 0,4 \cdot 20 \cdot 100 / 158^2 = 0,032;$$

$$x_{*3} = (U_k / 100) S_\theta / S_{гр,ном} = 12 \cdot 100 / (100 \cdot 63) = 0,19;$$

$$x_{*4} = x_{гр} S_\theta / U_{р,ном}^2 = 0,105 \cdot 100 / 10^2 = 0,105.$$

Результирующее сопротивление цепи КЗ

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

Расчеты в о.е. и именованных единицах практически совпадают (погрешность не более 0,1%).

2.6. Определение параметров короткозамкнутой цепи в относительных единицах, приведенных к базисным условиям

Как уже указывалось, параметры расчетной схемы могут быть выражены в именованных или о.е. Представление любых физических величин не в обычных для них именованных единицах, а в относительных позволяет существенно упростить некоторые теоретические выводы и придать им более общий вид. В практических расчетах такое представление величин придает результатам большую наглядность и позволяет быстрее ориентироваться в порядке определяемых значений. Благодаря этому система о.е.

широко используется при расчете токов КЗ в сетях напряжением выше 1 кВ.

В табл. 2.3 даны исходные параметры, схемы замещения и формулы для определения ЭДС и сопротивлений в о.е., приведенных к базисным условиям, по приближенному приведению отдельных элементов ЭЭС, в которых:

$S_b, S_{ном}$ —базисная и номинальная мощность, МВ·А;

I_b —базисный ток, кА;

$I_{ном}, U_{ном}$ —номинальный ток и напряжение, кА, кВ;

$x_{отн}, E_{отн}$ —относительные сопротивления и ЭДС элементов схемы при их номинальных данных;

$S_{кз}$ —мощность КЗ энергосистемы, МВ·А;

$S=\infty$ —система бесконечной мощности (система, в которой напряжение остается неизменным при любых изменениях режима);

$U_{к\%}$ —напряжение КЗ трансформаторов (автотрансформаторов) в %;

U_{cp} —среднее номинальное напряжение в месте установки данного элемента, кВ;

$x_{л}$ —индуктивное сопротивление 1 км длины:

для воздушных ЛЭП принимается равным 0,4 Ом/км,

для КЛ 6÷10 кВ —0,08 Ом/км и 0,12 Ом/км,

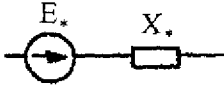

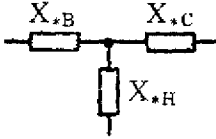
КЛ 35 кВ и выше l —длина ЛЭП, км;

k —коэффициент связи сдвоенного реактора.

Примечание. При расчете сопротивления реактора базисный ток должен быть приведен на ступень, где включен реактор.

Таблица 2.3.

Расчетные выражения для определения приведенных параметров в о.е.

Элемент электроустановки	Исходный параметр	Схема замещения	Формулы для расчета параметров в о.е.
1	2	3	4
Генератор	$E_{*ном}$ $x_{*ном}$ $S_{*ном}$		$E_* = E_{*н}$ $x_* = x_{*н} \frac{S_{\delta}}{S_{ном}}$
Двухобмоточный трансформатор	$U_K \%$ $S_{ном}$		$x_* = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{ном}}$
Трехобмоточный трансформатор (автотрансформатор)	$U_{KB-C} \%$ $U_{KB-H} \%$ $U_{KC-H} \%$ $S_{ном}$		$x_{*i} = \frac{U_{Ki} \%}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{ном}}$, где $i = B, C, H$. $U_{KB} = 0,5(U_{KB-C} + U_{KB-H} - U_{KC-H})$; $U_{KC} = 0,5(U_{KB-C} + U_{KC-H} - U_{KB-H})$; $U_{KH} = 0,5(U_{KB-H} + U_{KC-H} - U_{KB-C})$.

1	2	3	4
<p>Двухобмоточный трансформатор с расщеплением на 2 ветви</p>	$S_{ном}$ $U_{KB-H} \%$ $U_{KH1-H2} \%$ $S_1 = S_2 = 0,5S_{ном}$		$x_{*B} = [(U_{KB-H} \% - 0,5U_{KH1-H2} \%) / 100] \cdot \frac{S_6}{S_{ном}}$ $x_{*H1} = x_{*H2} = \frac{U_{KH1-H2} \%}{100} \cdot \frac{S_6}{2S_{ном}}$
<p>Энергосистема</p>	$S = \infty$ $S_{КЗ}$ $x_{*ном}, S_{ном}$		$E_* = 1; X_* = 0;$ $E_* = 1; X_* = S_6 / S_{КЗ};$ $E_* = 1; X_* = x_{*H} \cdot (S_6 / S_{ном}).$
<p>Линия электропередачи</p>	$x_{уд}$ l $U_{ном}$		$x_* = x_{уд} \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{сп}^2}$
<p>Реактор</p>	x_p $x_p \%, I_{ном}$ $U_{ном}$		$x_* = x_p \cdot \frac{S_6}{U_{сп}^2};$ $x_* = \frac{x_p \%}{100} \cdot \frac{I_6}{I_{ном}} \cdot \frac{U_{ном}}{U_{сп}}$
<p>Сдвоенный реактор</p>	x_p или $x_p \%$		$x_{*1} = -Kx_*;$ $x_{*2} = x_{*3} = (1 + K)x_*;$ x_* (смотри для реактора).
<p>Обобщенная нагрузка</p>	$E_{*ном}$ $X_{*ном}$ $S_{ном}$		$E_* = E_{*H};$ $x_* = x_{*H} \frac{S_6}{S_{ном}}$

2.7. Преобразование схем замещения

После того как схема замещения составлена и определены сопротивления всех элементов, она преобразуется к наиболее простому виду (рис. 2.2).

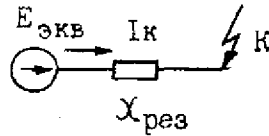


Рис. 2.2. Результирующая схема замещения.

Преобразование (свертывание) схемы выполняется в направлении от источника питания к месту КЗ. Поэтому преобразование схемы выгодно вести так, чтобы аварийная ветвь по возможности была сохранена до конца преобразования или, в крайнем случае, участвовала в нем только на последних его этапах. В частности, концы нагрузочных ветвей, ЭДС которых принимаются равными нулю (установившийся режим), не следует соединять с точкой трехфазного КЗ, а лучше эти ветви объединять с генераторами в эквивалентные ветви. При этом новым сопротивлениям и ЭДС, полученным при преобразованиях, даются возрастающие порядковые номера.

Для преобразования схем используются методы, известные из теоретических основ электротехники. Так, последовательные сопротивления непосредственно суммируются, параллельные — суммируются через проводимости, а при смешанных сопротивлениях используются те и другие методы. Схема, состоящая из последовательных, параллельных и смешанных сопротивлений, является простой схемой и легко преобразуется к простейшему виду.

Если схема содержит замкнутые контуры, она является сложной, и для преобразования ее к простейшему виду необходимо использовать более сложные приемы.

Преобразование треугольника (Δ) в звезду (Y) и наоборот (рис.2.3). Сопротивления треугольника определяются через сопротивления звезды по формулам

$$\begin{aligned} x_{12} &= x_1 + x_2 + x_1 x_2 / x_3; \\ x_{13} &= x_1 + x_3 + x_1 x_3 / x_2; \\ x_{23} &= x_2 + x_3 + x_2 x_3 / x_1. \end{aligned} \quad (2.19)$$

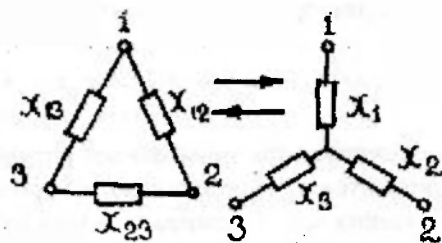


Рис. 2.3 Преобразование треугольника в звезду и наоборот.

а сопротивления звезды — по формулам

$$\begin{aligned}
 x_1 &= x_{12}x_{13} / (x_{12} + x_{13} + x_{23}); & x_2 &= x_{12}x_{23} / (x_{12} + x_{13} + x_{23}); \\
 x_3 &= x_{13}x_{23} / (x_{12} + x_{13} + x_{23}).
 \end{aligned}
 \tag{2.20}$$

Замена нескольких генераторов, сходящихся в одной точке, одним эквивалентным. Пусть имеется схема (рис. 2.4), содержащая n генераторов, сходящихся в точке a . Тогда сопротивления и ЭДС преобразованной схемы рассчитываются по формулам

$$x_{\text{экв}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}}
 \tag{2.21}$$

$$E_{\text{экв}} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \frac{1}{x_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}}
 \tag{2.22}$$

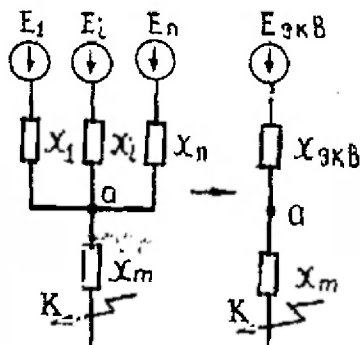


Рис. 2.4. Метод эквивалентного генератора.

Если в схеме две ЭДС, формулы упрощаются и имеют следующий вид:

$$E_{\text{экв}} = E_1 x_2 + E_2 x_1 / (x_1 + x_2); \quad x_{\text{экв}} = x_1 x_2 / (x_1 + x_2). \quad (2.23)$$

Иногда пользуются так называемым способом токораспределения (коэффициентов распределения). В процессе преобразования схемы замещения часто возникает задача разделения так называемых связанных цепей. Этот случай показан на рис.2.5.

Токи от источников I, II, III проходят через общее сопротивление x_4 . Для того чтобы определить ток, поступающий к точке КЗ от каждого источника, необходимо преобразовать схему к лучевому виду (при расчете по индивидуальному изменению), показанному на рис. 2.5,г. При расчете по схеме, полученной при таком преобразовании, токи, подтекающие в точку КЗ от отдельных источников, должны быть такими же, какими они получились бы в схеме до преобразования. Расчет производится в следующем порядке.

Составляют схему замещения для данной точки КЗ и путем постепенного преобразования приводят ее к виду, показанному на рис. 2.5,а, причем в общем случае число ветвей источников может быть любым. Далее определяют результирующее сопротивление схемы (рис. 2.5,в):

$$x_{\text{рез}} = x_{\text{экв}} + x_4, \quad (2.24)$$

где $x_{\text{экв}}$ — эквивалентное сопротивление всех источников питания относительно точки А схемы:

$$x_{\text{экв}} = x_1 // x_2 // x_3. \quad (2.25)$$

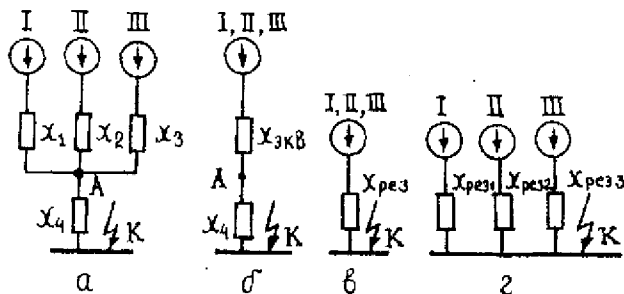


Рис. 2.5. Разделение связанных цепей.

Принимают относительное значение периодической составляющей тока в месте повреждения за единицу ($I_m=1$) и находят коэффициенты распределения, т.е. долю участия в токе КЗ каждого источника. На основании законов Кирхгофа можно записать:

$$I_{mI} + I_{mII} + I_{mIII} = 1, \quad (2.26)$$

$$\text{а также } \frac{I_{*nI}}{I_{*n}} = \frac{x_{экв}}{x_1}; \quad \frac{I_{*nII}}{I_{*n}} = \frac{x_{экв}}{x_2} \text{ и т.д.}$$

Отсюда коэффициенты распределения по ветвям

$$\begin{aligned} C_1 &= I_{mI} = x_{экв}/x_1; \\ C_2 &= I_{mII} = x_{экв}/x_2; \\ C_3 &= I_{mIII} = x_{экв}/x_3. \end{aligned} \quad (2.27)$$

Таким образом, используя коэффициенты распределения, можно по суммарному току в месте КЗ определить, как он распределится по ветвям. Правильность вычисления коэффициентов можно проверить по выполнению условия

$$C_1 + C_2 + C_3 = 1. \quad (2.28)$$

Учитывая, что токораспределение по ветвям должно остаться неизменным, получаем (рис.2.5,г):

$$x_{рез1} = x_{рез}/C_1; \quad x_{рез2} = x_{рез}/C_2; \quad x_{рез3} = x_{рез}/C_3. \quad (2.29)$$

Метод рассечения узла.

Когда трехфазное КЗ находится в узле с несколькими сходящимися в нем ветвями (рис. 2.6,а) и необходимо определить токи в этих ветвях, прибегают к методу разрезания узла по точке КЗ. На каждой образовавшейся отдельной ветви сохраняется точка КЗ (рис. 2.6,б).

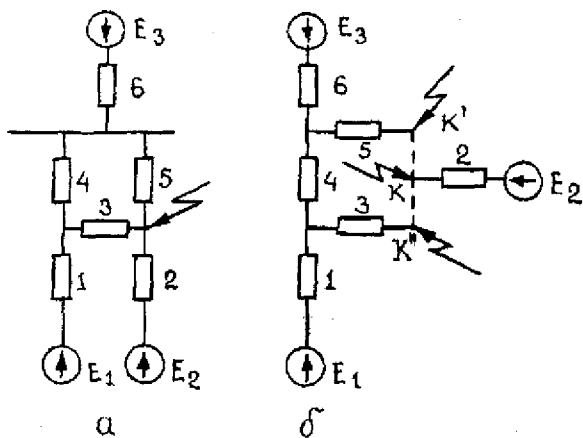


Рис. 2.6. Метод рассечения узла.

Далее полученную схему нетрудно преобразовать относительно любой из точек КЗ, учитывая другие ветви с короткими замыканиями как обычно нагрузочные ветви с ЭДС, равными нулю. Такой прием особенно эффективен, когда нужно найти ток в одной из ветвей, присоединенных к точке КЗ.

Определенные трудности в упрощении схем возникают, когда точка КЗ находится в одном из узлов многоугольника, к другим узлам которого присоединены генерирующие ветви. Примером могут служить случаи КЗ в схемах, приведенных на рис. 2.7 и 2.8.

Значительное упрощение схем достигается совмещением точек одинакового потенциала. Если точка КЗ делит схему на две симметричные части, например, точки K_1 и K_2 (рис. 2.7,а), то при одинаковых характеристиках генераторов G_1, G_3 и трансформаторов узлы а и б схемы будут иметь одинаковые потенциалы, вследствие чего их можно совместить. При совмещении равнопотенциальных точек сопротивления одноименных ветвей складывают, как параллельные, и получают новую схему (рис.2.7,в). В этой схеме $x_9 = x_2/x_3$; $x_{10} = x_4/x_5$; $x_{11} = x_6/x_8$. Дальнейшее преобразование схемы производится по обычным правилам.

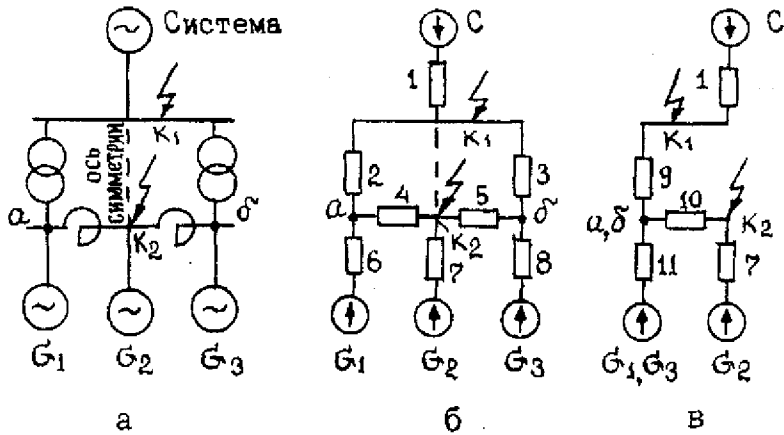


Рис.2.7. Короткое замыкание в симметричной сложной схеме.

Рассмотрим случай, показанный на рис. 2.8. Здесь генераторы G_1 и G_2 имеют одинаковые ЭДС, вследствие чего их можно объединить в эквивалентную машину с $S=2S_{ном}$. При таком объединении образуется треугольник сопротивлений (x_4, x_6, x_7), который преобразуется в звезду (x_9, x_{10}, x_{11}), как показано на рис. 2.8,б. В схеме на рис. 2.8,в определяют сопротивления $x_{12}=x_2+x_9$ и $x_{13}=x_5+x_{10}$.

Получившийся в результате треугольник (x_3, x_{12}, x_{13}) преобразуется в звезду (x_{14}, x_{15}, x_{16}). После определения сопротивлений $x_{17}=x_1+x_{14}$ и $x_{18}=x_{11}+x_{16}$ получаем окончательную схему, приведенную на рис. 2.8,г.

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

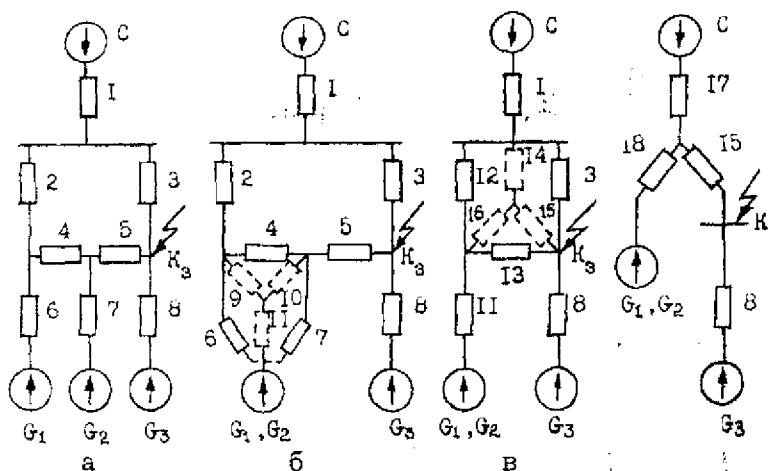


Рис.2.8. Преобразование сложной схемы по методу треугольник-звезда.

$$S_{II \text{ ном}} x_{\text{резл}} / (S_{II \text{ ном}} x_{\text{резл}} + S_{III \text{ ном}}) = 0,4 \neq 2,5. \quad (2.30)$$

Здесь $S_{I \text{ ном}}$, $S_{II \text{ ном}}$ — номинальные мощности источников питания;

$x_{\text{резл}}$, $x_{\text{резл}}$ — результирующие сопротивления между соответствующим источником питания и точкой КЗ.

Если расчетное сопротивление ветви между источником питания и точкой КЗ $x_{\text{расч}} \geq 3$, то объединение источников питания допустимо. При наличии в схеме ветвей, содержащих источник бесконечной мощности ($U = \text{const}$) и источник с сопротивлением ветви $x_{\text{расч}} \leq 3$, объединить их в один эквивалентный источник не рекомендуется, так как при этом ухудшается точность определения тока КЗ. При упрощении схемы замещения ЭЭС можно пренебречь источником меньшей мощности, если

$$x_{\text{резл}} / x_{\text{резл}} \geq 20 \text{ и } S_{II \text{ ном}} / S_{I \text{ ном}} \leq 0,05, \quad (2.31)$$

где $S_{II \text{ ном}}$ — мощность источника питания, меньшего по мощности;

$x_{\text{резл}}$ — сопротивление цепи между этим источником и точкой КЗ.

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

Пример 2.2. Для исходной схемы рис. 2.9,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. 2.9,б.

Преобразование схемы целесообразно начать с последовательного сложения сопротивлений 1 и 5, 2 и 8, 4 и 12, параллельного сложения сопротивлений 13 и 14 последовательного сложения полученного сопротивления с сопротивлением 15. Затем следует источник ЭДС E_1 и E_3 , E_4 и E_{II} заменить соответствующими эквивалентными источниками (на рис. 2.9,в им соответствуют участки с ЭДС 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. 2.9,б треугольник с сопротивлениями 19-21).

Полученный треугольник следует разрезать в точке, где приложена ЭДС E_2 . В результате получается два источника с одинаковыми ЭДС E_2 , подключенными соответственно через сопротивления 19 и 20 (рис. 2.9,в).

Источники, присоединенные к одним шинам, нужно заменить эквивалентными (на рис. 2.9,г им соответствуют участки с ЭДС E_7 и E_8), а треугольник с сопротивлениями 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.

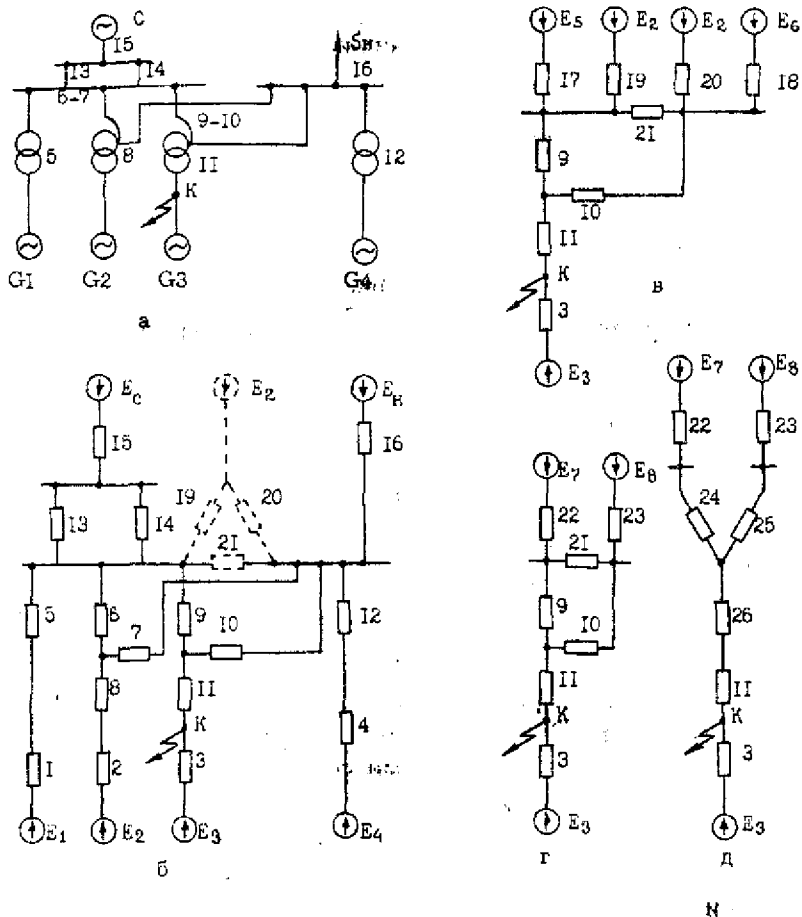


Рис.2.9 К примеру 2.2.

Контрольные вопросы

1. Каковы причины появления электромагнитных переходных процессов в ЭЭС и их возможные последствия?
2. Каковы основные виды КЗ и вероятности их возникновения в элементах ЭЭС в сетях различного напряжения?
3. Что понимается под термином «короткое замыкание», «простое замыкание»? Каковы обозначения видов замыканий в зависимости от режима нейтрали сети?

4. Какие условия и основные допущения принимают при расчетах КЗ?
5. Как выбираются и пересчитываются базисные условия для различных ступеней напряжения ЭЭС?
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?

**ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОСТЕЙШИХ
ТРЕХФАЗНЫХ И НЕПОДВИЖНЫХ
МАГНИТОСВЯЗАННЫХ ЦЕПЯХ**

Простейшей трехфазной цепью называют симметричную трехфазную цепь с сосредоточенными активным и индуктивным сопротивлениями при отсутствии в ней трансформаторных связей.

Протекание электромагнитного переходного процесса в магнитосвязанных цепях имеют некоторые характерные особенности. Рекомендуется обратить особое внимание на основные закономерности в соотношениях, рассматриваемые в данной главе; они в значительной мере облегчают понимание более сложных явлений, которые исследуются в дальнейшем применительно к вращающимся электрическим машинам.

В качестве основной предпосылки в соответствии с ранее принятыми допущениями считаем, что между токами и напряжениями рассматриваемых цепей сохраняется линейная зависимость и, следовательно, они могут быть связаны линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. Для силовых трансформаторов и автотрансформаторов в условиях КЗ это допущение практически выполняется, поскольку основные магнитные потоки и обусловленное ими насыщение магнитопровода при этом становится меньше.

Иное положение имеет место, когда рассматривается переходный процесс при включении силовых трансформаторов на холостой ход. Правильное представление о протекании такого процесса можно получить только при учете изменения насыщения их магнитопроводов.

3.1. Переходный процесс в простейших трехфазных цепях

На рис. 3.1. приведена простейшая симметричная трехфазная цепь. В ней условно принято, что на одном участке имеется взаимоиנדукция между фазами М, а на другом она отсутствует.

Цепь присоединена к источнику синусоидального напряжения с постоянной амплитудой и частотой.

До КЗ в цепи протекал ток нагрузки

$$i_n = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi_n), \quad (3.1)$$

где $I_m = U_m / Z_n$ — амплитудное значение периодической составляющей тока нагрузки;

U_m — амплитудное значение напряжения источника питания;

$Z_n = \sqrt{r_n^2 + x_n^2}$ — полное сопротивление цепи;

$r_n = r_k + r_l$ — активное сопротивление цепи;

$x_n = \omega(L + L_l)$ — индуктивное сопротивление цепи;

α — фаза включения (т.е. угол между вектором напряжения фазы А и действительной осью);

$\varphi_n = \arctg x_n / r_n$ — угол сдвига между напряжением и током той же цепи.

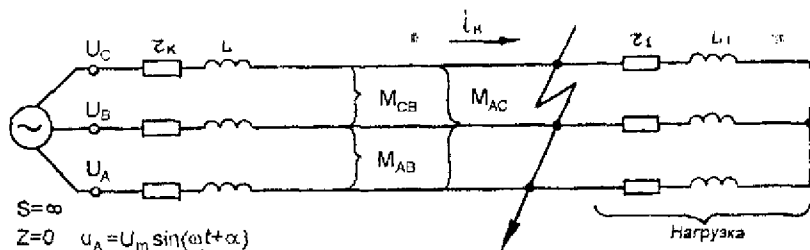


Рис.3.1. Простейшая трехфазная цепь.

Короткое замыкание делит цепь на две части: правую с сопротивлениями r_l и $x_l = \omega L_l$ в каждой фазе и левую, содержащую источник питания и сопротивления цепи КЗ r_k и $x_k = \omega L_k$. Процессы в обеих частях схемы при трехфазном КЗ протекают независимо.

Правая часть рассматриваемой цепи оказывается зашунтированной КЗ, и ток в ней будет поддерживаться лишь до тех пор, пока запасенная в индуктивности L_l энергия магнитного поля не перейдет в тепло, выделяющееся в активном сопротивлении r_l .

Дифференциальное уравнение равновесия в каждой фазе этой части имеет вид:

$$0 = i_j r_l + L_l \frac{di_j}{dt}, \quad \text{где } j = (A, B, C). \quad (3.2)$$

Его решение общеизвестно

$$i_k = i_0 e^{-t/T_{a1}} \quad (3.3)$$

Оно показывает, что здесь имеется лишь свободный ток, который затухает по экспоненте с постоянной времени

$$T_{a1} = \frac{L_1}{r_1} = \frac{x_1}{\omega r_1}, \text{ с.} \quad (3.4)$$

Для определения начального значения свободного тока (i_0) рассмотрим момент времени $t=0$, т.е. $i_0=i(0)$. Начальное значение тока в каждой фазе, зашунтированного участка цепи, очевидно, равно предшествовавшему мгновенному значению тока в момент возникновения КЗ, поскольку в цепи с индуктивностью не может произойти внезапного (скачком) изменения тока

$$i_0 = i_0(\omega) = I_m \sin(\alpha - \varphi_n).$$

Пусть векторы $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ характеризуют предшествующий режим рассматриваемой цепи, а вертикаль tt является неподвижной линией времени, т.е. начальные значения отдельных величин определяются проекциями на эту линию соответствующих вращающихся векторов (рис. 3.2).

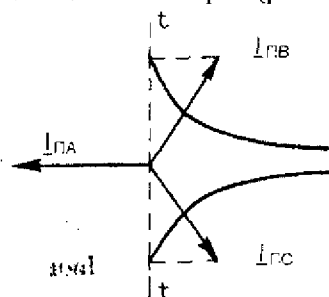


Рис. 3.2. Векторная диаграмма тока в правой части цепи в момент КЗ.

Ток в правой части в каждой фазе затухает по экспоненте с одной и той же постоянной времени, однако начальное значение свободного тока в каждой фазе различно, из-за углового сдвига между токами и не может превышать амплитуду тока нормального режима.

Из рис. 3.2 видно, что в одной из фаз свободный ток может вообще отсутствовать, если в момент возникновения КЗ предшествующий ток в этой фазе проходил через нуль; при этом свободные токи в двух других фазах будут одинаковы по величине, но противоположны по направлению. Поэтому в начальный момент трехфазное КЗ является несимметрич-

ным КЗ, так как начальные значения свободного тока каждой фазы различны.

Рассмотрим переходный процесс в левой части цепи, содержащей источник питания. Здесь помимо свободного тока будет новый вынужденный ток, величина которого, очевидно, больше предыдущего и сдвиг по фазе которого в общем случае иной.

Дифференциальное уравнение равновесия для любой фазы, например фазы А, этой части

$$U_A = i_A r_k + L \frac{di_A}{dt} + M_{AB} \frac{di_B}{dt} + M_{AC} \frac{di_C}{dt}.$$

Имея в виду, что $(i_B + i_C) = -i_A$, а также $M_{AB} = M_{AC} = M_{BC} = M$, можно представить (опуская индекс фазы) как

$$U = i r_k + L_k \frac{di}{dt}, \quad (3.5)$$

где $L_k = (L - M)$ — результирующая индуктивность фазы.

Решение (3.5) дает выражение для мгновенного значения тока в любой момент времени t от начала КЗ:

$$i = \frac{U_m}{z_k} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + i_{\text{св}} e^{-t/T_a}, \quad (3.6)$$

где z_k — полное сопротивление присоединенного к источнику цепи КЗ;

φ_k — угол сдвига вынужденной составляющей тока в цепи КЗ относительно напряжения источника той же фазы;

T_a — постоянная времени цепи КЗ.

Как видно из (3.6), полный ток складывается из двух составляющих: вынужденной, обусловленной действием напряжения источника питания (первый член в правой части уравнения), и свободной, обусловленной изменением запаса энергии магнитного поля в индуктивности L_k (второй член уравнения).

Вынужденная составляющая тока КЗ имеет периодический характер с частотой, равной частоте напряжения источника. Называют эту составляющую обычно периодической составляющей тока КЗ

$$i_{n,m} = \frac{U_m}{z_k} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) = I_{n,m} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k), \quad (3.7)$$

где $I_{n,m}$ — амплитудное значение периодической составляющей тока.

Свободная составляющая тока имеет аperiodический характер изменения, на основании чего эту составляющую тока называют также aperиодической составляющей тока КЗ.

Начальное значение аperiodической составляющей тока КЗ в каждой фазе определяется по выражению (3.6) для момента времени $t=0$:

$$i_{a,0} = i(0) - i_{n,0} = I_{mn} \sin(\alpha - \varphi_n) - I_{n,m} \sin(\alpha - \varphi_k). \quad (3.8)$$

Здесь $i(0)$ —начальное значение тока КЗ, которое с учетом невозможности изменения тока скачком в цепи с индуктивностью равно току предшествующего режима в данной фазе к моменту $t=0$. Значение периодической составляющей тока при $t=0$ определяется как

$$i_{n,0} = I_{n,m} \sin(\alpha - \varphi_k). \quad (3.9)$$

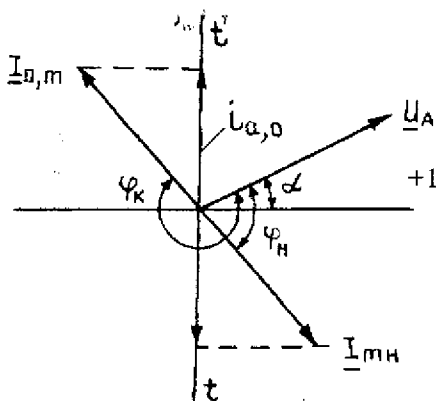


Рис.3.3. Векторная диаграмма токов в фазе А при трехфазном КЗ.

Поскольку токи $i_{(0)}$ и $i_{n,0}$ являются проекциями векторов I_{mn} и $I_{n,m}$ на линию времени, то ток $i_{a,0}$ также можно рассматривать как проекцию вектора $I_{mn} - I_{n,m}$ на ту же линию (рис. 3.3). В зависимости от фазы включения α начальное значение тока $i_{a,0}$ может изменяться от возможной наибольшей величины, когда вектор $(I_{mn} - I_{n,m})$ параллелен линии времени, до нуля, когда этот вектор нормален к ней. В трехфазной системе такие частные условия, разумеется, могут быть лишь в одной из фаз.

Представляет определенный интерес условие возникновения максимального значения аperiodической составляющей тока КЗ. Из (3.8) и (3.9) при $x_k \gg r_k$ и $\varphi_k = 90^\circ$ следует, что максимальное значение тока $i_{a,0}$ будет в случае, если напряжение в момент возникновения КЗ проходит через нулевое значение ($\alpha = 0$) и тока в цепи КЗ нет, т.е. $i_{(0)} = 0$. При этом $i_{a,0} = I_{n,m}$.

Важно отметить, что фаза включения, при которой возникает наибольшее значение аperiodической составляющей, еще не предопределяет того, что именно при ней будет максимум мгновенного значения полного тока. В самом деле, из (3.6) и (3.8) при отсутствии предшествующего тока ($I_{mn} = 0$) следует, что полный ток в цепи КЗ является функцией двух независимых переменных: времени t и фазы включения α и выражается уравнением

$$i = I_{n,m} \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - \sin(\alpha - \varphi_k) e^{-t/T_a} \right]. \quad (3.10)$$

Наибольшее мгновенное значение полного тока КЗ называют ударным током (рис. 3.4). Он возникает при первом наибольшем значении аperiodической составляющей, совпадающей по знаку с периодической составляющей тока КЗ. Этот момент наступает примерно через полпериода после появления КЗ ($t = 0,01c$). При этом условии ударный ток

$$i_y = I_{n,m} + I_{n,m} e^{-0,01 T_a} = I_{n,m} (1 + e^{-0,01 T_a}) = I_{n,m} k_y, \quad (3.11)$$

где $T_a = x_k / \omega r_k$ — постоянная времени цепи КЗ;

k_y — ударный коэффициент, характеризующий превышение ударного тока над амплитудой периодической составляющей КЗ.

Его значение

$$k_y = 1 + e^{-0,01 T_a} = i_y / I_{n,m}. \quad (3.12)$$

Ударный коэффициент зависит от постоянной времени затухания аperiodической 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

$$1 < k_y < 2. \quad (3.13)$$

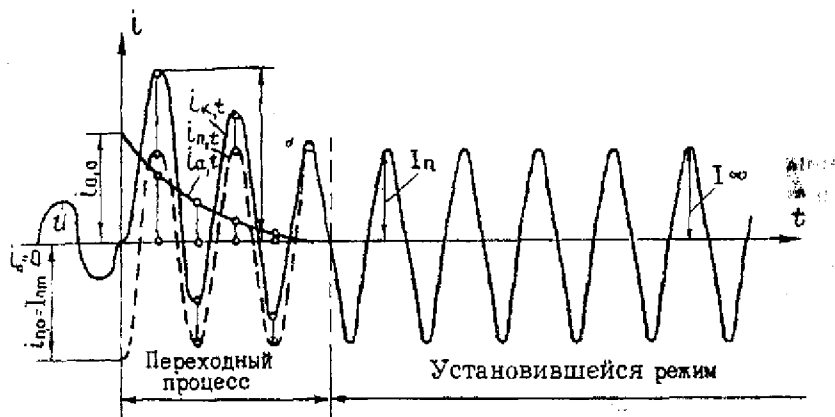


Рис. 3.4. Изменение тока КЗ и его составляющих при наибольшем начальном значении аperiodической составляющей тока.

Действующее значение полного тока КЗ в произвольный момент времени t переходного процесса определяют как среднеквадратичное значение тока за период T , в середине которого находится рассматриваемый момент. Поскольку $i(t)$ в общем случае сложна, то для упрощения подсчета действующего значения считают, что за рассматриваемый период амплитуда периодической и аperiodической составляющих неизменны и каждая из них равна своему 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 аperiodическая 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

$$I_y = \sqrt{i_{n0}^2 + (i_{a0} e^{-0,01 T_a})^2} \quad (3.14)$$

Считая, что $i_{a0} = I_{n,n} = \sqrt{2} I''$, получаем

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

Так как согласно (3.12) $e^{-0,01 T_n} = k_y - 1$, то действующее значение полного тока КЗ

$$I_y = I'' \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2}. \quad (3.15)$$

3.2. Внезапное короткое замыкание цепи с трансформатором

При отсутствии насыщения в стали магнитопровода трансформатора между токами и напряжениями существует линейная зависимость.

Рассмотрим трехфазное КЗ на стороне вторичной обмотки трансформатора, первичная обмотка которого присоединена к источнику трехфазного напряжения бесконечной мощности, амплитуда и частота которого постоянны (рис. 3.5).

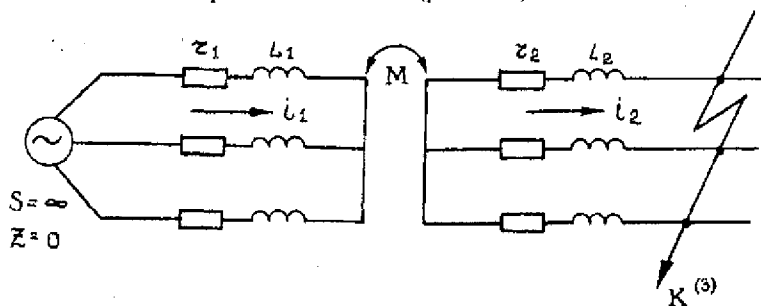


Рис.3.5. Внезапное короткое замыкание трансформатора.

Переходный процесс будем рассматривать на основе схемы замещения трансформатора (рис. 3.6), для которой параметры вторичной обмотки приведены к первичной, а также отсутствует ток намагничивания.

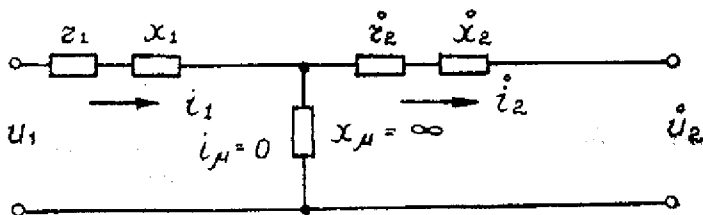


Рис. 3.6. Схема замещения двухобмоточного трансформатора.

Для ненасыщенного трансформатора уравнение баланса напряжений для первичной и вторичной его обмоток запишутся

$$\begin{aligned} U_j &= i_{1j} r_1 + L_1 \dot{i}_{1j} + M \dot{i}_{2j}; \\ 0 &= i_{2j} r_2 + L_2 \dot{i}_{2j} + M \dot{i}_{1j}; \end{aligned} \quad (3.16)$$

$(j = A, B, C).$

На основе схемы замещения $i_1 = i_2 = i$, сложив уравнения (3.16), получим

$$U = i r_k - L_k \dot{i} / dt, \quad (3.17)$$

где $r_k = r_1 + r_2$; $L_k = L_1 + L_2 + 2M$ —индуктивность рассеяния трансформатора, обусловленная потоками рассеяния обмоток.

Уравнение (3.17) аналогично уравнению, описывающему переходный процесс в простейшей трехфазной цепи, решение которого рассмотрено ранее.

Таким образом, при исследовании процесса КЗ в схеме содержащей трансформаторы, каждый трансформатор можно рассматривать как обычный элемент электрической цепи со своими сопротивлениями (r_k , l_k) после приведения параметров одной обмотки к другой.

3.3. Включение силового трансформатора на холостой ход

Рассмотрим переходный процесс, возникающий при включении холостого трансформатора на синусоидальное напряжение постоянной амплитуды и неизменной частоты (рис. 3.7). По существу это равноценно включению дросселя с магнитным сердечником, в котором проявляется насыщение.

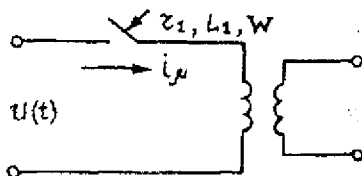


Рис.3.7. Включение холостого трансформатора.

Запишем дифференциальное уравнение баланса напряжений

$$U(t) = i_{\mu} r_1 + L_1(i_{\mu}) di_{\mu} / dt. \quad (3.18)$$

Дифференциальное уравнение (3.18) будет нелинейным, так как индуктивность L_1 является функцией искомого тока i_{μ} . При рассмотрении переходного процесса в простейшей трехфазной цепи было установлено, что при замыкании предварительно ненагруженной цепи с r и L наибольшая величина тока возникает при условии, когда подведенное напряжение в момент замыкания проходит через нуль (т.е. подведенное напряжение будет компенсироваться ЭДС в сердечнике). Из этого условия как наиболее неблагоприятного исходим и в данном случае. Если пренебречь малым активным сопротивлением обмотки трансформатора (трансформатор без потерь), то условие равновесия напряжения после включения трансформатора будет

$$U_m \sin \omega t = w d\Phi / dt. \quad (3.19)$$

где w — число витков подключенной обмотки трансформатора.

Интегрирование выражения (3.19) с учетом того, что начальный магнитный поток $\Phi_0 = 0$, приводит к очевидной закономерности изменения магнитного потока

$$\Phi = \Phi_m (1 - \cos \omega t). \quad (3.20)$$

При учете активного сопротивления обмотки трансформатора постоянная составляющая в (3.20) будет изменяться с постоянной времени $T_a = L_1 / r_1$, и это выражение примет вид

$$\Phi = \Phi_m (e^{-t/T_a} - \cos \omega t). \quad (3.21)$$

Связь между магнитным потоком Φ и током намагничивания i_{μ} выражается магнитной характеристикой $\Phi = f(i_{\mu})$. Используя последнюю и (3.21), можно графическим построением, как показано на рис. 3.8, найти характер изменения тока намагничивания i_{μ} во времени при включении трансформатора на холостой ход. Для этого на (3.21) возьмем четыре точки и перенесем их через кривую намагничивания ($\Phi = f(i_{\mu})$).

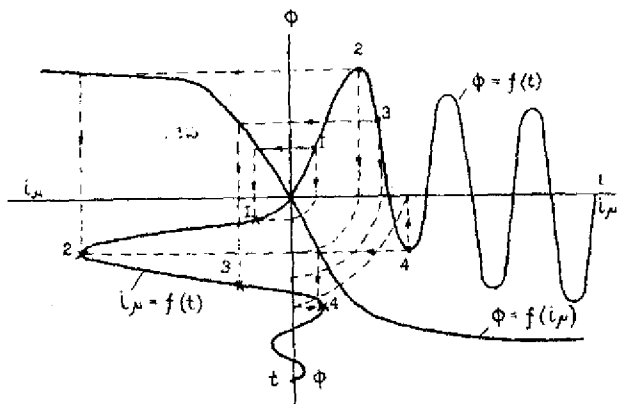


Рис. 3.8. Построение кривой $i_{\mu}=f(t)$ при включении холостого трансформатора.

Как видно из рис. 3.8, благодаря насыщению магнитной системы амплитуда броска тока намагничивания i_{μ} при включении холостого трансформатора достигает очень больших величин, которые могут достигать $(5\div 10)$ номинального тока трансформатора.

Кривая изменения $i_{\mu}=f(t)$ в своей начальной стадии имеет резко выраженный несинусоидальный характер и содержит широкий спектр частот, что обусловлено нелинейностью характеристики намагничивания. Бросок тока намагничивания является опасным для трансформатора, так как он существует кратковременно, хотя в некоторых случаях может привести к отключению трансформатора.

В броске тока намагничивания содержится 60% составляющих, изменяющихся с двойной частотой (100 Гц), что используется для блокировки релейных защит. Таким образом, бросок тока намагничивания учитывается при проектировании устройств релейной защиты и автоматики.

Контрольные вопросы

1. Почему трехфазное КЗ в начальный момент является несимметричным КЗ?
2. Как определяется начальное значение свободной составляющей тока КЗ?

3. При каких условиях полный ток КЗ в простейшей цепи будет иметь максимальное значение?
4. Что такое ударный ток?
5. От чего зависит величина ударного коэффициента и в каких пределах она находится?
6. Как влияет на характер протекания переходных процессов постоянная времени цепи и каков ее физический смысл?
7. Как определяется действующее значение полного тока КЗ и его отдельных составляющих?
8. На чем основано рассмотрение переходного процесса в цепи с трансформатором?
9. Какие особенности переходного процесса при включении холостого трансформатора?

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПОДВИЖНЫХ МАГНИТОСВЯЗАННЫХ ЦЕПЯХ

Переходный процесс в синхронных машинах при КЗ очень сложен и подробно рассматривается в курсе «Электрические машины». Ниже даются упрощенная физическая картина процесса и инженерные упрощенные методы расчета токов КЗ.

Поскольку поставленная задача ограничена рассмотрением лишь начального момента, вращение ротора и обусловленное этим изменение индуктивностей машины, очевидно, не играют никакой роли. Другими словами, в данном случае машину можно рассматривать как трансформатор.

Исследование начального момента переходного процесса проще и нагляднее вести на основе принципа сохранения первоначального потокоцепления. В самом деле, коль скоро магнитный поток, сцепленный с ротором, в момент внезапного нарушения режима сохраняется неизменным, то соответствующая ему ЭДС, наведенная в статоре, в тот же момент также остается неизменной. Следовательно, для синхронной машины условия в начальный момент переходного процесса аналогичны тем же условиям для трансформатора, питаемого источником синусоидального напряжения.

Установим, какими ЭДС и реактивностями можно характеризовать синхронную машину в начальный момент переходного процесса.

4.1. Начальный момент внезапного нарушения режима синхронной машины 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 ЭДС и ток короткозамкнутой цепи от их номинальных значений, которые они имели перед КЗ,

до новых значений, соответствующих установившемуся режиму КЗ.

При нормальном режиме работы синхронной машины без демпферных обмоток полный ток ее обмотки возбуждения Φ_f при холостом ходе состоит из полезного потока Φ_{fad} и потока рассеяния Φ_{of} (рис. 4.1, а). В свою очередь, полезный поток Φ_{fad} равен геометрической разности продольного потока в воздушном зазоре $\Phi_{\delta l}$ и потока продольной реакции статора Φ_{ad} .

Результирующий магнитный поток $\Phi_{f\text{рез}}$, сцепленный с обмоткой возбуждения, равен сумме потоков Φ_{of} и $\Phi_{\delta l}$.

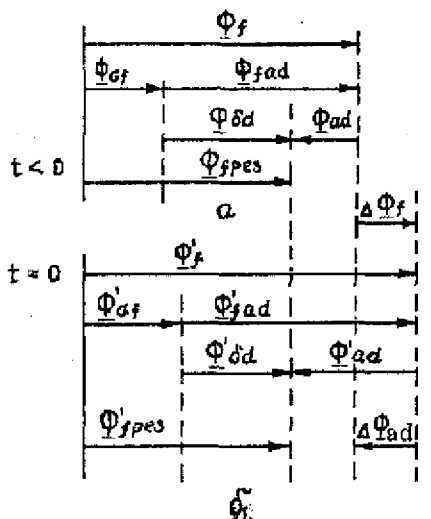


Рис. 4.1. Диаграммы магнитных потоков синхронной машины при нормальном режиме (а) и внезапном КЗ на ее выводах (б).

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. 4.1, б), так как согласно закону Ленца

изменение потока на $\Delta \underline{\Phi}_{ad}$ вызовет ответный поток реакции обмотки возбуждения $\Delta \underline{\Phi}_f$, компенсирующий поток $\Delta \underline{\Phi}_{ad}$. В результате сумма приращений потокосцеплений

$$\Delta \underline{\Psi}_{ad} + \Delta \underline{\Psi}_f = 0 \quad (4.1)$$

или

$$\Delta \underline{I}_d x_{ad} + \Delta \underline{I}_f (x_{\sigma f} + x_{ad}) = 0, \quad (4.2)$$

где $\Delta \underline{I}_d$ и $\Delta \underline{I}_f$ — соответственно приращения токов статора и ротора, которые отличаются между собой на величину, обусловленную рассеянием обмотки возбуждения.

Поток рассеяния в ненасыщенной машине $\underline{\Phi}_{\sigma f}$ характеризуется коэффициентом рассеяния обмотки возбуждения.

$$\sigma_f = \Phi_{\sigma f} / \Phi_f = x_{\sigma f} / (x_{\sigma f} + x_{ad}) = x_{\sigma f} / x_f. \quad (4.3)$$

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

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

$$\underline{\Psi}'_d = (1 - \sigma_f) \underline{\Psi}'_{f \text{ рез}}. \quad (4.4)$$

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

Потокоцепление (4.4) можно выразить через соответствующие токи и сопротивления, записав

$$\begin{aligned}\Psi'_d &= (1 - x_{cf} / (x_{cf} + x_{ad}))(\Psi_f - \Psi_{ad}) = \\ &= (x_{ad} / (x_{cf} + x_{ad}))[L_f(x_{cf} + x_{ad}) - L_d x_{ad}] = \\ &= L_f x_{ad} - L_d(x_{ad}^2 / (x_{cf} + x_{ad})).\end{aligned}$$

Так как при приведении параметров ротора к статору имеем:

$$L_f x_{ad} = \underline{E}_q; \quad \Psi'_d = \underline{E}'_q,$$

то получим

$$\underline{E}'_q = \underline{E}_q - jL_d(x_{ad}^2 / (x_{cf} + x_{ad})).$$

Прибавим и отнимем в правой части выражение $jL_d x_d$, получим

$$\underline{E}'_q = \underline{E}_q - jL_d x_d + jL_d x_d - jL_d(x_{ad}^2 / (x_{cf} + x_{ad})) = \underline{U}_q + jL_d x'_d, \quad (4.5)$$

ЭДС \underline{E}'_q называют поперечной переходной ЭДС, а сопротивление

$$x'_d = x_d - x_{ad}^2 / (x_{cf} + x_{ad}) = x_d - x_{ad}^2 / x_f, \quad (4.6)$$

продольным переходным индуктивным сопротивлением; оно является характерным параметром синхронной машины и его величина указывается в паспортных данных машины.

По направлению ЭДС \underline{E}'_q совпадает с ЭДС \underline{E}_q , а по значению меньше ее на $L_d(x_d - x'_d)$. Поскольку ЭДС \underline{E}'_q остается неизменной в начальный момент КЗ, эта ЭДС совместно с x'_d позволяет оценить внезапный переход от одного режима работы машины к другому. Ошибочно думать, что \underline{E}'_q возникает в момент нарушения режима. Она существует в любой момент произвольного режима или процесса.

Поскольку \underline{E}'_q в общем случае измерить нельзя, ее иногда называют расчетной или условной ЭДС

Выражению (4.6) можно придать иной вид:

$$\begin{aligned} x'_d &= x_d - x_{ad}^2 / (x_{of} + x_{ad}) = x_{\sigma} + x_{ad} - x_{ad}^2 / (x_{of} + x_{ad}) = \\ &= x_{\sigma} + x_{of} x_{ad} / (x_{of} + x_{ad}), \end{aligned} \quad (4.7)$$

Переходные ЭДС и индуктивное сопротивление машины без демпферных обмоток могут быть получены также из ее схемы замещения (рис. 4.2,а), которая аналогична схеме замещения двух-обмоточного трансформатора (рис. 4.2,б).

Заменив ветви x_{of} и x_{ad} одной эквивалентной ветвью, можно получить схему замещения машины с параметрами \underline{E}'_q и x'_d (рис. 4.2,в). В этих схемах обмотка возбуждения введена ЭДС \underline{E}_{qf} , отвечающая результирующему потокоцеплению $\underline{\Psi}_{f\text{рез}}$.

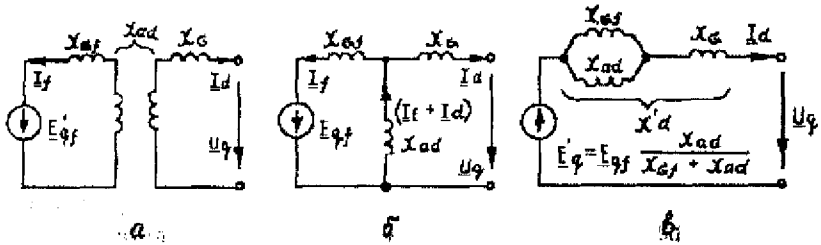


Рис.4.2. Схема замещения синхронной машины по продольной оси ротора в переходном режиме.

Если в поперечной оси ротора замкнутых контуров нет, то $\underline{E}'_d = 0$, $x'_q = x_q$ и периодическая составляющая тока в начальный момент переходного процесса, называемая продольным переходным током, определяется выражением

$$\underline{I}'_d = \underline{E}'_q / (x'_d + x_{an}), \quad (4.8)$$

где x_{an} — внешнее индуктивное сопротивление цепи статора

4.2. Начальный момент внезапного нарушения режима синхронной машины с демпферными обмотками

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

На рис. 4.3. 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 взаимоиндукции Φ_{ad} , которому соответствует реактивное сопротивление продольной реакции x_{ad} .

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

для обмотки возбуждения

$$\Delta I_f(x_{ef} + x_{ad}) + \Delta I_{fd}x_{ad} + \Delta I_d x_{ad} = 0, \quad (4.9)$$

для продольной демпферной обмотки

$$\Delta I_{fd}(x_{afd} + x_{ad}) + \Delta I_f x_{ad} + \Delta I_d x_{ad} = 0, \quad (4.10)$$

где ΔI_{fd} и x_{afd} — начальный ток, наведенный в продольной демпферной обмотке, и ее реактивность рассеяния.

Из уравнений (4.9) и (4.10) следует, что

$$\Delta I_f x_{ef} = \Delta I_{fd} x_{afd}, \quad (4.11)$$

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

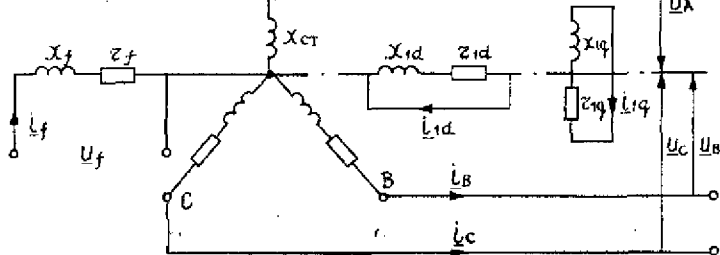


Рис. 4.3. Принципиальная схема синхронной машины с демпферными обмотками в продольной и поперечной осях ротора.

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

$$\Delta I_{rd}(x_{\sigma rd} + x_{ad}) = (\Delta I_f + \Delta I_{1d})(x_{\sigma rd} + x_{ad}) = -\Delta I_f x_{ad}, \quad (4.12)$$

С учетом (4.11), (4.9) и (4.12) можно найти эквивалентное реактивное сопротивление рассеяния

$$x_{\sigma rd} = x_{\sigma f} x_{\sigma 1d} / (x_{\sigma f} + x_{\sigma 1d}), \quad (4.13)$$

которое определяется как сопротивление двух параллельных ветвей с $x_{\sigma f}$ и $x_{\sigma 1d}$.

Произведенная замена позволила рассматриваемую задачу свести к той, которая уже решена в предыдущем параграфе.

Следовательно, для получения сопротивления, которым характеризуется такая машина в продольной оси при внезапном нарушении режима достаточно в (4.7) вместо $x_{\sigma f}$ ввести $x_{\sigma rd}$. Сделав такую подстановку и произведя преобразования, найдем так называемое продольное сверхпереходное сопротивление

$$x''_d = x_d - x_{ad}^2 / (x_{\sigma rd} + x_{ad}) = x_d + x_{\sigma rd} x_{ad} / (x_{\sigma rd} + x_{ad}) = x_d + x_{ad} // x_{\sigma f} // x_{\sigma 1d}, \quad (4.14)$$

В поперечной оси ротора, где расположена только одна демпферная обмотка, по аналогии с выкладками §4.1 легко найти так называемое поперечное сверхпереходное сопротивление

$$x''_q = x_q - x_{aq}^2 / (x_{\sigma 1q} + x_{aq}) = x_q + x_{\sigma 1q} x_{aq} / (x_{\sigma 1q} + x_{aq}), \quad (4.15)$$

ЭДС за сопротивлениями x''_d и x''_q в начальный момент переходного процесса сохраняют свои значения неизменными и называются сверхпереходными ЭДС E''_d и E''_q . Значения этих ЭДС находят по формулам

$$\underline{E''_d} = \underline{U_d} + j\underline{I_d}x''_d; \quad (4.16)$$

$$\underline{E''_q} = \underline{U_q} + j\underline{I_q}x''_q, \quad (4.17)$$

где $\underline{U_d}$, $\underline{U_q}$, $\underline{I_d}$, $\underline{I_q}$ — 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 ЭДС E''_d , E''_q . Приставкой «сверх» в названиях «сверхпереходные» подчеркивают влияние на переходный процесс демпферных обмоток машины.

Принципиальную схему трех магнитосвязанных обмоток в продольной оси ротора (рис. 4.4,а) можно представить эквивалентной схемой замещения, аналогичной схеме замещения трехобмоточного трансформатора (рис. 4.4,б), в которой ЭДС \underline{E}_{qf} и \underline{E}_{q1d} соответствуют результирующим потокосцеплениям обмотки возбуждения и продольной демпферной обмотки. Упрощенная схема замещения машины с параметрами E''_q и x''_d изображена на рис. 4.4,в.

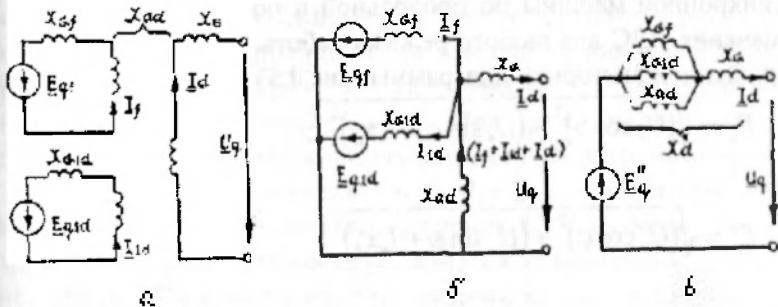


Рис. 4.4. Схема замещения синхронной машины по продольной оси ротора в сверхпереходном режиме.

В поперечной оси ротора с параметрами E''_d и x''_q схема замещения машины имеет такой же вид, как и для двухобмоточного трансформатора (рис. 4.2).

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

$$I''_d = E''_q / (x''_d + x_{en}); \quad (4.18)$$

$$I''_q = E''_d / (x''_q + x_{en}). \quad (4.19)$$

Полный сверхпереходный ток

$$I'' = \sqrt{(I''_d)^2 + (I''_q)^2}. \quad (4.20)$$

Угол между полными сверхпереходными значениями тока I'' и ЭДС E'' в общем случае не равен 90° , так как даже в чисто индуктивной цепи $x''_q \neq x''_d$.

4.3. Упрощенные векторные диаграммы синхронной машины

Сложность точного вычисления начального сверхпереходного тока обусловлена различием x''_d и x''_q . Поэтому, ограничиваясь приближенным решением допускают, что $x''_d = x''_q = x''$.

Такое допущение близко к действительности для турбогенераторов и вполне удовлетворительно, т.е. ошибка не выходит за допустимые пределы для явнополюсных машин (гидрогенераторов).

Исходя из допущения, что сверхпереходные сопротивления синхронной машины по продольной и поперечной осям равны, значения ЭДС для любого режима работы можно легко найти из упрощенной векторной диаграммы (рис. 4.5):

$$E_q = \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + (U \sin \varphi + I x_d)^2}; \quad (4.21)$$

$$E' = \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + (U \sin \varphi + I x'_d)^2}; \quad (4.22)$$

$$E'' = \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + (U \sin \varphi + I x''_d)^2}, \quad (4.23)$$

где U, I , и $\cos \varphi$ - соответственно относительные величины напряжения, тока и коэффициент мощности до КЗ.



Рис. 4.5. Упрощенная векторная диаграмма синхронной машины.

Обычно угол δ (рис. 4.5) небольшой и это дает основание в практических расчетах ЭДС в переходном и сверхпереходном режимах приравнять их проекциям на направление вектора напряжения U_* , тогда значения ЭДС могут быть выражены формулами

$$E' = U_* + I_a x'_d \sin \varphi; \quad (4.24)$$

$$E'' = U_* + I_a x''_d \sin \varphi. \quad (4.25)$$

4.4. Переходный процесс в синхронной машине без демпферных обмоток

Переходный процесс будем рассматривать в предположении, что синхронная машина работает отдельно от других источников питания. Внешняя цепь статора при возникшем КЗ характеризуется некоторым постоянным сопротивлением, преимущественно индуктивным. При рассмотрении основное внимание уделим качественному характеру переходного процесса.

В нормальном режиме в роторе протекает постоянная составляющая тока обмотки возбуждения I_f . Эта составляющая наводит в обмотке статора периодически изменяющийся ток. При внезапном КЗ на увеличение магнитного потока продольной реакции статора Φ_{ad} , а соответственно и тока в статоре, ротор отвечает увеличением тока возбуждения на величину ΔI_f , который из-за потерь в роторе будет затухать с постоянной времени T . Этот ток будет наводить в обмотке статора периодически затухающий ток (рис. 4.6).

При внезапном КЗ в обмотке статора будет протекать ток состоящий из двух составляющих: периодической и аperiodической ($i_{n(t)} = i_{n(t)} + i_{ca(t)}$).

Определим периодическую составляющую тока КЗ

$$\begin{aligned} i'_{n(t)} &= i_{n\infty} + i'_{nca(t)}; \\ i_{n\infty} &= I_{n,m\infty} \cos \omega t = E_q \cos \omega t / (x_d + x_{en}); \\ i'_{nca} &= (I'_{n,m} - I_{n,m\infty}) e^{-t/T'} \cos \omega t = \left(\frac{E'}{x'_d + x_{en}} - \frac{E_q}{x_d + x_{en}} \right) \cdot e^{-t/T'} \cos \omega t; \\ i'_{n(t)} &= \left[\frac{E_q}{x_d + x_{en}} + \left(\frac{E'}{x'_d + x_{en}} - \frac{E_q}{x_d + x_{en}} \right) e^{-t/T'} \right] \cos \omega t, \end{aligned} \quad (4.26)$$

где T' — постоянная времени затухания свободного тока в обмотке возбуждения ($T' = T' \alpha' d / x_d$);

T_f — постоянная времени обмотки возбуждения.

Определим аperiodическую составляющую тока КЗ ($i_{ca(t)} = i_{ocv} e^{-t/T_a}$). Для определения начального значения аperiodической составляющей рассмотрим момент времени $t=0$

$$i_{ocv} = -i'_{n(0)} = -\frac{E'}{x'_d + x_{en}}, \text{ тогда } i_{ca(t)} = -\left(\frac{E'}{x'_d + x_{en}} \right) e^{-t/T_a}. \quad (4.27)$$

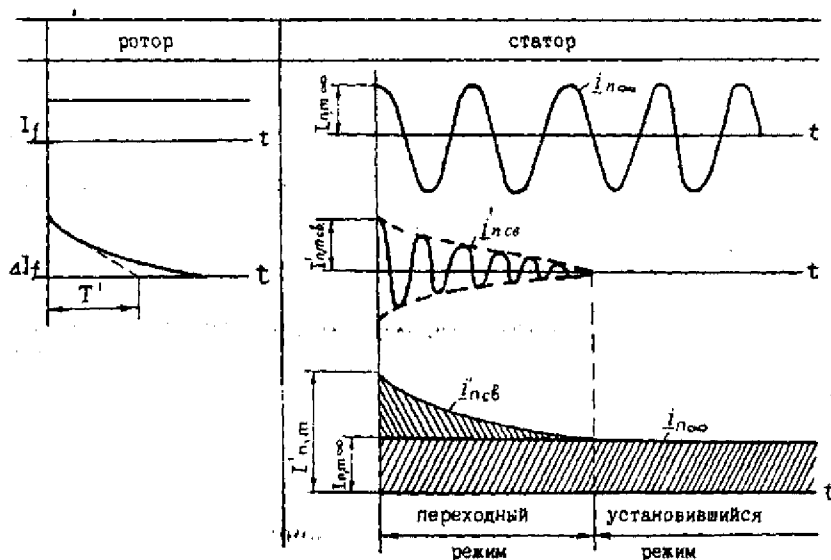


Рис. 4.6. К рассмотрению переходного процесса в синхронной машине без демпферных обмоток.

Запишем закон изменения полного тока

$$i(t) = \left[\frac{E_s}{x_d + x_{en}} + \left(\frac{E'}{x'_d + x_{en}} - \frac{E_s}{x_d + x_{en}} \right) e^{-t/T_a} \right] \cos \omega t - \frac{E'}{x'_d + x_{en}} e^{-t/T_a} \quad (4.28)$$

где T_a —постоянная времени затухания аperiodической составляющей ($T_a = x_2 / \omega R_{cm}$);
 x_2 —сопротивление обратной последовательности генератора;
 R_{cm} —активное сопротивление обмотки статора.

Из выражения (4.28) следует, что при внезапном КЗ в синхронной машине без демпферных обмоток имеется две аperiodические составляющие, одна из них изменяется по периодическому закону, вторая — по экспоненциальному закону.

Таким образом, переходный процесс состоит из двух режимов (рис. 4.6): переходного и установившегося. Переходный режим заканчивается тогда, когда затухнут свободные токи в обмотке возбуждения. Ток в обмотке ротора состоит из трех составляющих ($I_p = I_f + I_{nca} + I_{ca}$).

4.5. Переходный процесс в синхронной машине с демпферными обмотками

При внезапном КЗ на зажимах синхронной машины с демпферными обмотками, на увеличение магнитного потока продольной реакции статора Ψ_{ad} ротор отвечает изменением тока в двух обмотках: увеличением тока возбуждения на величину ΔI_f , который затухает с постоянной времени T^f и увеличением тока продольной демпферной обмотки на величину ΔI_{fd} , который затухает с постоянной времени T^{fd} . Эти токи будут наводить в обмотке статора периодически затухающие токи (рис. 4.7).

При внезапном КЗ в обмотке статора будет протекать ток состоящий из двух составляющих: периодической и аperiodической ($i_{st} = i_{st(p)} + i_{ca(st)}$).

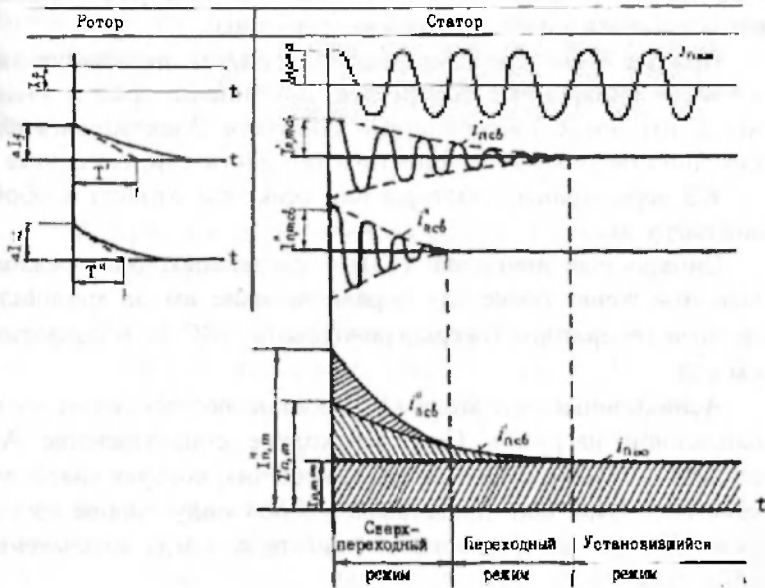


Рис. 4.7. К рассмотрению переходного процесса в синхронной машине с демпферными обмотками.

Таким образом, переходный процесс состоит из трех режимов (рис. 4.7) — сверхпереходного, переходного и установившегося. Ток в роторе состоит из пяти составляющих

$$(I_p = I_f + I_{n\text{ св. о. в.}} + I_{n\text{ св. д. о.}} + I'_{\text{св. о. в.}} + I_{\text{св. д. о.}}).$$

4.6. Учет и влияние нагрузки в начальный момент переходного процесса

Важным фактором в начальный момент внезапного нарушения режима является поведение подключенной нагрузки. Влияние нагрузки в начальный момент зависит от значения остаточного напряжения в месте ее присоединения и удаленности от точки КЗ. При $E_n > U$ нагрузка является дополнительным источником тока 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.

При расчетах сверхпереходного режима индивидуально учитываются синхронные генераторы и компенсаторы, а также мощные синхронные и асинхронные двигатели. Электродвигатели относительно небольшой мощности и все двигатели, связанные с точкой КЗ через трансформаторы или реакторы относят к обобщенной нагрузке.

Синхронные двигатели (СД) в сверхпереходном режиме учитываются точно также как и равновеликие им по мощности синхронные генераторы (сверхпереходными ЭДС E'' и сопротивлением x''_d).

Асинхронные двигатели (АД) составляют основную часть промышленной нагрузки. Сверхпереходное сопротивление АД может быть получено из его схемы замещения, которая аналогична схеме рис. 4.4,в. Оно представляет собой индуктивное сопротивление КЗ при заторможенном двигателе, когда скольжение $S=100\%$.

Практически относительное значение этого сопротивления определяют по пусковому току двигателя:

$$x_{*об} = I/I_{*пуск} \quad (4.32)$$

Сверхпереходную ЭДС АД находят из его векторной диаграммы для предшествующего режима (рис. 4.8)

$$E''_{об} = \sqrt{(U_* \cos \varphi)^2 + (U_* \sin \varphi - I_* x''_{об})^2} \quad (4.33)$$

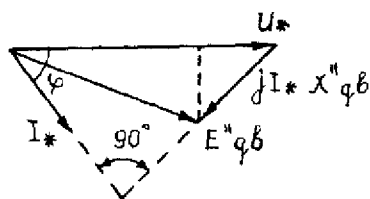


Рис. 4.8. Векторная диаграмма асинхронного двигателя.

Приближенно $E''_{об}$ можно найти как проекцию вектора этой ЭДС на вектор напряжения, т.е.

$$E''_{об} \approx U_* - I_* x''_{об} \sin \varphi \quad (4.34)$$

Обобщенная нагрузка в начальный момент КЗ приближенно характеризуется параметрами $E''_{об}=0,85$ и $x''_{об}=0,35$, выраженными в о.е. при номинальной мощности нагрузки и среднем номинальном напряжении той ступени, к которой она присоединена.

При определении ударного тока обычно учитывают затухание лишь апериодической составляющей тока КЗ, считая, что амплитуда сверхпереходного тока за полпериода практически сохраняет свое начальное значение. При этом в соответствии с §3.1 ударный ток определяется

$$i_y = \sqrt{2} k_y I'' \quad (4.35)$$

Ударный коэффициент, как было показано в гл.3, зависит от постоянной времени T_a или от отношения x/r . При отсутствии необходимых данных для оценки величины отношения x/r у отдельных элементов ЭЭС в практических расчетах можно рекомендовать следующие значения k_y : при КЗ на шинах генератора и СД- $k_y = 1,9$; в остальных случаях — $k_y = 1,8$; для АД — $k_y = 1,4 \div 1,6$; для обобщенной нагрузки — $k_y = 1$.

В связи с тем, что нагрузочные ветви характеризуются различными ударными коэффициентами, то при расчете токов КЗ в сложных схемах нежелательно применять метод эквивалентных ЭДС, т.е. заменять одним эквивалентным лучом генераторную и нагрузочную ветвь. Поэтому нагрузку, присоединенную непосредственно к точке КЗ необходимо выделять в отдельную ветвь, т.е.

$$i_y = \sqrt{2} k_{yг} I''_{г} + \sqrt{2} I''_{н}$$

где $I''_{г}$ — начальный сверхпереходный ток от генераторов;

$I''_{н}$ — начальный сверхпереходный ток от нагрузки;

$k_{yг}$ — ударный коэффициент генераторов.

В переходном режиме нагрузка учитывается ЭДС $E'_{*н} = 0$ и сопротивлением $x'_{*н} = 1,2$, приведенным к номинальной мощности нагрузки и среднему напряжению ступени, где она присоединена.

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 ЭДС 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 ЭДС и сопротивления синхронной машины?
6. Какой вид имеет упрощенная векторная диаграмма синхронной машины?
7. Что представляют собой сверхпереходные ЭДС и сопротивления АД и обобщенных нагрузок?
8. Почему нагрузку, присоединенную к точке КЗ, нельзя объединять с ветвями генераторов в один эквивалентный источник питания?

ТОКИ ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

5.1. Короткое замыкание в цепи, питающейся от генератора без автоматического регулирования возбуждения

В отличие от (3.1) в данном случае рассматриваются такие повреждения, при которых сопротивление цепи КЗ равно нулю (замыкание на выводах генератора) или одного порядка с сопротивлением генератора. При малой электрической удаленности места повреждения существенное влияние на переходный процесс оказывает АРВ генератора. Для упрощения рассмотрим сначала генератор с отключенным АРВ. В такой машине ток возбуждения i_f остается постоянным и обеспечивает неизменный магнитный поток возбуждения Φ_f .

На рис. 5.1 приведены изменения полного тока и его составляющих в одной фазе цепи, питаемой от генератора без АРВ.

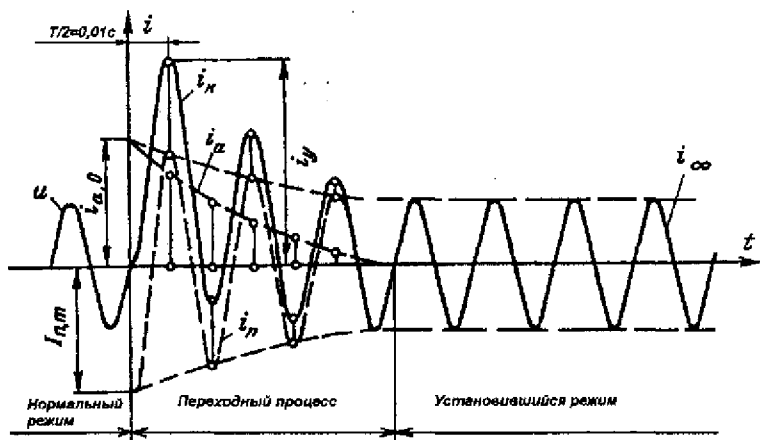


Рис. 5.1. Изменения полного тока и его составляющих одной из фаз генератора без АРВ при внезапном КЗ.

До начала КЗ (точка O) генератор работал в нормальном режиме, при котором в цепи протекал ток i_n , отстающий по фазе от

напряжения U на угол φ_n . В момент времени, когда ток нагрузки имел значение $i_n=0$, произошло КЗ, под влиянием которого наступил переходный процесс, сопровождающийся увеличением тока.

При КЗ на зажимах генератора и вблизи расположенных от него точек сети преобладающее значение имеет индуктивное сопротивление цепи, поэтому ее активным сопротивлением можно пренебречь.

При $\varphi_n \approx 90^\circ$ максимум аperiodической составляющей тока КЗ наблюдается при нулевой фазе включения ($\alpha=0$) и отсутствии предшествующего тока в цепи (рис.3.4). В этом случае значение i_{av} оказывается равным амплитуде периодической составляющей

$$i_{av}=i_{no}=I_{n,m}=\sqrt{2} I'' \quad (5.1)$$

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

$$i_{kt}=i_m+i_{av} \quad (5.2)$$

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 уменьшается. 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.4).

Последнее обстоятельство приводит к уменьшению ЭДС, наводимой в статоре, увеличению падения напряжения на зажимах генератора и изменению периодической составляющей тока КЗ.

На рис. 5.1 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 аperiodической составляющей тока КЗ. Кроме того, начальный ток КЗ больше установившегося значения тока ($I'' > I_\infty$).

Аperiodическая составляющая тока КЗ затухает, как было показано выше, по экспоненте с постоянной времени T_a . В рассматриваемом случае сопротивление цепи КЗ и генератора соиз-

меримы, поэтому при вычислении T_a необходимо учитывать соответствующие сопротивления обмотки статора ($T_a - x_{рез} / (\omega r_{рез})$).

Ввиду быстрого затухания аperiodической составляющей полный ток КЗ для времени $t \geq 0,15c$ 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_∞ .

Длительность переходного процесса КЗ для современных генераторов обычно составляет не более 3-5 с. Как и в случае питания цепи КЗ от шин бесконечной мощности, максимальное значение полного тока - ударный ток имеет место обычно через 0,01 с после начала процесса. При определении ударного тока условно считают, что к этому времени периодическая составляющая тока не претерпевает существенных изменений и равна, как и в начальный момент КЗ, $I_{n.m.}$. Учитывается лишь затухание аperiodической составляющей, максимальное значение которой принимается равным также $I_{n.m.}$.

5.2. Короткое замыкание в цепи, питающейся от 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 в различных точках 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 токов статора и демпферных обмоток. Однако этот процесс протекает сравнительно медленно, так что изменяются в основном только ЭДС генератора и обусловленная ею периодическая составляющая тока статора.

Повышение напряжения генератора благодаря АРВ начинается не в момент возникновения КЗ, а через некоторое время, необходимое для срабатывания АРВ. Этот временной интервал определяется временем понижения напряжения до значения, при котором вступает в действие АРВ, и собственным временем сра-

бывания 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. 5.2).

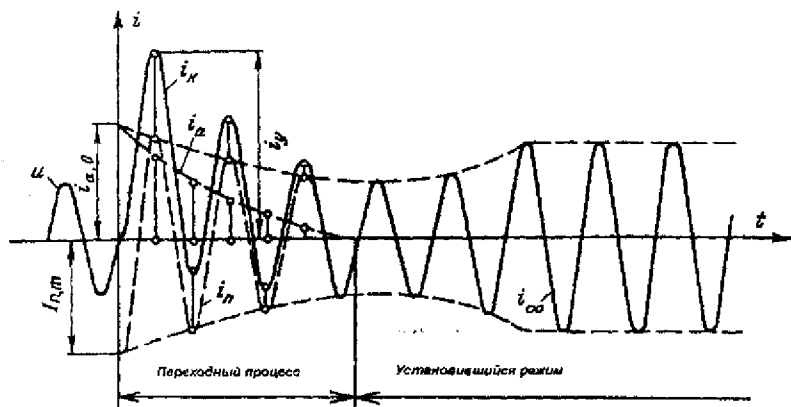


Рис. 5.2. Кривые тока и его составляющих при КЗ на выводах генератора с АРВ.

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 внешнем 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_n остается практически такой же, как при отсутствии АРВ, а периодическая составляющая i_p в зависимости от соотношения между начальным и установившимся токами КЗ при предельном токе возбуждения может затухать, возрастать или оставаться неизменной, как показано на рис. 5.3.

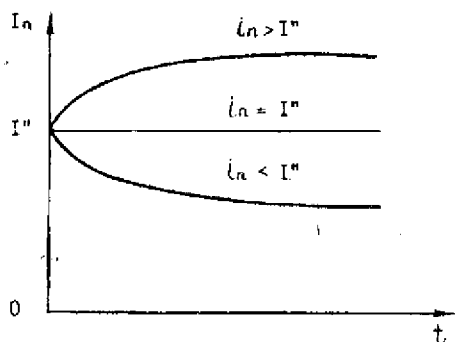


Рис. 5.3. Изменение периодической составляющей тока КЗ генератора с АРВ при постоянной времени обмотки возбуждения $T_f=0$ и предельном токе возбуждения.

Если под действием АРВ напряжение генератора достигает предельного значения (может принимать так же номинальное значение), то ток КЗ в дальнейшем остается неизменным.

Изменение действующих значений периодической составляющей тока статора и апериодических составляющих токов в обмотке возбуждения и демпферной обмотке ротора при КЗ на зажимах генератора показаны на рис. 5.4, а, б, 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 проявляется все в большей мере. При достижении предела (потолка) АРВ рассматриваемые токи в обмотках генератора принимают свои конечные установившиеся значения.

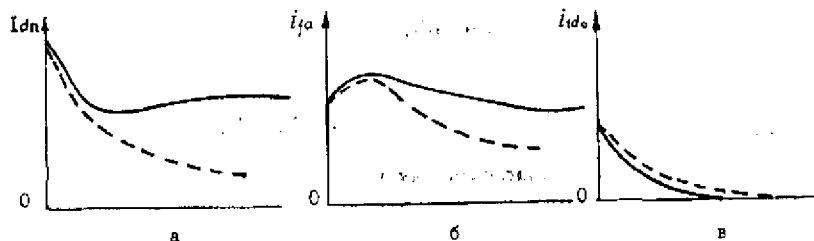


Рис. 5.4. Влияние АРВ на изменение действующих значений токов в обмотках генератора при КЗ на его зажимах.

5.3. 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. Вследствие этого уменьшается влияние КЗ в СЭС на работу генератора, а также предел изменения тока КЗ в течение переходного процесса, который зависит от удаленности точки КЗ относительно источника и будет тем меньше, чем дальше находится точка КЗ. При КЗ в удаленных точках СЭС периодическая составляющая тока во время переходного процесса в генераторе практически не изменяется.

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

Поэтому при КЗ в удаленной точке периодическая составляющая тока не изменяется и с первого же момента времени ток КЗ принимает свое установившееся значение $I''=I_{nt}=I_{\infty}$. Очевидно, что в данном случае характер изменения тока в цепи будет таким же, как и при питании от шин бесконечной мощности.

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 1кВ, 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 ЭДС и сопротивление, из равенства

$$E''/(x''_d+x_{вн})=E_q/(x_d+x_{вн}) . \quad (5.3)$$

Из (5.3) следует, что

$$x_{вн}=(E''x_d-E_qx''_d)/(E_q-E'') . \quad (5.4)$$

Если построить зависимость отношения I''/I_∞ от внешнего сопротивления $x_{вн}$ (рис.5.5), то легко установить, что для генератора без АРВ это отношение всегда больше единицы и только в пределе стремится к ней. При наличии АРВ отношение I''/I_∞ сначала уменьшается до минимального значения (0.6-0.8), а затем начинает возрастать, стремясь в пределе так же к единице.

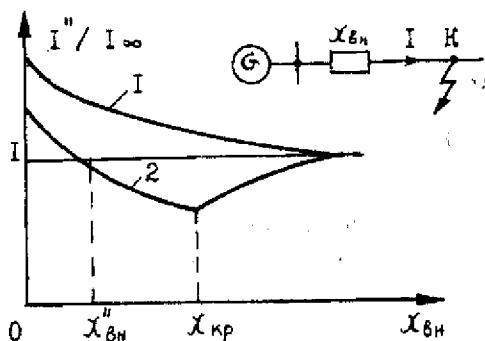


Рис. 5.5. Зависимость отношения I''/I_∞ от удаленности точки КЗ в СЭС без АРВ (кривая 1) и с АРВ (кривая 2).

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. 5.6 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 $x_{вн} = 0$, $x_{вн} = x_{кр}$ 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. 5.6 также следует, что при $x_{вн} > x_{кр}$ напряжение генератора достигает номинального значения через время $t_{кр}$ и далее остается неизменным. При этом ток КЗ для $t > t_{кр}$ также остается неизменным и определяется выражением

$$I_{нл} = U_{ном} / x_{вн} \quad (5.5)$$

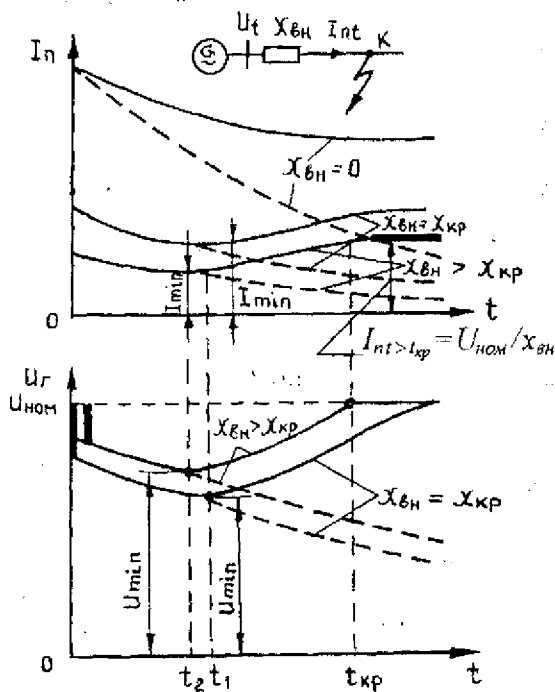


Рис. 5.6. Влияние АРВ на изменение тока и напряжения генератора при различных удаленностях точек КЗ.

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 $t=0$.

5.4. Начальный ток короткого замыкания

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

Поскольку в момент внезапного нарушения нормального режима потокосцепление ротора остается неизменным, наведенная в статоре ЭДС в начале переходного процесса также не меняется. Как показано в гл.4, сверхпереходные, переходные ЭДС и индуктивные сопротивления определяются

$$E_H'' = U_m + I_m x_d'' \sin \varphi; \quad (5.6)$$

$$x_d' = x_\sigma + x_{of} // x_{old} // x_{ad}; \quad (5.7)$$

$$E' = U_m + I_m x_d' \sin \varphi; \quad (5.8)$$

$$x_d = x_\sigma + x_{of} // x_{ad}. \quad (5.9)$$

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' , E'' в о.е. составляют: 0,2; 0,13 и 1,12 и 1,078 (турбогенераторы); 0,35; 0,25 и 1,15; 1,21 (гидрогенераторы).

Поскольку переходная и сверхпереходная ЭДС близки к единице, в приближенных практических расчетах при любых значениях нагрузки, предшествующей КЗ, часто принимают $E' = E'' = 1$. В тех случаях, когда нагрузку предварительного режима машины требуется учесть, для определения ЭДС используют выражения (5.6) и (5.8).

Начальный ток КЗ рассчитывают в следующем порядке: задаются базисными условиями (S_b, U_b); составляется схема замещения, в которой все элементы расчетной схемы приводят к выбранному базисным условиям (при расчете в о.е.) или к одной ступени напряжения (при расчете в именованных единицах); полученную схему замещения путем соответствующих преобразований приводят к простейшему виду и определяют результирующую эквивалентную ЭДС E_{Σ}'' (или E_{Σ}') и результирующее сопротивление x_{Σ}'' (или x_{Σ}') относительно точки КЗ (рис.2.2).

Искомое начальное значение периодической составляющей тока КЗ равно:

$$I_{no} = \frac{E''_{*o}}{X_{*\Sigma}} I_{\sigma}, \quad (5.10)$$

где I_{σ} - базисный ток той ступени напряжения, где находится точка КЗ.

При расчете в именованных единицах $I_{no} = E''_{*o} / x_{\Sigma}$.

Пример 5.1. Составить схему замещения для расчета трехфазного КЗ в точке К1 и определить сверхпереходный и ударный токи в системе, расчетная схема и исходные данные которой приведены на рис. 5.7.

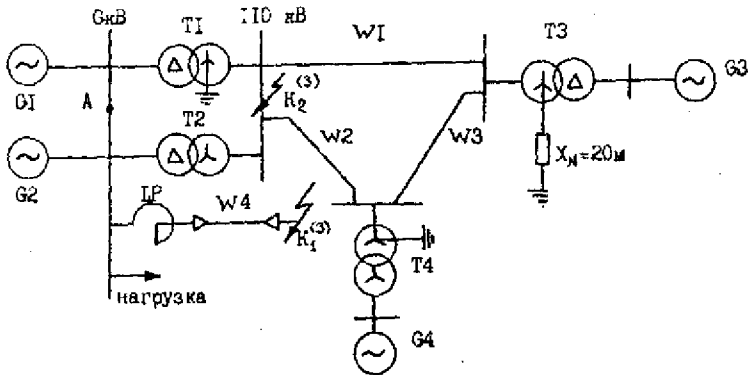


Рис. 5.7. Пример расчетной схемы для определения токов КЗ.

Параметры отдельных элементов:

Генераторы: турбо (ТГ), гидро (ГГ);

G1 (ТГ) - $x''_d = 0,125$; $P_n = 60$ Мвт ; $\cos\varphi = 0,8$;

G2 (ТГ) - $x''_d = 0,132$; $P_n = 100$ Мвт ; $\cos\varphi = 0,8$;

G3 (ТГ) - $x''_d = 0,19$; $P_n = 80$ Мвт ; $\cos\varphi = 0,8$;

G4 (ГГ) - $x''_d = 0,22$; $P_n = 100$ Мвт ; $\cos\varphi = 0,85$.

Трансформаторы:

T1 - $S_{ном} = 80$ МВА ; $U_k = 10\%$;

T2 - $S_{ном} = 125$ МВА ; $U_k = 11\%$;

T3 - $S_{ном} = 120$ МВА ; $U_k = 10,5\%$;

T4 - $S_{ном} = 125$ МВА ; $U_k = 12\%$.

Линии электропередач:

W1 - $x_0 = 0,35$ Ом/км ; $L = 80$ км ; W2 - $x_0 = 0,42$ Ом/км ;

$L = 70$ км ;

W3 - $x_0=0,4$ Ом/км; $L=60$ км; W4 - $x_0=0,08$ Ом/км;
 $L=5$ км.

Реактор:

LR - $x_p=6\%$; $I_{ном}=1000$ А; $U_{ном}=6$ кВ.

Нагрузка - $S_{ном}=35$ МВ·А.

Решение. Выполним расчет в о.е.

Схема замещения системы приведена на рис.5.8.

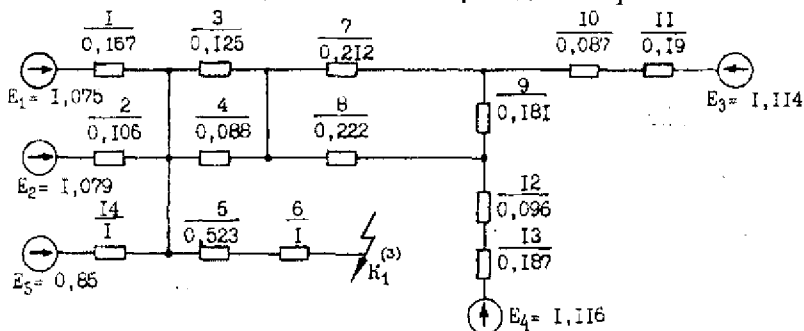


Рис. 5.8. Схема замещения. К примеру 5.1.

Для расчета параметров элементов схемы примем следующие базисные условия: $U_0=U_{cp}=6,3$ кВ; $S_0=100$ МВ·А; $I_0=S_0/(\sqrt{3} U_0)=9,16$ кА.

Определяем параметры схемы замещения.

Сопротивления генераторов:

$$G1 - x_{*1} = x_d'' \frac{S_0}{S_{ном}} = 0,125 \frac{100 \cdot 0,8}{60} = 0,167,$$

в дальнейшем для упрощения обозначений индекс <*> опускаем, подразумевая, что все полученные значения сопротивлений и ЭДС даются в о.е. и приведены к базисным условиям;

$$G2 - x_2 = 0,132 \frac{100 \cdot 0,8}{100} = 0,106; \quad G3 - x_{11} = 0,19 \frac{100 \cdot 0,8}{80} = 0,19;$$

$$G4 - x_{13} = 0,22 \frac{100 \cdot 0,85}{100} = 0,187.$$

Определим ЭДС генераторов:

$$G1 - E_1 = U + I \cdot x_d'' \sin \varphi = 1 + 1 \cdot 0,125 \cdot 0,6 = 1,075,$$

значения параметров в о.е. взяты в предположении, что генератор G1 до КЗ работал с номинальными параметрами;

$$G2 - E_2 = 1 + 1 \cdot 0,132 \cdot 0,6 = 1,079;$$

$$G3 - E_3 = 1 + 1 \cdot 0,19 \cdot 0,6 = 1,114;$$

$$G4 - E_4 = 1 + 1 \cdot 0,22 \cdot 0,527 = 1,116.$$

Определим ЭДС и сопротивление нагрузки:

$$E_5 = E_n^* = 0,85; x_{14} = x_{нагр} \frac{S_6}{S_{ном}} = 0,35 \frac{100}{35} = 1.$$

Определим сопротивления пассивных элементов схемы.

Трансформаторы:

$$T1 - x_3 = \frac{U_{\kappa} \%}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{ном}} = \frac{10}{100} \cdot \frac{100}{80} = 0,125;$$

$$T2 - x_4 = \frac{11}{100} \cdot \frac{100}{125} = 0,088; \quad T3 - x_{10} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{125} = 0,087;$$

$$T4 - x_{12} = \frac{12}{100} \cdot \frac{100}{125} = 0,096.$$

Линии:

$$W1 - x_7 = x_0 l \frac{S_6}{U_{cp}^2} = 0,35 \cdot 80 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,212;$$

$$W2 - x_8 = 0,42 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,222; \quad W3 - x_9 = 0,4 \cdot 60 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,181;$$

$$W4 - x_6 = 0,08 \cdot \frac{100}{6,3^2} = 1.$$

Реактор:

$$LR - x_5 = \frac{x_p \%}{100} \cdot \frac{I_6}{I_{ном}} \cdot \frac{U_{ном}}{U_{cp}} = \frac{6}{100} \cdot \frac{9,16}{1} \cdot \frac{6}{6,3} = 0,523.$$

Преобразуем схему к простейшему виду, используя известные методы для линейных электрических цепей:

$$x_{15} = x_{10} + x_{11} = 0,087 + 0,19 = 0,277;$$

$$x_{16} = x_{12} + x_{13} = 0,096 + 0,187 = 0,283;$$

$$x_{17} = x_5 + x_6 = 0,523 + 1 = 1,523;$$

$$x_{18} = \frac{x_3 \cdot x_4}{x_3 + x_4} = \frac{0,125 \cdot 0,088}{0,125 + 0,088} = 0,052.$$

Заменим треугольник с сопротивлениями 7-9 звездой с сопротивлениями 19-21:

$$x_{19} = \frac{x_7 \cdot x_8}{x_7 + x_8 + x_9} = \frac{0,212 \cdot 0,222}{0,212 + 0,222 + 0,181} = 0,076;$$

$$x_{20} = \frac{x_7 \cdot x_9}{x_7 + x_8 + x_9} = \frac{0,212 \cdot 0,181}{0,212 + 0,222 + 0,181} = 0,062;$$

$$x_{21} = \frac{x_8 \cdot x_9}{x_7 + x_8 + x_9} = \frac{0,222 \cdot 0,181}{0,212 + 0,222 + 0,181} = 0,065.$$

Заменим ветви с E_1 , E_2 и E_5 , присоединенные к одному узлу, одной эквивалентной ЭДС E_6 и сопротивлением x_{22} :

$$E_6 = \frac{E_1 \cdot y_1 + E_2 \cdot y_2 + E_5 \cdot y_{14}}{y_1 + y_2 + y_{14}} = \frac{17,466}{16,422} = 1,083;$$

$$x_{22} = \frac{1}{y_1 + y_2 + y_{14}} = \frac{1}{16,422} = 0,061.$$

После этих преобразований получим схему замещения, приведенную на рис. 5.9.

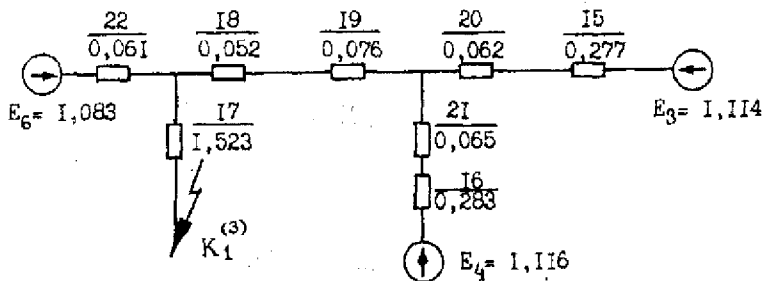


Рис. 5.9. Схема замещения для точки K_1 . К примеру 5.1.

Сделаем дальнейшие преобразования:

$$x_{23} = x_{20} + x_{15} = 0,062 + 0,277 = 0,339;$$

$$x_{24} = x_{21} + x_{16} = 0,065 + 0,283 = 0,348.$$

Лучи с ЭДС E_3 и E_4 заменим эквивалентным с ЭДС E_7 и сопротивлением x_{25} :

$$E_7 = \frac{E_3 \cdot x_{24} + E_4 \cdot x_{23}}{x_{24} + x_{23}} = \frac{1,114 \cdot 0,348 + 1,116 \cdot 0,339}{0,348 + 0,339} = 1,115;$$

$$x_{25} = \frac{x_{24} \cdot x_{23}}{x_{24} + x_{23}} = \frac{0,348 \cdot 0,339}{0,348 + 0,339} = 0,172;$$

$$x_{26} = x_{18} + x_{19} + x_{25} = 0,052 + 0,076 + 0,172 = 0,3.$$

Эквивалентрируем лучи с ЭДС E_6 и E_7 :

$$E_8 = \frac{E_6 \cdot x_{26} + E_7 \cdot x_{22}}{x_{26} + x_{22}} = 1,07;$$

$$x_{27} = \frac{x_{26} \cdot x_{22}}{x_{26} + x_{22}} + x_{17} = \frac{0,3 \cdot 0,061}{0,3 + 0,061} + 1,523 = 1,5737.$$

Получим схему рис. 5.10

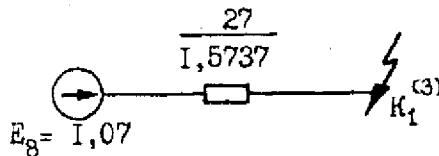


Рис. 5.10. Результирующая схема замещения.

По результирующим ЭДС E_8 и сопротивлением x_{27} относительно места повреждения определяем периодическую составляющую тока КЗ в начальный момент времени:

$$I''_{*kl}^{(3)} = E_8 / x_{27} = 1,07 / 1,5737 = 0,68.$$

Действительное значение периодической составляющей тока КЗ определяется

$$I''_{kl}^{(3)} = I''_{*kl}^{(3)} \cdot I_{\sigma} = 0,68 \cdot 9,16 = 6,23 \text{ кА}.$$

Определим ударный ток

$$i_y = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I''_{kl}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 6,23 = 15,856 \text{ кА}.$$

5.5. Установившийся режим короткого замыкания

Установившимся режимом называют такую стадию переходного процесса, при которой все возникшие в начальный момент КЗ свободные токи в синхронной машине затухли и изменение напряжения на ее зажимах под действием АРВ прекращено. Обычно считают, что этот режим наступает через 3-5 с после возникновения КЗ. При этом предполагается, что скорость вращения машины остается неизменной (синхронной). Такое представление

установившегося режима является условным, так как такой режим в современной ЭЭС фактически не имеет места благодаря наличию быстродействующих релейных защит.

В настоящее время этот режим не является характерным, однако знакомство с ним очень полезно, так как здесь можно получить в наглядной форме ряд практически важных представлений и соотношений. Поэтому необходимо уметь определить ток КЗ для этого режима.

Параметры короткозамкнутой цепи при установившемся режиме можно определить на основании характеристик холостого хода (х.х.х.) 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 $I_{\text{нпр}}$.

1) Х.Х.Х. синхронной машины (рис. 5.11) представляет собой зависимость $E_* = \varphi(I_{*f})$. Она построена в о.е., причем за единицу ЭДС принято номинальное напряжение синхронной машины при Х.Х., т.е. $U_{*n} = 1$, а за единицу тока возбуждения принят ток возбуждения, при котором напряжение синхронной машины на Х.Х. равно номинальному.

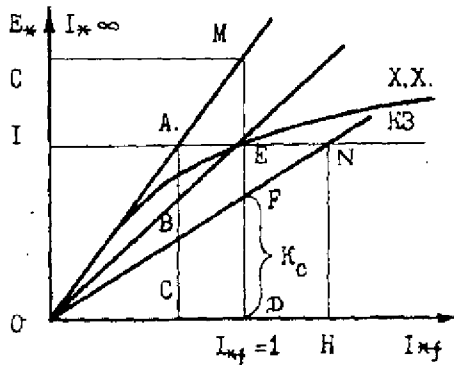


Рис. 5.11. Характеристики холостого хода и короткого замыкания.

Для ненасыщенной машины связь между ЭДС E_* и током возбуждения прямолинейная и выражается зависимостью

$$E_* = c I_{*f}; \quad c = MD/ED,$$

где c - коэффициент пропорциональности, численно равный ЭДС в о.е. ненасыщенной машины при токе возбуждения, равном единице.

Среднее значение c для ТГ-1,2, а для ГГ-1,06.

2) Вместо x_d может быть задано отношение короткого замыкания κ_c , которое представляет собой относительный установившийся ток КЗ I_{∞} когда машина замкнута накоротко на выводах, а ток возбуждения равен единице. Величина κ_c определяет ординату второй точки F, через которую проходит прямая OF, представляющая характеристику КЗ машины (рис. 5.11)

$$\kappa_c = I_{\infty}(I_{\psi} = 1) / I_{ном}. \quad (5.11)$$

Среднее значение κ_c для ТГ равно 0,7, для ГГ - 1,1.

Связь между κ_c и x_d вытекает из условия КЗ на зажимах машины, а также из подобия $\triangle OBC$ и $\triangle ONH$, т.е.

$$x_d = c / \kappa_c. \quad (5.12)$$

Реактивность x_d складывается из сопротивления рассеяния фазы статора x_{σ} и сопротивления продольной реакции статора x_{ad} . Учитывая небольшое насыщение машины и приближенность расчета установившегося режима КЗ, заменим действительную Х.Х.Х. прямой, проходящей через начало координат и точку E с координатами (1,1) (прямая OE на рис. 5.11). При таком спрямлении Х.Х.Х. имеем

$$E_{*} = I_{\psi}; \quad x_d = 1 / \kappa_c. \quad (5.13)$$

3) Индуктивное сопротивление рассеяния x_{σ} зависит от конструкции синхронной машины. Для ТГ среднее значение x_{σ} достигает 0,1-0,15, а для ГГ 0,15-0,25.

4) Для машин, снабженных АРВ, характерным параметром является предельный ток возбуждения, - это наибольшее значение тока возбуждения при форсировке. Величина его зависит от типа системы возбуждения и находится в пределах $I_{\psi np} = 3-5$, что примерно в 2 раза больше тока возбуждения машин при номинальной нагрузке.

Если ток возбуждения не задан, то его относительную величину можно определить из упрощенной векторной диаграммы синхронной машины (см. гл.4) по выражению

$$I_{*j} = E_{*q} = \sqrt{(U_{*n} \cos \varphi)^2 + (U_{*n} \sin \varphi + I_{*n} x_d)^2}. \quad (5.14)$$

Влияние и учет нагрузки. При установившемся режиме КЗ влияние нагрузки проявляется, с одной стороны, в том, что предельно нагруженный генератор имеет большую ЭДС, чем генератор, работающий на х.х., и, с другой, в том, что, оставаясь присоединенной к сети, она может существенно изменить величины и распределения токов в схеме.

Из простейшей схемы рис. 5.12,а видно, что нагрузка шунтирует поврежденную ветвь и тем самым уменьшает внешнее сопротивление цепи статора. Это приводит к увеличению тока генератора, уменьшению его напряжения и соответственно уменьшению тока в месте КЗ. С увеличением удаленности КЗ влияние нагрузки сказывается сильнее. А нагрузка, присоединенная непосредственно к точке КЗ, в установившемся режиме не играет никакой роли.

Промышленная нагрузка состоит преимущественно из асинхронных двигателей, сопротивление которых, как известно, резко зависит от скольжения; последнее в свою очередь определяется напряжением у двигателя в рассматриваемом аварийном режиме. Эти зависимости нелинейны, что сильно усложняет достаточно точный учет нагрузки.

Поэтому для упрощения практических расчетов нагрузку учитывают приближенно, характеризуя ее некоторым постоянным сопротивлением.

На рис. 5.12,б генератор с ЭДС E_q и реактивностью x_d работает на чисто индуктивную цепь, реактивность которой $x_{вн}$. Для его напряжения можно написать, с одной стороны

$$U = E_q - Ix_d, \quad (5.15)$$

а с другой,

$$U = Ix_{вн}. \quad (5.16)$$

Сопротивление нагрузки можно определить из совместного решения (5.15) и (5.16), положив $x_{вн} = x_{нагр}$ и $U = U_{ном}$, что приводит к выражению

$$x_{нагр} = x_d U_{ном} / (E_q - U_{ном}). \quad (5.17)$$

Как видно, величина $x_{нагр}$ определяется параметрами генератора, причем влияние коэффициента мощности нагрузки, сказывается в скрытом виде - через значение E_q . При средних значениях

параметров типовых генераторов, работающих с полной нагрузкой при $\cos\varphi=0,8$, относительная величина сопротивления нагрузки после округления результатов подсчета по (5.17) составляет $x_{ндгр}=1,2$. Эта величина отнесена к полной мощности нагрузки и среднему напряжению ступени, где присоединена данная нагрузка.

ЭДС нагрузки в установившемся режиме трехфазного КЗ принимается равной нулю.

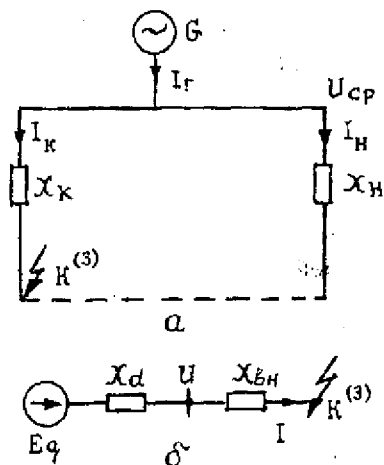


Рис. 5.12. Влияние и учет нагрузки при трехфазном КЗ.

Аналитический расчет при отсутствии в схеме генераторов с АРВ. Когда генераторы не имеют АРВ, расчет установившегося режима трехфазного КЗ при принятых выше допущениях по существу сводится к определению токов и напряжений в линейной схеме. Порядок расчета следующий:

1. Задаемся базисными условиями ($S_б$ и $U_б$).
2. Составляется схема замещения, в которую активные элементы (генераторы вводятся ЭДС E_q и сопротивлением $x_d S_б/S_{ном}$, нагрузка - $E_H=0$ и $x_H=1,2 S_б/S_{ном}$), а пассивные элементы (трансформаторы, автотрансформаторы, воздушные и кабельные линии, реакторы) только своими сопротивлениями.
3. Схема замещения преобразуется к простейшему виду (рис.2.2), т.е. все сопротивления схемы замещения заменяются одним результирующим x_{Σ} с приложенной за ним эквивалентной ЭДС $E_{экс}$.

4. Пользуясь законом Ома, по результирующим ЭДС и сопротивлению определяется установившийся ток $I_{\infty}^{(3)} = E_{\text{экв}} I_0 / x_{\Sigma}$

Аналитический расчет при наличии в схеме генераторов с АРВ. Снижение напряжения при КЗ приводит в действие устройство АРВ, которое стремится поддерживать напряжение на выводах генераторов на уровне номинального путем увеличения тока возбуждения. Поэтому можно заранее предвидеть, что токи и напряжения при этих условиях всегда больше, чем при отсутствии АРВ. Однако рост тока возбуждения у генераторов ограничен $I_{\text{эфр}}$.

Следовательно, для каждого генератора можно установить наименьшую величину внешней реактивности, при КЗ за которой генератор при предельном возбуждении обеспечивает нормальное напряжение на своих выводах. Такую реактивность называют критической $x_{\text{кр}}$, которая может быть определена

$$x_{\text{кр}} = x_d U_{\text{н}} / (E_{\text{эфр}} - U_{\text{н}}); \quad (5.18)$$

и связанный с ней ток

$$I_{\text{кр}} = U_{\text{н}} / x_{\text{кр}}. \quad (5.19)$$

Относительное значение $E_{\text{эфр}} = I_{\text{эфр}}$ известно по каталожным данным системы возбуждения генераторов.

Среднее значение $x_{\text{кр}}$ для типовых генераторов при номинальных условиях составляет 0,5, а критического тока - 2.

В установившемся режиме при трехфазном КЗ генератор, имеющий АРВ, может оказаться в одном из двух режимов - предельного возбуждения или нормального напряжения. Зная $x_{\text{кр}}$, достаточно сопоставить с ней внешнюю реактивность $x_{\text{вн}}$, чтобы однозначно решить вопрос, в каком режиме работает генератор.

Внешняя реактивность представляет собой суммарное сопротивление всех элементов сети, по которым протекает ток, от выводов генератора до точки КЗ.

При сравнении $x_{\text{вн}}$ и $x_{\text{кр}}$ следует помнить, что они должны быть приведены к общим базисным условиям.

В табл. 5.1 сведены все соотношения, характеризующие указанные выше режимы работы генераторов при КЗ.

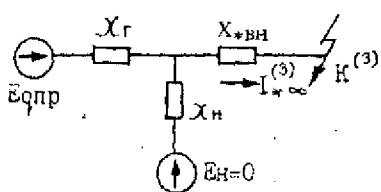
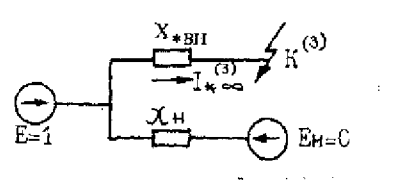
Порядок расчета следующий:

1. Составляется схема замещения, в которую генератор можно не вводить.

2. Определяются $x_{*вн}$ и $x_{*кр}$.
3. Сравнивая между собой реактивности, определяют режим работы генератора.
4. В режиме предельного возбуждения генератор вводится в схему замещения параметрами $E_{*гпр}$ и $x_g = x_d S_{гг}/S_{н0,н1}$.
5. В режиме нормального напряжения генератор вводится в схему замещения $E=1$ и $x_g=0$.
6. Определяется $I^{(3)}_{*∞}$ по выражениям, приведенным в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Соотношения, характеризующие режимы генераторов с АРВ

Режим предельного возбуждения	Режим нормального напряжения
$x_{*вн} < x_{*кр}; I_{*г} = I_{*гпр}; U_* < U_{*н}$	$x_{*вн} > x_{*кр}; I_{*г} < I_{*гпр}; U_* = U_{*н}$
	
$I^{(3)}_{*∞} = E_g / x_{Σ}$	$I^{(3)}_{*∞} = 1 / x_{*вн}$

Расчет установившегося режима в сложных схемах.

В схеме с несколькими генераторами, ток от которых протекает по общим для них ветвям, понятие внешней реактивности $x_{*вн}$ для каждого генератора с АРВ в отдельности теряет смысл. Поэтому здесь нельзя однозначно определить возможный режим работы каждого генератора относительно точки КЗ.

В этих случаях расчет ведется путем последовательного приближения, задаваясь для каждого генератора в зависимости от его удаленности от точки КЗ режимом предельного возбуждения или режимом нормального напряжения. В первом случае генератор вводится в схему замещения параметрами $E_{гпр}$ и x_d , во втором - $E=1$ и $x_d=0$. Затем производится расчет установившегося режима.

После этого делается проверка выбранных режимов, которая заключается в сопоставлении найденных для этих генераторов токов с их критическими токами. Для режима предельного возбуждения должно быть $I_f > I_{кр}$, а для режима нормального напряжения - $I_f < I_{кр}$.

Если в результате проверки оказалось, что режимы некоторых генераторов выбраны неверно, то после их корректировки нужно сделать повторный расчет с последующей проверкой, и так до тех пор пока для каждого из генераторов, полученные в результате расчетов и принятые режимы не совпадут.

Пример 5.2. Определить величину установившегося тока при трехфазном КЗ в точке K_2 (рис. 5.7). Произвести расчет аналитически для двух случаев: генераторы в схеме без АРВ; генераторы снабжены АРВ.

Решение.

а) Генераторы в схеме без АРВ

Примем базисные условия: $S_6=100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $U_6=115 \text{ кВ}$;

$$I_6 = S_6 / (\sqrt{3} U_6) = 0,502 \text{ кА}.$$

Составим схему замещения (рис.5.13) и определим параметры элементов схемы.

Пусть в системе (рис. 5.7) все генераторы до КЗ в точке K_2 работали с номинальными параметрами. В этом случае для расчета установившегося режима КЗ генераторы будут введены в схему замещения следующими значениями ЭДС и сопротивлений:

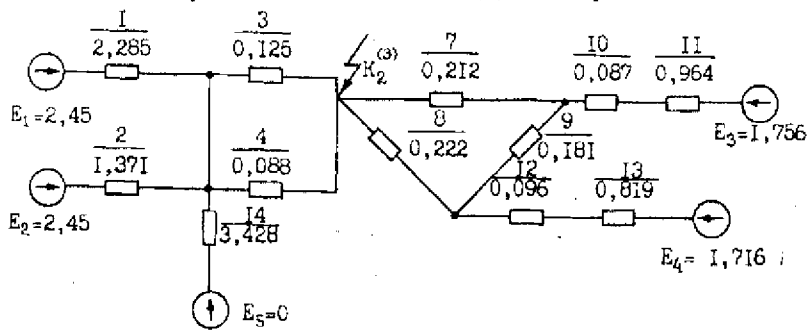


Рис. 5.13. Схема замещения. К примеру 5.2.

$$G1 \text{ и } G2: E_1 = E_2 = \sqrt{(U_0 \cos \varphi)^2 + (U_0 \sin \varphi + I_{\text{н}} \frac{c}{\kappa_c})^2} =$$

$$= \sqrt{(1 \cdot 0,8)^2 + (1 \cdot 0,6 + 1 \cdot \frac{1,2}{0,7})^2} = 2,45;$$

$$x_1 = x_d S_d / S_{\text{ном}} = \frac{5,4 \cdot c}{\kappa_c} \cdot \frac{S_d}{S_{\text{ном}}} = \frac{1,2}{0,7} \cdot \frac{100 \cdot 0,8}{60} = 2,285;$$

$$x_2 = \frac{1,2}{0,7} \cdot \frac{100 \cdot 0,8}{100} = 1,371;$$

$$G3: E_3 = \sqrt{(1 \cdot 0,8)^2 + (1 \cdot 0,6 + 1 \cdot \frac{1,06}{1,1})^2} = 1,756;$$

$$x_{11} = \frac{1,06}{1,1} \cdot \frac{100 \cdot 0,8}{80} = 0,964;$$

$$G4: E_4 = \sqrt{(1 \cdot 0,85)^2 + (1 \cdot 0,527 + 1 \cdot \frac{1,06}{1,1})^2} = 1,716;$$

$$x_{13} = \frac{1,06}{1,1} \cdot \frac{100 \cdot 0,85}{100} = 0,819;$$

Нагрузка: $E_5 = 0$; $x_{14} = x_{\text{н}} S_d / S_{\text{ном}} = 1,2 \cdot 100 / 35 = 3,428$.

Сопротивления пассивных элементов (линии, трансформаторы) останутся такими же, что и в схеме (рис. 5.8) при решении примера 5.1.

Используя методы преобразования схем, получим результирующую схему рис. 5.14.

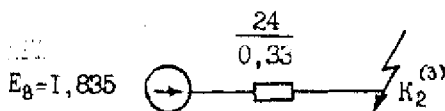


Рис. 5.14. Результирующая схема замещения.

По результирующим E_8 и x_{24} относительно места повреждения определяем относительное значение установившегося тока трехфазного КЗ:

$$I_{\infty}^{(3)} = E_8 / x_{24} = 1,835 / 0,33 = 5,56.$$

Для получения значения тока в кА необходимо полученный результат умножить на базисный ток

$$I_{\infty}^{(3)} = I_{\infty}^{(3)} \cdot I_G = 5,56 \cdot 0,502 = 2,79 \text{ кА.}$$

б) Генераторы в схеме снабжены АРВ

Для предварительного задания режимов работы генераторов определим внешние и критические реактивности, приведенные к базисным условиям, а также критические токи для каждого из них.

Для генераторов G1 и G2 при КЗ в точке K₂ (рис. 5.13):

$$x_{*вн} = x_{28} = \frac{1}{y_3 + y_4 + y_{14}} = \frac{1}{\frac{1}{0,125} + \frac{1}{0,088} + \frac{1}{3,428}} = 0,051;$$

$$x_{*крG1} = x_{*кр} \frac{S_6}{S_{ном}} = 0,5 \frac{100 \cdot 0,8}{60} = 0,66;$$

$$I_{*крG1} = \frac{U_s}{x_{*крG1}} = \frac{1}{0,66} = 1,5;$$

$$x_{*крG2} = 0,5 \frac{100 \cdot 0,8}{100} = 0,4; \quad I_{*крG2} = \frac{1}{0,4} = 2,5.$$

Чтобы определить $x_{*вн}$ для генераторов G3 и G4, правую часть схемы (рис. 5.13) относительно точки K₂ преобразуем к виду, представленному на рис.5.15.

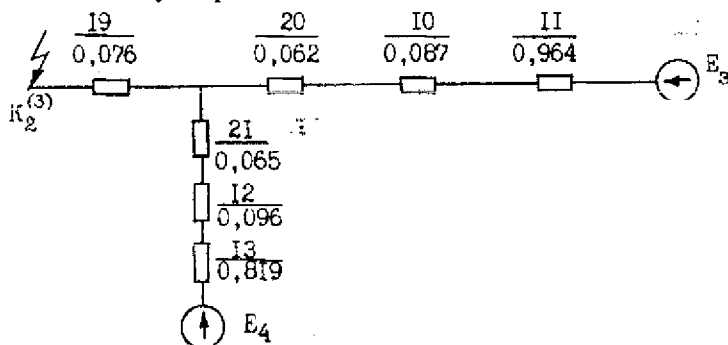


Рис. 5.15. Схема замещения к определению внешних реактивностей G3 и G4.

Значения сопротивлений 19-21 взяты из рис. 5.9.

Для генератора G3:

$$x_{*вн} = x_{29} = x_{10} + x_{20} + x_{19} = 0,087 + 0,062 + 0,076 = 0,225;$$

$$x_{*крG3} = 0,5 \frac{100 \cdot 0,8}{80} = 0,5; \quad I_{*крG3} = \frac{1}{0,5} = 2.$$

Для генератора G4:

$$x_{*нн} = x_{30} = x_{12} + x_{21} + x_{19} = 0,096 + 0,065 + 0,076 = 0,237;$$

$$x_{*крG4} = 0,5 \frac{100 \cdot 0,85}{100} = 0,425; \quad I_{*крG4} = \frac{1}{0,425} = 2,35.$$

Так как $x_{*нн} < x_{*кр}$ для всех генераторов, то будем считать, что они работают в режиме предельного возбуждения. Примем предельные значения тока возбуждения для G1 и G2 равным 3, а для G3 и G4 - равным 4. В этом случае генераторы вводятся в схему замещения следующими параметрами:

$$E_1 = E_2 = I_{*нн} = 3; \quad x_1 = 2,285; \quad x_2 = 1,371;$$

$$E_3 = E_4 = I_{*нн} = 4; \quad x_{11} = 0,964; \quad x_{13} = 0,819.$$

Значения сопротивлений взяты из схемы рис. 5.13.

Схема замещения после преобразований примет вид рис.

5.16.

Предположим, что генераторы G1 и G2 работают в режиме нормального напряжения. Тогда их суммарный ток

$$I_* = \frac{U_*}{x_{28}} = \frac{1}{0,051} = 19,6.$$

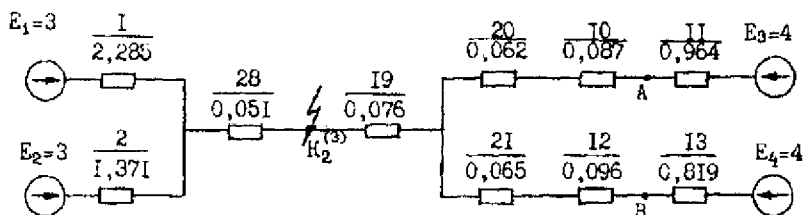


Рис. 5.16. Схема замещения для генераторов, работающих в режиме предельного возбуждения.

и каждого генератора в отдельности соответственно

$$I_{*G1} = I_* \frac{x_2}{x_1 + x_2} = 19,6 \frac{1,371}{2,285 + 1,371} = 7,35;$$

$$I_{*G2} = I_* \frac{x_1}{x_1 + x_2} = 19,6 \frac{2,285}{2,285 + 1,371} = 12,25$$

Аналогичным образом предположим, что генераторы $G3$ и $G4$ работают в режиме нормального напряжения. Тогда напряжения в точках А и В (рис. 5.16) равны номинальным и в о.е. равны единице, т.е. $U_* = 1$. Учитывая, что $x_{31} = x_{20} + x_{10} = 0,062 + 0,087 = 0,149$ и $x_{32} = x_{21} + x_{12} = 0,065 + 0,096 = 0,161$, то получим суммарный ток от этих генераторов

$$I_* = \frac{U_*}{x_{19} + \frac{x_{31} \cdot x_{32}}{x_{31} + x_{32}}} = \frac{1}{0,076 + \frac{0,149 \cdot 0,161}{0,149 + 0,161}} = 6,52,$$

а от каждого в отдельности

$$I_{*G3} = I_* \frac{x_{32}}{x_{31} + x_{32}} = 6,52 \frac{0,161}{0,149 + 0,161} = 3,386;$$

$$I_{*G4} = I_* \frac{x_{31}}{x_{31} + x_{32}} = 6,52 \frac{0,149}{0,149 + 0,161} = 3,134.$$

Так как токи всех генераторов больше критических, то это говорит о том, что все генераторы работают в режиме предельного возбуждения.

В этом случае, преобразовывая схему (рис. 5.16), получим результирующую схему рис. 5.17.

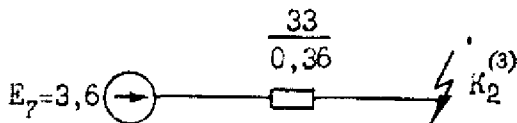


Рис. 5.17. Результирующая схема замещения.

Установившийся ток трехфазного КЗ в точке K_2

$$I_{\infty}^{(3)} = E_7 / x_{33} = 3,6 / 0,36 = 10; \quad I_{\infty}^{(3)} = I_{\infty}^{(3)} \cdot I_0 = 10 \cdot 0,502 = 5,02 \text{ кА}.$$

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. Как изменяется полный ток и его составляющие при КЗ в удаленных точках СЭС ?
4. Какой режим называется установившимся ?
5. Влияние нагрузки на установившийся режим и каким образом она учитывается ?
6. Как определить ток в установившемся режиме ?
7. Как проявляется действие АРВ в установившемся режиме КЗ и какие режимы возможны у генераторов с АРВ ?
8. Какие особенности определения установившегося тока в сложных схемах ?

ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТОКОВ ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Выше были рассмотрены аналитические способы определения токов КЗ. При этом сравнительно просто находятся начальные значения переходного, сверхпереходного тока, ударный ток и установившийся ток КЗ. Все промежуточные значения токов КЗ определяются довольно громоздко. Поэтому на практике для вычисления токов КЗ в произвольный момент времени используют приближенные методы расчета, позволяющие определить ток КЗ весьма просто и с достаточной точностью.

Практические методы позволяют с приемлемой точностью (ошибка не превышает 10-15%) вычислить значение тока в аварийной ветви в произвольный момент переходного процесса; для прочих ветвей схемы ошибка вычислений оказывается обычно большей, причем она растет по мере удаления от точки КЗ и увеличения длительности КЗ.

Применение специальных расчетных моделей (столов), на которых искомые величины можно получить в определенном масштабе по показаниям измерительных приборов, значительно упрощает и ускоряет выполнение необходимых вычислений, особенно в сложных схемах. При этом точность получаемых результатов определяется не только точностью самой модели, но и точностью метода, использованного на этой модели. Сказанное относится и к расчетам, выполняемым с помощью вычислительных машин, которые в последнее время находят широкое применение.

6.1. 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 ЭЭС 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

$$I_{*ит}^{(3)} = f(x_{*расч}) \quad \text{при} \quad t = \text{var}. \quad (6.1)$$

Они были построены 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 ЭЭС заменяются расчетной схемой с типовым генератором (рис. 6.1,а);

типовой генератор до и в течение КЗ работает с номинальной нагрузкой $z_{*н} = 0,8 + j0,6$, которая условно относится к его зажимам; это позволяет исключить нагрузку из схемы замещения цепи КЗ и не вводить ее в $x_{*расч}$ (рис. 6.1,б), считая что

$$x_{*расч} = x''_{*нд} + x_{*жк}; \quad (6.2)$$

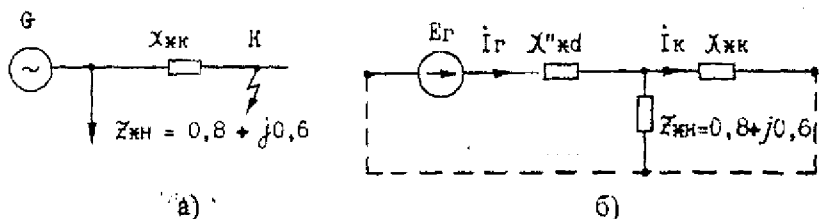


Рис. 6.1. Исходная схема (а) и схема замещения (б) рассматриваемой ЭЭС.

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

$$I_{*nt}^{(3)} = I_{nt}^{(3)} / I_{Гном}; \quad x_{*рас} = x_{*рез.б} S_{Гном} / S_{б}, \quad (6.3)$$

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. 6.2 и 6.3. 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 $I_{nt}^{(3)} = I_{б} / x_{*расч}$;

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 штрих-пунктирными кривыми, а для $t > 0,1$ с - сплошными;

для определения сверхпереходного тока I'' необходимо пользоваться кривой для времени $t=0$, а при определении установившегося тока I_{∞} - для $t=\infty$.

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

1) схему замещения ЭЭС 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 (6.3);

2) по расчетным кривым для расчетного момента времени находят относительное значение периодической составляющей тока I_{*nt} ;

3) вычисляют значение периодической составляющей тока в именованных единицах, т.е.

$$I_{nt} = I_{nt} S_{Гном} / (\sqrt{3} U_{ном}). \quad (6.4)$$

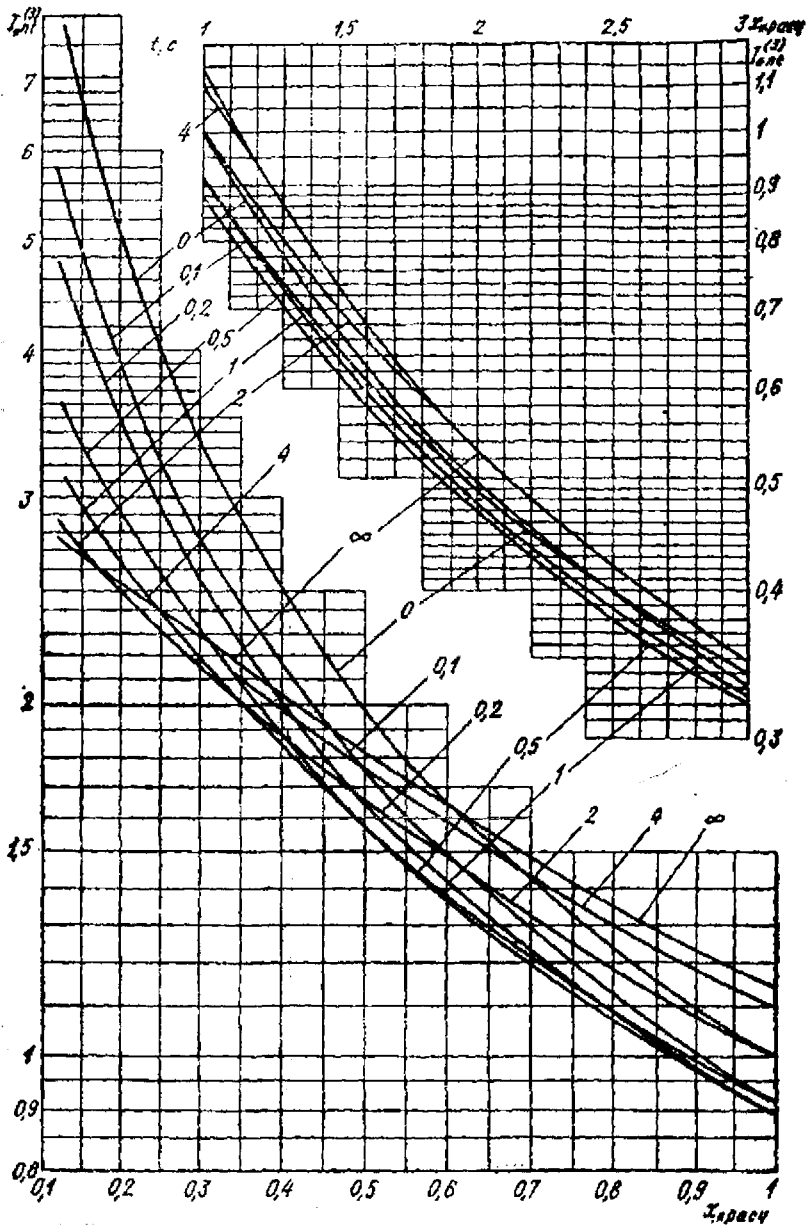


Рис. 6.2. Расчетные кривые для типового турбогенератора с АРВ.

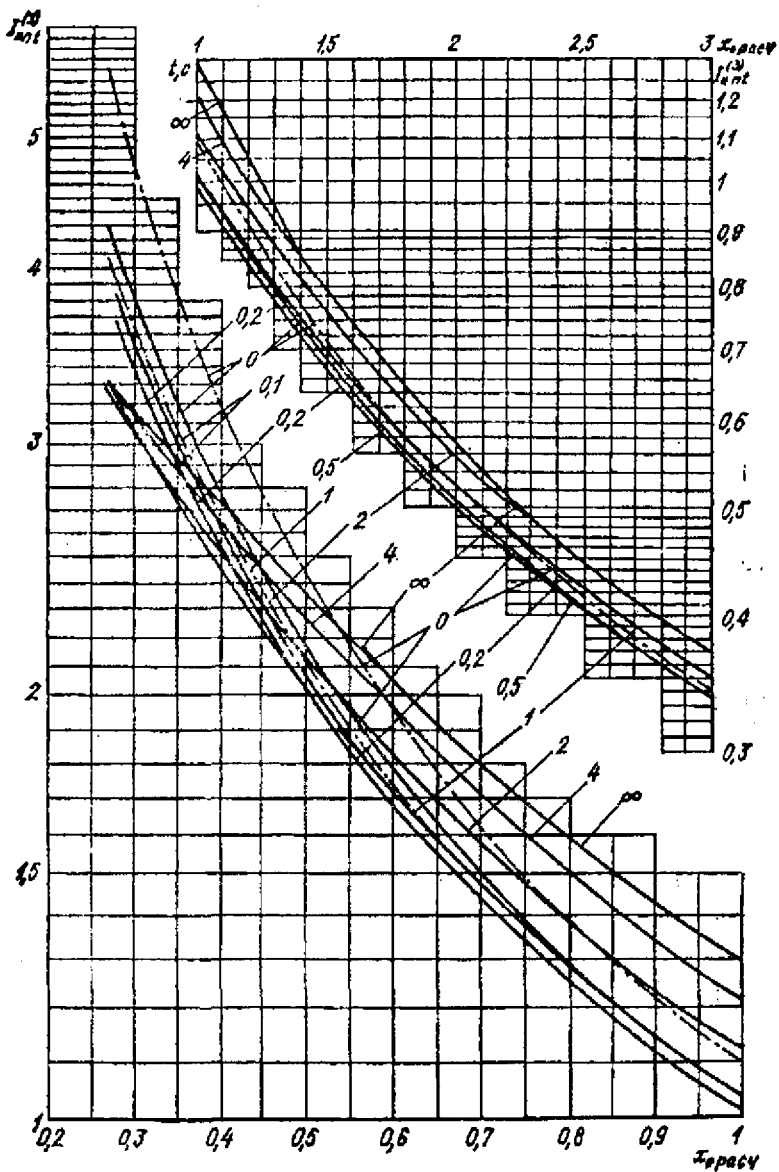


Рис. 6.3. Расчетные кривые для типового гидрогенератора с АРВ.

Типовые кривые - это графическое отображение семейства зависимостей (рис. 6.4,а)

$$I_{m\sigma}/I''_{\sigma} = f(t) \text{ при } I''_{\sigma}/I_{\Gamma \text{ ном}} = \text{var} \quad (6.5)$$

и семейства дополнительных зависимостей (рис. 6.4,б)

$$I_{m\sigma}/I''_{\Sigma} = f(I_{m\sigma}/I''_{\sigma}) \text{ при } I''_{\sigma}/I''_{\Sigma} = \text{var}. \quad (6.6)$$

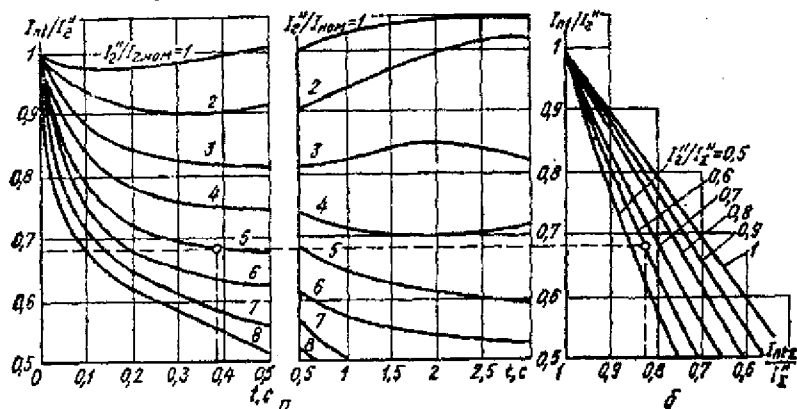


Рис. 6.4. Типовые кривые для мощных синхронных машин.

В зависимости (6.5) входят параметры режима одного генератора (или эквивалентного источника): I''_{σ} , $I_{m\sigma}$ - соответственно сверхпереходный ток и периодическая составляющая тока для момента времени t в генерирующей ветви; $I_{\Gamma \text{ ном}}$ - номинальный ток источника, приведенный к ступени напряжения в точке КЗ :

$$I_{\Gamma \text{ ном}} = S_{\Gamma \text{ ном}} / (\sqrt{3} U_{\text{ср ном}}). \quad (6.7)$$

Зависимостями (6.6) пользуются (см.п.6.2) при расчете схем с двухсторонним питанием точки КЗ : от генератора (группы генераторов) и электрической системы. Они связывают параметры режима генераторной ветви (I''_{σ} , $I_{m\sigma}$) с параметрами режима в точке КЗ : I''_{Σ} - сверхпереходный ток всех источников; $I_{m\sigma}$ - периодическая составляющая 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 МВА. 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 $I''_r/I_{rном} < 8$.

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 $I''_r/I_{rном} > 1$ (при $I''_r/I_{rном} < 1$ точка КЗ является электрически удаленной и $I''_r = I_m = I_\infty$).

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

- 1) рассчитывают результирующее сопротивление $x_{рез.б}$ до точки КЗ;
- 2) вычисляют начальный ток I''_r в месте КЗ от генератора по выражению $I''_r = I_\delta / x_{рез.б}$;
- 3) находят электрическую удаленность $I''_r/I_{rном}$ точки КЗ, если она оказывается дробным числом, то ее округляют до ближайшего целого числа или производят интерполяцию кривых;
- 4) определяют отношение $(I_m/I''_r)_t$ по типовым кривым на основе уже известного отношения $I''_r/I_{rном}$ и момента времени t ;
- 5) рассчитывают периодическую составляющую тока КЗ по формуле

$$I_m = (I_m/I''_r)_t I''_r \quad (6.8)$$

Выбор метода определения тока I_m по расчетным или типовым кривым зависит от параметров и характеристик генераторов источника питания: мощности, типа системы возбуждения и расчетного времени КЗ. Метод типовых кривых целесообразно применять в тех случаях, когда точка КЗ находится у выводов генератора или на небольшой электрической удаленности от них, - например, за трансформаторами связи электростанции с энергосистемой.

6.2. Расчет тока короткого замыкания по его общему или индивидуальному изменению

Если в расчетной схеме ЭЭС 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 удается сократить, 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) по исходной расчетной схеме составляют схему замещения ЭЭС для определения начального значения периодической составляющей тока КЗ (т.е. схему, в которую генераторы вводят сверхпереходными сопротивлениями и сверхпереходными ЭДС, найденными с учетом предшествующей нагрузки генераторов);

2) находят результирующее сопротивление генерирующих ветвей относительно точки КЗ и определяют значение периодических составляющих тока генераторов в начальный момент КЗ;

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: при оценке электрической удаленности ($x_{расч} > 3$ или $I_{пн}/I_{Гном} \leq 1$) ток, создаваемый эквивалентным генератором, вычисляют по формуле $I^{(3)} = I_{\phi}/x_{расч.б}$; для электрически неудаленных точек КЗ в зависимости от характеристик эквивалентного генератора используются расчетные или типовые кривые (см. п. 6.1).

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 элек-

тросанциями 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 зажимах генератора. Для турбогенераторов даже при малых промежутках времени (до 2 с) расчет приводит к существенным погрешностям (отношение I''/I_m достигает трех). Для гидрогенераторов 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 ЭЭС к условной радиальной, каждая ветвь которой соответствует выделяемому источнику или группе однотипных источников и связаны с точкой КЗ. Преобразование схемы выполняют с использованием коэффициентов токораспределения в соответствии с рекомендациями п.2.7. Источники, непосредственно связанные с точкой КЗ, а также источники бесконечной 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 генерирующих 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_{Σ} , расчет периодической составляющей тока КЗ выполняют в следующем порядке (рис. 6.5):

1) по исходной расчетной схеме составляют схему замещения и находят результирующее индуктивное сопротивление $x_{\Sigma_{рез}}$ и суммарную ЭДС E''_{Σ} для определения начального значения периодической составляющей тока в точке КЗ по формуле

$$I''_{\Sigma} = E''_{\Sigma} / x_{\Sigma_{рез}}, \quad (6.9)$$

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

$$I''_Г = (E''_{г1} I''_{\Sigma} X_{гk}) / X_{г2}, \quad (6.10)$$

3) определяют отношения $I''_Г / I''_{Гном}$ и $I''_Г / I''_{\Sigma}$;

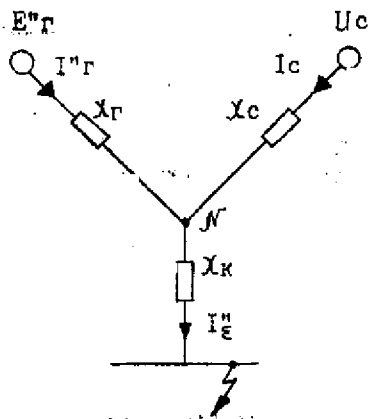


Рис. 6.5. Схема замещения участка ЭЭС при подпитке точки КЗ от генератора и электрической системы.

4) по кривой $I_n / I''_Г = f(t)$ на рис. 6.4 при известном значении ($I''_Г / I''_{Гном}$) для расчетного момента времени t находят отношение $I_n / I''_Г$ и по нему и кривой со значением $I''_Г / I''_{\Sigma}$ устанавливают значение ($I''_{n\Sigma} / I''_{\Sigma}$);

5) по найденному отношению ($I''_{n\Sigma} / I''_{\Sigma}$) и известному значению I''_{Σ} вычисляют периодическую составляющую тока КЗ, пользуясь выражением

$$I_{n\Sigma} = (I''_{n\Sigma} / I''_{\Sigma}) I''_{\Sigma}. \quad (6.11)$$

Суммарный ток в точке КЗ, создаваемый несколькими источниками, рассчитывают по формуле

$$I_{n1...N} = I_{n1} + I_{n2} + \dots + I_{nN}. \quad (6.12)$$

Заметим, что выделять много генерирующих ветвей в схеме ЭЭС 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 6.1. При трехфазном КЗ поочередно в точках K_1 и K_2 СЭС, схема которой изображена на рис. 6.6, а, определить значение тока в месте повреждения через 2,3 с после начала КЗ. Турбогенераторы имеют АРВ. Выключатель QF отключен.

Решение. На рис. 6.6, б показана схема замещения СЭС, где параметры ее элементов выражены в о.е. при $S_6=1000\text{ МВ}\cdot\text{А}$ и $U_6=6,3\text{ кВ}$.

При КЗ в точке K_1 генератор G1 можно рассматривать вместе с питающей системой С, а генератор G2 следует учитывать отдельно.

Сопротивление элементов схемы замещения

$$x_1 = x_\infty S_6 / S_c = 0,5 \cdot 1000 / 400 = 1,25 ;$$

$$x_2 = x_3 = x_0 l S_\# / U_{cp}^2 = 0,4 \cdot 140 \cdot 1000 / 115^2 = 4,23 ;$$

$$x_4 = x_5 = U_\# S_6 / (100 S_{T\#}) = 10,5 \cdot 1000 / (100 \cdot 60) = 1,75 ;$$

$$x_6 = x_7 = x''_d S_6 / S_T = 0,143 \cdot 1000 / 37,5 = 3,81 ;$$

$$x_8 = x_0 l S_6 / U_{cp}^2 = 0,08 \cdot 1 \cdot 1000 / 6,3^2 = 2,02 .$$

Результирующие сопротивления в схеме со стороны G1 и системы до точки K_1

$$x_9 = x_2 / 2 = 4,23 / 2 = 2,115 ; \quad x_{10} = x_1 + x_9 = 1,25 + 2,115 = 3,365 ;$$

$$x_{11} = x_5 + x_7 = 1,75 + 3,81 = 5,56 ;$$

$$x_{12} = x_{10} x_{11} / (x_{10} + x_{11}) = 3,365 \cdot 5,56 / (3,365 + 5,56) = 2,1 ;$$

$$x_{13} = x_{12} + x_4 = 2,1 + 1,75 = 3,85 .$$

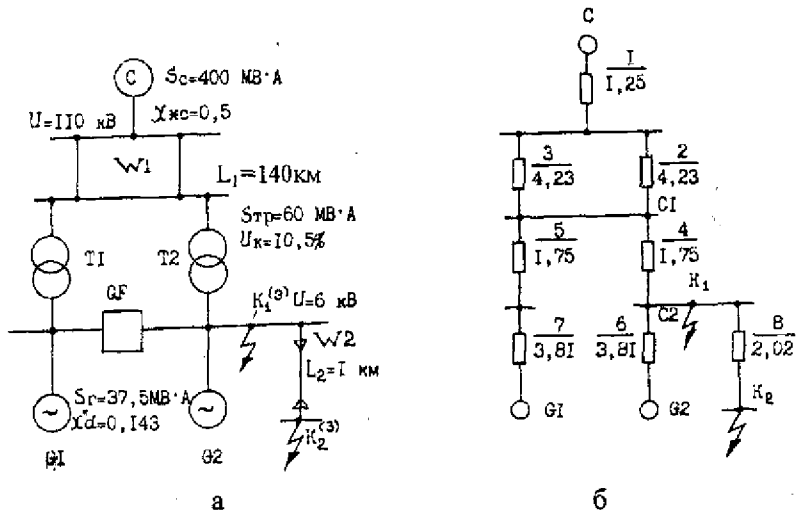


Рис. 6.6. К примеру 6.1.

Расчетное сопротивление в схеме

$$x_{расчI} = x_{13}(S_c + S_r) / S_c = 3,85(400 + 37,5) / 1000 = 1,6 \Omega.$$

По расчетным кривым рис. 6.2 для турбогенераторов средней мощности при $t=2,3c$ относительное значение тока $I_{нII} = 0,64$. Для генератора G2 по тем же кривым при $x_{расч} = x_6 S_r / S_0 = 3,81 \cdot 37,5 / 1000 = 0,14$ и $t=2,3$, относительное значение тока $I_{нII} = 2,8$.

Номинальные токи при напряжении 6 кВ:
генератора G1 и системы C

$$I_1 = (S_c + S_r) / (\sqrt{3} U_n) = (400 + 37,5) / (\sqrt{3} \cdot 6) = 42,1 \text{ кА};$$

генератора G2

$$I_{r2} = S_r / (\sqrt{3} U_n) = 37,5 / (\sqrt{3} \cdot 6) = 3,61 \text{ кА}.$$

Ток КЗ в точке K1

$$I_{K1} = I_{нII} \cdot I_1 + I_{нII} \cdot I_{r2} = 0,64 \cdot 42,1 + 2,8 \cdot 3,61 = 37,05 \text{ кА}.$$

Для определения тока КЗ в точке K2 рассчитаем коэффициенты токораспределения. Эквивалентное сопротивление всех источников питания относительно точки K2 схемы

$$x_{эки} = x_{13} x_6 / (x_{13} + x_6) = 3,85 \cdot 3,81 / (3,85 + 3,81) = 1,91.$$

Результирующее сопротивление до этой точки

$$x_{рез} = x_{эки} + x_8 = 1,91 + 2,02 = 3,93.$$

Коэффициенты токораспределения:

для генератора G1 и системы C

$$C_I = x_{эки} / x_{13} = 1,91 / 3,85 = 0,499;$$

для генератора G2

$$C_{II} = x_{эки} / x_6 = 1,91 / 3,81 = 0,501.$$

Учитывая, что токораспределение по ветвям должно оставаться неизменным, получаем:

$$x_{резI} = x_{рез} / C_I = 3,93 / 0,499 = 7,87;$$

$$x_{резII} = x_{рез} / C_{II} = 3,93 / 0,501 = 7,84.$$

Расчетные сопротивления ветвей:

генератора G1 и системы C

$$x_{расчI} = x_{резI} (S_r + S_c) / S_0 = 7,87(37,5 + 400) / 1000 = 3,44;$$

генератора G2

$$x_{расчII} = x_{резII} S_r / S_0 = 7,84 \cdot 37,5 / 1000 = 0,3.$$

По расчетным кривым рис. 6.2 при $t=2,3c$ находим относительное значение тока для генератора G2 $I_{*нII} = 2,18$. Так как для генератора G1 и системы $x_{расч} > 3$, то относительное значение тока для них определяется

$$I_{\text{нп1}} = 1/x_{\text{расч1}} = 1/3,44 = 0,29.$$

Ток КЗ в точке K_2

$$I_{K2} = I_{\text{нп1}} \cdot I_1 + I_{\text{нп11}} \cdot I_{r2} = 0,29 \cdot 42,1 + 2,18 \cdot 3,61 = 20,1 \text{ кА}.$$

Пример 6.2. Определить ток трехфазного КЗ в точке К электростанции, схема которой изображена на рис. 6.7,а, в момент времени $t=0,2$ с.

Решение. Сопротивления элементов схемы замещения (рис. 6.7,б) в о.е. при $S_0=37,5 \text{ МВ}\cdot\text{А}$, $U_0=37 \text{ кВ}$ и

$$I_0 = S_0 / (\sqrt{3} \cdot U_0) = 37,5 / (\sqrt{3} \cdot 37) = 0,585 \text{ кА}$$

$$x_1 = x_2 = x''_d S_0 / S_r = 0,143 \cdot 37,5 / 37,5 = 0,143;$$

$$x_3 = x_4 = U_n S_0 / (100 \cdot S_{Tp}) = 8,5 \cdot 37,5 / (100 \cdot 40) = 0,08.$$

Номинальный ток каждого генератора

$$I_{\text{ном}} = S_r / (\sqrt{3} U_{\text{ном}}) = 37,5 / (\sqrt{3} \cdot 35) = 0,619 \text{ кА}.$$

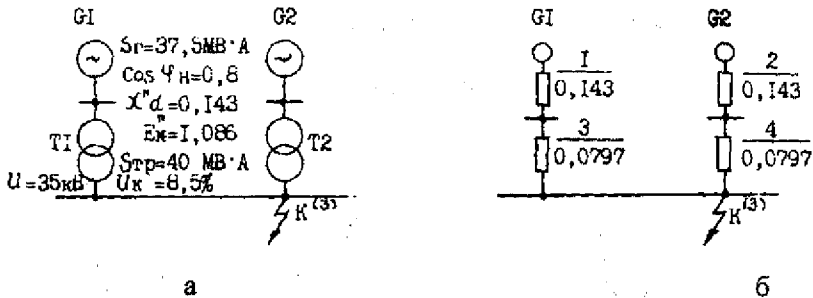


Рис. 6.7. К примеру 6.2.

Оба генератора находятся в одинаковых условиях относительно точки КЗ. Поэтому рассматриваем их как эквивалентный генератор с результирующим сопротивлением

$$x_{\text{рез}} = (x_1 + x_3) / 2 = (0,143 + 0,08) / 2 = 0,111.$$

Начальный ток, создаваемый эквивалентным генератором при трехфазном КЗ в точке К

$$I^{(3)}_1 = E''_n I_0 / x_{\text{рез}} = 1,086 \cdot 0,585 / 0,111 = 5,725 \text{ кА}.$$

Отношение тока эквивалентного генератора при трехфазном КЗ к номинальному току отдельных генераторов

$$I' / I_{\text{ном}} = I^{(3)}_1 / (2 I_{\text{ном}}) = 5,725 / (2 \cdot 0,619) = 4,62.$$

По кривым рис. 6.4 для $t=0,2$ с находим $I_n / I' = 0,75$.

Ток трехфазного КЗ в точке К, создаваемый эквивалентным генератором в момент времени $t=0,2$ с

$$I_{n=0,2} = (I_n / I') I^{(3)}_1 = 0,75 \cdot 5,725 = 4,29 \text{ кА}.$$

Пример 6.3. Определить ток трехфазного КЗ в точках K_1 и K_2 ЭЭС, схема которой приведена на рис. 6.8,а, в момент времени $t=0,2$ с.

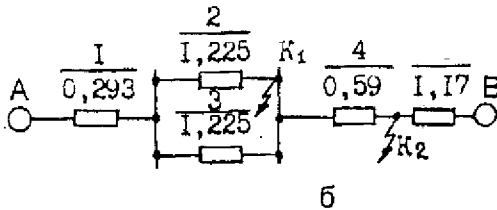
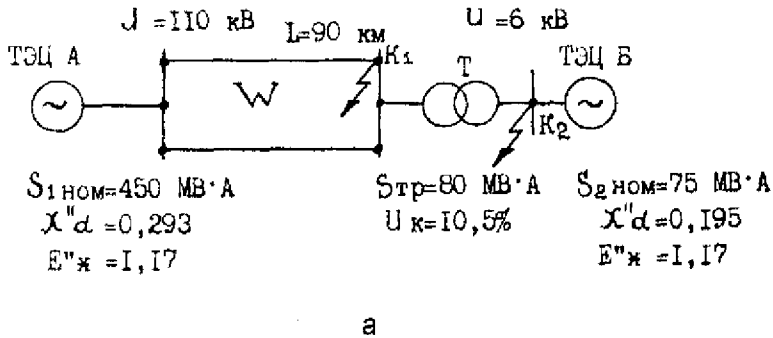


Рис. 6.8. К примеру 6.3.

Решение. Сопротивления элементов схемы замещения (рис. 6.8,б) при $S_б = 450 \text{ МВ} \cdot \text{А}$

$$x_1 = x''_d \cdot S_б / S_{1 \text{ ном}} = 0,293 \cdot 450 / 450 = 0,293;$$

$$x_2 = x_3 = x_0 \cdot l \cdot S_б / U_{cp}^2 = 0,4 \cdot 90 \cdot 450 / 115^2 = 1,22.$$

$$x_4 = U_k \cdot S_б / (100 \cdot S_{тр}) = 10,5 \cdot 450 / (100 \cdot 80) = 0,59;$$

$$x_5 = x''_d \cdot S_б / S_{2 \text{ ном}} = 0,195 \cdot 450 / 75 = 1,17.$$

Номинальные токи генераторов теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) А

$$I_{1 \text{ ном}} = I_{1б} = S_{1 \text{ ном}} / (\sqrt{3} \cdot U_{cp1}) = 450 / (\sqrt{3} \cdot 115) = 2,26 \text{ кА};$$

$$I_{2 \text{ ном}} = I_{2б} = S_{1 \text{ ном}} / (\sqrt{3} \cdot U_{cp2}) = 450 / (\sqrt{3} \cdot 6,3) = 41,24 \text{ кА}.$$

Короткое замыкание в точке K_1 . Результирующее сопротивление в схеме при объединении генераторов ТЭЦ А и ТЭЦ Б

$$x_{\text{рез}} = (0,293 + 0,612)(0,59 + 1,17) / (0,293 + 0,612 + 0,059 + 1,17) = 0,597.$$

Начальный ток трехфазного КЗ, создаваемый эквивалентным источником мощностью $S_{\Sigma ном} = 525 \text{ МВ} \cdot \text{А}$

$$I''_{\Sigma}^{(3)} = E'' J_{1\sigma} / x_{1рез} = 1,17 \cdot 2,26 / 0,597 = 4,43 \text{ кА.}$$

Относительный номинальный ток этого источника

$$I_{* \Sigma ном} = S_{\Sigma ном} / S_{ном} = 525 / 450 = 1,167.$$

Отношение начального тока КЗ эквивалентного источника к его номинальному току

$$I''_{\Sigma} / I_{* \Sigma ном} = (E'' J_{1\sigma} / x_{1рез}) / I_{* \Sigma ном} = (1,17 / 0,597) / 1,167 = 1,68.$$

По кривым рис. 6.4 для $t = 0,2 \text{ с}$ находим $I_{nt} / I''_{\Sigma} = 0,93$.

Ток трехфазного КЗ, создаваемый эквивалентным источником в момент времени $t = 0,2 \text{ с}$,

$$I^{(3)}_{nt=0,2} = (I_{nt} / I''_{\Sigma}) I''_{\Sigma}^{(3)} = 0,93 \cdot 4,43 = 4,12 \text{ кА.}$$

Короткое замыкание в точке К₂. Оба генератора рассматриваем независимо друг от друга. Результирующее сопротивление ветви ТЭЦ А до точки К₂

$$x_{резА} = x_1 + x_2 / 2 + x_3 = 0,293 + 0,612 + 0,59 = 1,495.$$

Результирующее сопротивление генераторов ТЭЦ Б до точки К₂

$$x_{резБ} = x_5 = 1,17.$$

Начальные токи трехфазного КЗ, создаваемые генераторами

$$I''_{А}^{(3)} = E'' J_{2\sigma} / x_{резА} = 1,17 \cdot 41,24 / 1,495 = 32,28 \text{ кА};$$

$$I''_{Б}^{(3)} = E'' J_{2\sigma} / x_{резБ} = 1,17 \cdot 41,24 / 1,17 = 41,24 \text{ кА.}$$

Отношение токов КЗ к номинальным токам генераторов:

$$(I'' / I_{ном})_{А} = E'' J_{2\sigma} / (x_{резА} I_{* ном}) = 1,17 / (1,495 \cdot 1) = 0,783;$$

$$(I'' / I_{ном})_{Б} = E'' J_{2\sigma} / (x_{резБ} I_{* ном}) = 1,17 / (1,17 \cdot 0,167) = 6,$$

$$\text{где } I_{* ном} = 450 / 450 = 1; I_{* ном} = 75 / 450 = 0,167.$$

Так как для ТЭЦ А ток КЗ в точке К₂ меньше номинального (удаленная точка КЗ), считаем, что при $t = 0,2 \text{ с}$

$$I^{(3)}_{А} = I_{nt} = 32,28 \text{ кА.}$$

Для ТЭЦ Б по кривым рис. 6.4 при $t = 0,2 \text{ с}$ находим

$$I_{nt} / I''_{\Sigma} = 0,68$$

суммарный ток трехфазного КЗ, создаваемый генераторами в момент времени $t = 0,2 \text{ с}$.

$$I^{(3)}_{nt} = I^{(3)}_{А} + (I_{nt} / I''_{\Sigma}) I''_{\Sigma} = 32,28 + 0,68 \cdot 41,24 = 60,3 \text{ кА.}$$

При расчете тока КЗ в точке К₂ по эквивалентному источнику с результирующим сопротивлением

$$x_{\text{през}} = x_{\text{прелд}} x_{\text{прелз}} / (x_{\text{прелд}} + x_{\text{прелз}}) = 1,495 \cdot 1,17 / (1,495 + 1,17) = 0,658.$$

Начальный ток КЗ в данной точке

$$I''_{\Sigma}^{(3)} = E'' \cdot I''_{2Б} / x_{\text{през}} = 1,17 \cdot 41,24 / 0,658 = 73,55 \text{ кА};$$

его отношение к номинальному току источника

$$I''_{\Sigma}^{(3)} / I_{\Sigma \text{ном}} = E'' / (x_{\text{през}} I_{\Sigma \text{ном}}) = 1,17 / (0,658 \cdot 1,167) = 1,53.$$

По кривым рис. 6.4 для $t=0,2$ с находим $I_{\text{пр}} / I''_{\Sigma} = 0,94$. Ток КЗ, создаваемый эквивалентным источником,

$$I^{(3)}_{\text{пр} t=0,2} = (I_{\text{пр}} / I''_{\Sigma}) I''_{\Sigma}^{(3)} = 0,94 \cdot 73,55 = 69,14 \text{ кА}.$$

Погрешность расчета

$$\delta = (69,14 - 60,3) \cdot 100 / 60,3 = 14,7\%,$$

что недопустимо.

6.3. Учет токов короткого замыкания, создаваемых электродвигателями в установках собственных нужд тепловых электростанций

При выборе аппаратов и кабелей сетей собственных нужд (с.н.) тепловых электростанций (ТЭС) необходимо учитывать токи, генерируемые при КЗ электродвигателями установок с.н. Для определения этих токов на ответвлении от секции с.н. 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 $\cos \varphi$	0,87
к.п.д. $\eta_{\text{ЭК}}$	0,94
кратность пускового тока.....	5,6
постоянная времени затухания периодической составляющей тока $T'_{\text{ЭК}}$, с.....	0,07
постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока $T'_{\text{аЭК}}$, с.....	0,04
ударный коэффициент $k_{\text{уЭК}}$	1,65

Расчетное состояние электроустановки с.н. 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 с.н. питается по цепи с меньшим сопротивлением, а в подпитке места КЗ участвуют все электродвигатели секции. При скрытом резервировании считают, что один из рабочих трансформаторов

с.н. 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 с.н. ТЭС предусматривает определение ряда параметров. Прежде всего на основе полученной схемы замещения цепи электроснабжения секции с.н. находят периодическую составляющую тока КЗ, создаваемого системой. Постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока от системы $T_{a.c}$ может быть определена по кривой (рис. 6.9), построенной в зависимости от номинальной мощности $S_{тр.ном}$ трансформатора, питающего секцию.

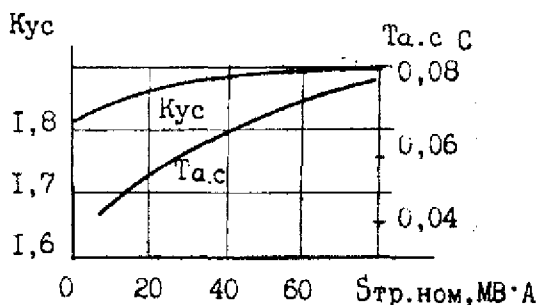


Рис. 6.9. Кривые для определения постоянной времени и ударного коэффициента цепи электроснабжения собственных нужд ТЭС.

При использовании трансформатора с расщепленными обмотками под $S_{тр.ном}$ понимают номинальную мощность обмотки, к которой присоединена секция с.н. Если трансформатор связан с секцией через промежуточный токопровод, то постоянную времени рассчитывают с учетом сопротивления токопровода по формуле

$$T_{a.c} = x_{рез.д} / (\omega r_{рез.д}).$$

Далее определяют:

начальное значение периодической составляющей тока КЗ, создаваемого электродвигателями секции (двух секций - при скрытом резервировании),

$$I'_{зк} = I_{зк.пуск} P_{\Sigma ном} / (\eta \sqrt{3} U_{ном} \cos \varphi_{зк}) = 4P_{\Sigma ном} / U_{ном} \quad (6.13)$$

где $U_{ном}$ - номинальное напряжение электродвигателей секции;

суммарное начальное значение периодической составляющей тока в месте КЗ

$$I'_{\Sigma} = I_c + I''_{\Sigma\text{эк}} \quad (6.14)$$

суммарную периодическую составляющую тока КЗ в момент времени τ

$$I_{\tau} = I_c + I''_{\Sigma\text{эк}} e^{-\tau/\tau_{\Sigma\text{эк}}} = I_c + \gamma_{\Sigma\text{эк}} I''_{\Sigma\text{эк}} \quad (6.15)$$

где $\gamma_{\Sigma\text{эк}}$ - коэффициент затухания периодической составляющей тока (рис. 6.10);

суммарную аperiodическую составляющую тока КЗ в момент времени τ

$$i_{a,\tau\Sigma} = \sqrt{2} \cdot I_c e^{-\tau/\tau_{a,c}} + \sqrt{2} \cdot I''_{\Sigma\text{эк}} e^{-\tau/\tau_{\Sigma\text{эк}}} = \sqrt{2} \cdot I_c e^{-\tau/\tau_{a,c}} + \sqrt{2} \cdot \beta_{\Sigma\text{эк}} I''_{\Sigma\text{эк}} \quad (6.16)$$

где $\beta_{\Sigma\text{эк}}$ - коэффициент затухания аperiodической составляющей тока (рис. 6.10);

суммарный ударный ток КЗ

$$i_{y\tau} = k_{yc} \sqrt{2} \cdot I_c + k_{y,\Sigma\text{эк}} \sqrt{2} \cdot I''_{\Sigma\text{эк}} \quad (6.17)$$

Значение k_{yc} находят по кривой на рис. 6.9, если сопротивление токопровода в цепи трансформатора с.н. не учитывают.

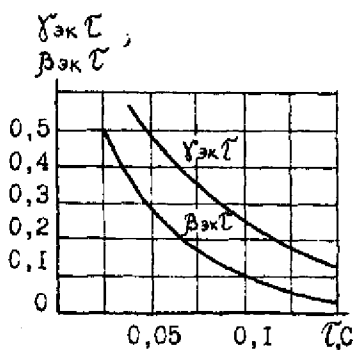


Рис. 6.10. Кривые для определения коэффициентов затухания эквивалентного электродвигателя с.н. ТЭС.

Пример 6.4. При трехфазном КЗ на ответвлении от секции установки с.н., схема которой изображена на рис. 6.11,а, определить значение периодической составляющей тока КЗ в момент времени $\tau=0,04$ с и ударный ток.

Решение. Принимаем за базисные условия $S_{\theta}=100\text{МВ}\cdot\text{А}$; $U_{\theta}=6,3\text{кВ}$; $I_{\theta}=S_{\theta}/(\sqrt{3}\cdot U_{\theta})=100/(\sqrt{3}\cdot 6,3)=9,16\text{кА}$. Схема замещения при КЗ в точке К показана на рис. 6.11,б.

Сопrotивления элементов схемы замещения, приведенные к базисным условиям, в о.е.

$$x_1=S_{\theta}/S_k=100/8000=0,0125;$$

$$x_2=1,75U_{\text{кВ.НН}}S_{\theta}/(100S_{\text{тп}})=1,75\cdot 12\cdot 100/(100\cdot 32)=0,21;$$

$$x_3=0,125U_{\text{кВ.НН}}S_{\theta}/(100S_{\text{тп}})=0,125\cdot 12\cdot 100/(100\cdot 32)=0,015;$$

$$x_{\text{рез}}=0,0125+0,21+0,015=0,238.$$

Периодическая составляющая тока КЗ, создаваемого системой,

$$I_c=I_{\theta}/x_{\text{рез}}=9,16/0,238=38,57\text{кА}.$$

Постоянная времени аperiodической составляющей тока КЗ при номинальной мощности обмотки НН трансформатора, равной 16МВА, согласно рис.6.9 $T_{a,c}=0,053\text{ с}$.

Начальное значение периодической составляющей тока КЗ, создаваемого эквивалентным двигателем левой по схеме секции, в соответствии с (6.13)

$$I''_{\text{ЭК}}=4P_{\Sigma\text{ном}}/U_{\text{ном}}=4\cdot 19,6/6=13,07\text{кА}.$$

Суммарное начальное значение периодической составляющей тока КЗ, создаваемого эквивалентным двигателем и системой,

$$I'_{\Sigma}=13,07+38,57=51,64\text{кА}.$$

Суммарная периодическая составляющая тока КЗ при $\tau=0,04\text{ с}$

$$I_{\tau\Sigma}=I_c+\gamma_{\text{ЭК}\tau}I''_{\text{ЭК}}=38,57+0,57\cdot 13,07=46,02\text{кА},$$

где коэффициент затухания $\gamma_{\text{ЭК}\tau}=0,57$ (определен по рис. 6.10).

Суммарная аperiodическая составляющая тока КЗ при $\tau=0,04\text{ с}$

$$i_{a\tau\Sigma}=\sqrt{2}I_c e^{-0,04\tau/T_{a,c}}+\sqrt{2}I''_{\text{ЭК}}\beta_{\text{ЭК}\tau}=\sqrt{2}\cdot 38,57 e^{-0,04\tau/0,053}+\sqrt{2}\cdot 13,07\cdot 0,37=32,4\text{кА},$$

где коэффициент затухания $\beta_{\text{ЭК}\tau}=0,37$ (определен по рис. 6.10).

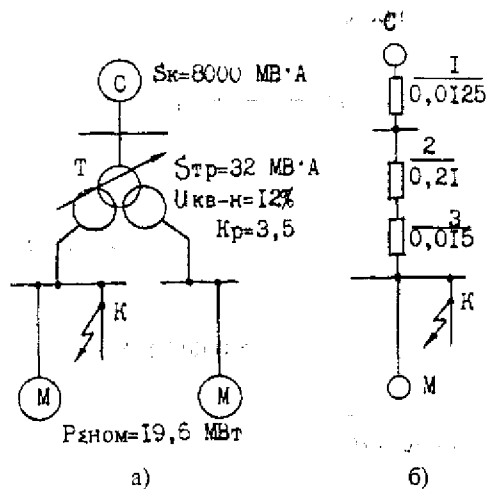


Рис. 6.11. К примеру 6.4.

Ударный ток КЗ согласно (6.17)

$$i_{y\Delta} = k_{yc} \sqrt{2} I_c + k_{y\Delta k} \sqrt{2} I''_{\Delta k} = 1,85 \cdot \sqrt{2} \cdot 38,57 + 1,65 \cdot \sqrt{2} \cdot 13,07 = 134,7 \text{ кА.}$$

Значение $k_{yc} = 1,85$ найдено по рис. 6.9.

Контрольные вопросы

1. На чем основан метод расчетных кривых? Какова область применения этого метода?
2. Для каких расчетных условий определения тока КЗ применяются типовые кривые?
3. Как определяется значение периодической составляющей тока КЗ в расчетный момент времени по расчетным (типовым) кривым?
4. 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?
5. В каких случаях можно выполнять расчет токов КЗ по общему изменению?
6. Когда возникает необходимость расчета токов КЗ по их индивидуальному изменению?
7. Каковы особенности расчета токов КЗ в системе собственных нужд электростанции?

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТА НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ

Рассматриваемые ниже несимметричные переходные процессы ограничены условием, что несимметрия возникает только в одном каком-либо месте системы, в то время как вся остальная часть последней остается строго симметричной. Как отмечалось в гл.1, такая однократная несимметрия может быть поперечной - двухфазное, однофазное и двухфазное КЗ на землю, и продольной - обрыв одной или двух фаз.

Токи в поврежденных фазах при несимметричных режимах значительно превышают токи неповрежденных фаз и по значению в ряде случаев могут превышать токи трехфазного КЗ. В связи с этим появляется необходимость в расчетах параметров несимметричных режимов, которые обычно выполняются с использованием метода симметричных составляющих.

7.1. 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 несимметричных режимах, когда трехфазная система становится несимметричной, фазы оказываются в разных условиях, что не позволяет выполнить расчет, как это делалось при расчете трехфазного КЗ, только для одной из фаз.

Для определения токов несимметричных режимов потребовалось бы составлять несколько уравнений Кирхгофа для многих контуров и узлов, образующихся в рассматриваемой несимметричной трехфазной системе. Решение этих уравнений с учетом индуктивных связей между фазами даже для сравнительно простой схемы является сложной задачей. С целью упрощения расчетов несимметричных режимов в трехфазной сети предложен метод симметричных составляющих, сущность которого состоит в том, что любую несимметричную трехфазную систему векторов (токов,

напряжений) можно представить в виде трех симметричных систем. Одна из них имеет прямую последовательность чередования фаз ($\underline{A}_1 \rightarrow \underline{B}_1 \rightarrow \underline{C}_1$) и обозначается индексом <1>, другая - обратную ($\underline{A}_2 \rightarrow \underline{B}_2 \rightarrow \underline{C}_2$) и обозначается индексом <2>. Третья система, называется системой нулевой последовательности, состоит из трех равных векторов, совпадающих по фазе ($\underline{A}_0 \rightarrow \underline{B}_0 \rightarrow \underline{C}_0$) и обозначается индексом <0>.

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 (А) находится в условиях, отличающихся от условий 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 (a)

$$\begin{aligned} a &= e^{j120^\circ} = -0,5 + j\sqrt{3}/2; \\ a^2 &= e^{j240^\circ} = -0,5 - j\sqrt{3}/2. \end{aligned} \quad (7.1)$$

Умножение вектора на оператор (a) означает поворот его на 120° в положительном направлении (против хода часовой стрелки). Умножение 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 $a^2 - a = -j\sqrt{3}$, $a - a^2 = j\sqrt{3}$, $a^3 = 1$.

Таким образом, для каждой фазы можно записать:

$$\begin{aligned} \underline{A} &= \underline{A}_1 + \underline{A}_2 - \underline{A}_0; \\ \underline{B} &= \underline{B}_1 + \underline{B}_2 + \underline{B}_0; \\ \underline{C} &= \underline{C}_1 + \underline{C}_2 + \underline{C}_0. \end{aligned} \quad (7.2)$$

Система величин прямой последовательности

$$\underline{A}_1; \underline{B}_1 = a^2 \underline{A}_1; \underline{C}_1 = a \underline{A}_1 \quad (7.3a)$$

Система величин обратной последовательности

$$\underline{A}_2; \underline{B}_2 = a \underline{A}_2; \underline{C}_2 = a^2 \underline{A}_2. \quad (7.3b)$$

Система величин нулевой последовательности

Система величин нулевой последовательности

$$\underline{A}_0 = \underline{B}_0 = \underline{C}_0. \quad (7.3в)$$

Из уравнений (7.3) следует, что при использовании метода симметричных составляющих достаточно вычислить значения симметричных составляющих фазы А, по которым нетрудно определить симметричные составляющие для двух других фаз и полные значения соответствующих фазных величин, т.е.

$$\left. \begin{aligned} \underline{A} &= \underline{A}_1 + \underline{A}_2 + \underline{A}_0; \\ \underline{B} &= a^2 \underline{A}_1 + a \underline{A}_2 + \underline{A}_0; \\ \underline{C} &= a \underline{A}_1 + a^2 \underline{A}_2 + \underline{A}_0. \end{aligned} \right\} \quad (7.4)$$

Таким образом, вместо одной несимметричной схемы рассчитываются три, но значительно более простые, что в конечном итоге существенно упрощает вычисления.

Симметричные составляющие фазы А можно получить, зная полные значения фазных величин. Выражение для определения составляющей \underline{A}_1 можно получить путем умножения второго и третьего уравнений системы (7.4) соответственно на a и a^2 и последующего сложения всех уравнений этой системы. В результате преобразования получим

$$\underline{A}_1 = (\underline{A} + a\underline{B} + a^2\underline{C})/3. \quad (7.5а)$$

Для определения составляющей \underline{A}_2 второе и третье уравнения системы (7.4) умножим соответственно на a^2 и a и затем складывают все три уравнения систем.

В результате

$$\underline{A}_2 = (\underline{A} + a^2\underline{B} + a\underline{C})/3. \quad (7.5б)$$

Выражение для определения \underline{A}_0 получают путем сложения всех уравнений системы (7.4)

$$\underline{A}_0 = (\underline{A} + \underline{B} + \underline{C})/3. \quad (7.5в)$$

Геометрическая сумма векторов прямой и обратной последовательности трех фаз, как и для всяких уравновешенных систем, равны нулю. В противоположность этому система величин нулевой последовательности, как это следует из (7.3), не является уравновешенной, т.е.

$$\underline{A}_0 + \underline{B}_0 + \underline{C}_0 = 3\underline{A}_0 \neq 0 \quad (7.6)$$

Большим достоинством метода симметричных составляющих применительно к расчету КЗ является то, что он сводит вычисление токов и напряжений при несимметричных КЗ к простому вычислению этих же величин при трехфазном КЗ.

7.2. 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, 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;

сопротивления во всех трех фазах одинаковы и не учитывают насыщение магнитных систем;

каждый элемент цепи оказывает свое специфическое сопротивление прохождению токов различных последовательностей.

Несимметричные токи, протекающие по фазам цепи, создают в сопротивлениях фаз несимметричные падения напряжения, которые можно разложить на симметричные составляющие. Так, при двухфазном КЗ токи и напряжения имеют составляющие прямой и обратной последовательностей, при двухфазном и однофазном КЗ на землю - прямой, обратной и нулевой. При этом падение напряжения прямой последовательности создается током прямой последовательности, падение напряжения обратной последовательности - током обратной последовательности и т.д., т.е. ток каждой последовательности создает падение напряжения той же последовательности.

Сопротивления элементов трехфазной цепи для разных последовательностей могут различаться по значению.

Обозначим x_1 , x_2 , x_0 - соответственно сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей элемента цепи КЗ. Тогда симметричные составляющие падения напряжения в фазах элемента цепи КЗ можно определить из выражений

$$\left. \begin{aligned} \Delta \underline{U}_1 &= \underline{I}_1 jx_1; \\ \Delta \underline{U}_2 &= \underline{I}_2 jx_2; \\ \Delta \underline{U}_0 &= \underline{I}_0 jx_0. \end{aligned} \right\} \quad (7.7)$$

Применение метода симметричных составляющих рассмотрим для случая несимметричного КЗ в простейшей схеме (рис. 7.1) элементы которой для токов (\underline{I}_{K1} , \underline{I}_{K2} , \underline{I}_{K0}) последовательно обладают соответственно результирующими сопротивлениями $x_{1рез}$, $x_{2рез}$, $x_{0рез}$.

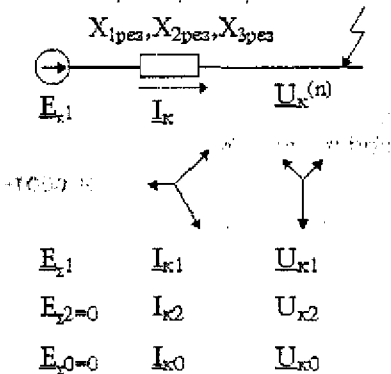


Рис. 7.1. Применение метода симметричных составляющих

При трехфазном КЗ напряжение прямой последовательности в месте повреждения равно нулю. При несимметричном КЗ напряжение прямой последовательности в месте повреждения не равно нулю. Поскольку напряжение в месте КЗ несимметрично, в нем присутствуют также составляющие обратной и нулевой последовательности. В то же время генераторы создают только ЭДС прямой последовательности, т.е. ЭДС нулевой и обратной последовательностей равны нулю.

Протекание токов обратной и нулевой последовательности условно можно рассматривать как результат возникновения в месте КЗ напряжений соответствующих последовательностей. Ясно, что по мере продвижения по цепи от места КЗ к источникам питания напряжение прямой последовательности возрастает от \underline{U}_{K1} до \underline{E}_{K1} , а напряжение обратной и нулевой последовательности уменьшается от \underline{U}_{K2} и \underline{U}_{K0} до нуля.

Учитывая сказанное, в соответствии со вторым законом Кирхгофа можно написать следующие выражения для определения симметричных составляющих токов и напряжений в месте КЗ:

$$\left. \begin{aligned} \underline{E}_{\Sigma 1} &= \underline{U}_{\kappa 1} + \underline{I}_{\kappa 1} j x_{1 \text{рез}}; \\ 0 &= \underline{U}_{\kappa 2} + \underline{I}_{\kappa 2} j x_{2 \text{рез}}; \\ 0 &= \underline{U}_{\kappa 0} + \underline{I}_{\kappa 0} j x_{0 \text{рез}}. \end{aligned} \right\} \quad (7.8)$$

где $\underline{U}_{\kappa 1}$, $\underline{U}_{\kappa 2}$, $\underline{U}_{\kappa 0}$, $\underline{I}_{\kappa 1}$, $\underline{I}_{\kappa 2}$, $\underline{I}_{\kappa 0}$ - симметричные составляющие напряжения и тока в месте КЗ;

$\underline{E}_{\Sigma 1}$ - результирующая ЭДС прямой последовательности;

$x_{1 \text{рез}}$, $x_{2 \text{рез}}$, $x_{0 \text{рез}}$ - результирующие сопротивления схем соответствующих последовательностей относительно точки КЗ.

При продольной несимметрии, вызванной обрывами и изменениями сопротивлений фаз (гл.9), основные уравнения для каждой последовательности имеют такой же вид, только вместо $\underline{U}_{\kappa 1}$, $\underline{U}_{\kappa 2}$, $\underline{U}_{\kappa 0}$ в них следует внести разности фазных напряжений соответствующих последовательностей по концам местной несимметрии, а сопротивления $x_{1 \text{рез}}$, $x_{2 \text{рез}}$, $x_{0 \text{рез}}$ должны представлять собой результирующие сопротивления схем соответствующих последовательностей относительно места рассматриваемой несимметрии.

Система уравнений (7.8) содержит шесть неизвестных величин: три составляющие напряжения и три составляющие тока. Недостающие для расчета этих величин три уравнения получают из граничных условий, которыми характеризуются тот или иной вид повреждения. В граничных условиях задаются известными токи двух фаз и фазное напряжение третьей в месте повреждения, или наоборот. Это позволяет по известной несимметрии в месте повреждения установить соответствующие соотношения между токами и напряжениями отдельных последовательностей.

7.3. 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

ры элементов схем замещения выражают в именованных или в о.с., приведя их соответственно к выбранной за основную ступень 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 рассматриваемой стадии переходного процесса в нее вводят генераторы и нагрузки в виде соответствующих сопротивлений и ЭДС. 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 ЭДС всех генераторов и нагрузок 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 продолжительности переходного процесса.

За начало схемы прямой или обратной последовательности выбирают точку, в которой объединены свободные концы всех генерирующих и нагрузочных ветвей. Концом схемы прямой 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 однофазным током, разветвляющимся 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. В силу этого пути циркуляции токов нулевой последовательности резко отличаются от путей протекания токов прямой и обратной последовательностей, что и обуславливает значительное отличие схемы нулевой последовательности от схем других по-

следовательностей. Это отличие заключается не только в конфигурации схем, но и в значениях сопротивлений схем замещения. Сопротивления элементов схем для токов обратной и нулевой последовательности приведены в табл. 7.1.

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 протекания токов нулевой последовательности.

Основные варианты соединений обмоток силовых трансформаторов, схемы замещения их для токов нулевой последовательности и выражения для определения сопротивления нулевой последовательности данной ветви приведены в табл. 7.2.

Как видно из табл. 7.2, в схеме замещения трансформаторов не участвует обмотка, соединенная в звезду с незаземленной нейтралью, так как в ней не могут циркулировать токи нулевой последовательности. Для двухобмоточного трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Δ сопротивление нулевой последовательности равно сопротивлению прямой последовательности, так как $x_{\mu 0} \gg x_{11}$. При соединении обмоток Y/Y_0 (когда внешний элемент соединен в треугольник или звезду без заземленной нейтрали) и Y/Y сопротивление нулевой последовательности $x_0 = x_1 + x_{\mu 0}$, где $x_{\mu 0}$ - реактивность намагничивания нулевой последовательности.

Для группы из трех однофазных трансформаторов, а также для трехфазных четырех- и пяти стержневых трансформаторов, $x_{\mu 0} = \infty$, а для трехфазных трехстержневых $x_{\mu 0} = (0,3+1)$ при номинальных параметрах трансформатора. Сопротивления отдельных обмоток двухобмоточного трансформатора приблизительно одинаковы и равны половине $U_k\%$, т.е. $x_1 = x_{11} = 0,5X_1$.

У трехобмоточных трансформаторов одна из обмоток, как правило, соединена в треугольник. Поэтому для них всегда можно принимать $x_{\mu 0} = \infty$. В случае автотрансформатора в схеме замещения участвуют все обмотки, поскольку через автотрансформатор токи нулевой последовательности могут переходить со стороны высшего напряжения на сторону среднего напряжения и наоборот, так как они имеют общую нейтраль. Сопротивления схем замещения x_I, x_{II}, x_{III} находят по формулам, как для случая трехфазного КЗ. В табл. 7.2 x_{r0} - результирующее сопротивление нулевой последовательности внешнего элемента (генератора).

Если нейтраль (генераторов, трансформаторов) заземлена через сопротивление, то его следует вводить в схему замещения нулевой последовательности утроенным значением.

Объясняется это тем, что схему замещения составляют для одной фазы, а через сопротивление в нейтрали протекает ток нулевой последовательности всех трех фаз. Чтобы учесть действительное падение напряжения в этом сопротивлении, его надо увеличить в 3 раза.

Началом схемы нулевой последовательности H_0 является точка с нулевым потенциалом (земля), а концом K_0 - точка несимметрии. При продольной несимметрии схема нулевой последовательности имеет два конца (границы места несимметрии).

Схемы замещения нулевой последовательности рекомендуется составлять, начиная от точки, где возникла эта несимметрия, считая, что в данной точке все фазы замкнуты между собой накоротко и к ней приложено напряжение нулевой последовательности. В зависимости от вида несимметрии это напряжение прикладывается или относительно земли (поперечная несимметрия, рис. 7.2,а), или последовательно в рассечку фазных проводов (продольная несимметрия, рис. 7.2,б).

Когда напряжение нулевой последовательности приложено относительно земли, то для протекания тока нулевой последовательности необходима, по меньшей мере, одна заземленная нейтраль в той же электрически связанной цепи, где имеется это напряжение.

Таблица 7.1.

Сопротивления элементов схем для токов обратной и нулевой последовательности

Элементы схем замещения	Параметры элементов для токов			Примечание
	прямой послед.	обратной послед.	нулевой последовательности	
1. Реактор	x_1	$x_2 = x_1$	$x_0 = x_1$	В прак- тич. Расче- тах $x_2 \approx x_1$
2. Трансформатор	x_1	$x_2 = x_1$	см.табл.7.2	
3. Синхронные машины				
а) без демпф. обмоток	x_1	$x_2 = 1,45x_d' S_\theta / S_n$	$x_0 = (0,15 + 0,6)x_1$	
б) с демпф. обмотками	x_1	$x_2 = 1,22X_d'' S_\theta / S_n$		
4. Асинхронные двигатели	x_1	$x_2 = x_1$	по данным за- вода-изготови- теля	
5. Обобщенная нагрузка	x_1	$x_2 = 0,35 S_\theta / S_n$		
6. Кабели	x_1	$x_2 = x_1$	$x_0 = (3,5 + 4,6)x_1$	
7. Воздушные ЛЭП:	x_1	$x_2 = x_1$		
• одноцепная ЛЭП без тросов			$x_0 = 3,5x_1$	
• то же со стальными тросами			$x_0 = 3x_1$	
• то же с хорошо проводящими тросами			$x_0 = 2x_1$	
• двухцепная ЛЭП без тросов			$x_0 = 5,5x_1$	
• то же со стальными тросами			$x_0 = 4,7x_1$	
• то же с хорошо проводящими тросами			$x_0 = 3x_1$	

Таблица 7.2.

Соединение обмоток трансформаторов, схемы их замещения и сопротивления для токов нулевой последовательности

№ пп.	Схема соединения обмоток силового трансформатора	Схема замещения силового трансформатора	Результир.сопротивление нулевой последов.ветви с трансф.
1			$X_0 = X_I + X_{II} = X_I$
2			$X_0 = X_I + X_{\mu 0} // (X_{II} + X_{r0})$
3			$X_0 = X_I + X_{\mu 0}$
4			$X_0 = X_I + X_{III} // (X_{II} + X_{r0})$
5			$X_0 = X_I + X_{III}$
6			$X_0 = X_I + X_{II} // X_{III}$

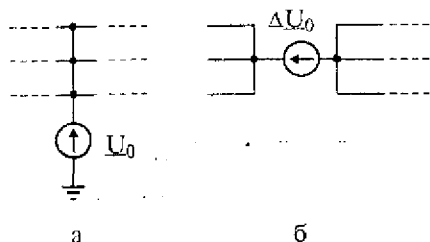


Рис. 7.2. Напряжение нулевой последовательности при поперечной (а) и продольной (б) несимметрии.

При нескольких заземленных нейтралей 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 тока нулевой последовательности в рассматриваемых условиях возможно только в том случае, когда в той же электрически связанной цепи имеются заземленные нейтрали с обеих сторон от места, где приложено напряжение нулевой последовательности.

На рис. 7.3 показан пример составления схемы нулевой последовательности для случая, когда напряжение нулевой последовательности возникает между проводами и землей (поперечная несимметрия). Стрелками указаны пути циркуляции токов нулевой последовательности при рассматриваемых условиях. Обмотки трансформаторов, автотрансформатора и прочие элементы схемы рис. 7.3,а обозначены порядковыми номерами, которые сохранены в обозначениях элементов схемы нулевой последовательности (рис. 3.7,б).

Поскольку в цепи среднего напряжения 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 генератора ГЗ. 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.

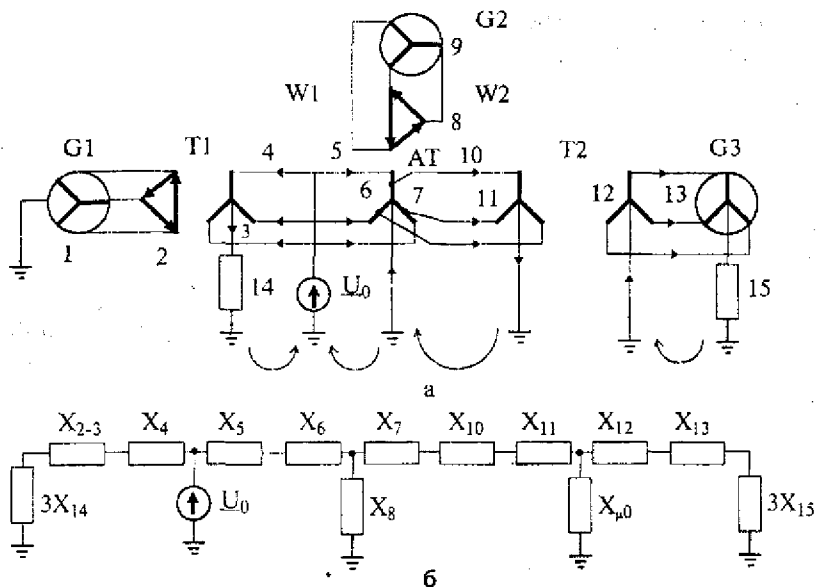


Рис. 7.3. Пример схемы нулевой последовательности:

а - исходная схема в трехфазном исполнении;

б - схема замещения нулевой последовательности при поперечной несимметрии.

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 (п.7.4).

7.4. Результирующие ЭДС и сопротивления отдельных последовательностей

Для расчета несимметричных режимов требуется знать эквивалентные значения ЭДС 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. 7.4,а), все элементы которой пронумерова-

ны и их номера сохранены для обозначения соответствующих элементов в схемах отдельных последовательностей.

При поперечной несимметрии в точке М схема замещения прямой последовательности имеет вид, показанный на рис. 7.4,б. Последовательно соединенные в ней элементы 1 и 2, а также 5 и 6 обозначены соответственно номерами 8 и 9. Для определения результирующих ЭДС и сопротивления относительно точки М достаточно заменить ветвь 9 с $E_n=0$ и ветвь, получаемую сложением элемента 8 с параллельно соединенными элементами 3, 4 и имеющую ЭДС E_1 , одной эквивалентной (рис. 7.4,в). Схема обратной последовательности и ее преобразование аналогичны, за исключением того, что в ней отсутствуют ЭДС источников питания. Схему нулевой последовательности (рис. 7.4,г) также легко преобразовать в эквивалентную путем последовательного и параллельного сложения ветвей.

Пусть теперь в точке М возникла продольная несимметрия. В этом случае напряжение прямой последовательности в точке должно быть введено в рассечку цепи элемента 4 (рис. 7.4,д). Для определения результирующих ЭДС и сопротивления схемы относительно точки М в данном случае необходимо вначале сложить последовательно элементы 8 и 9. Затем образовавшуюся ветвь 10 с ЭДС E_{1E} и ветвь 3 (рис. 7.4,е) следует заменить эквивалентной, что даст искомую результирующую ЭДС относительно точки М, 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. 7.4,д, в ней отсутствуют лишь ЭДС источника. Ее результирующее сопротивление находится аналогично схеме прямой последовательности.

В схему нулевой последовательности (рис. 7.4,ж) двухцепная линия введена своей трехлучевой схемой замещения с элементами 11-13 с тем, чтобы учесть взаимоиндукцию 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.

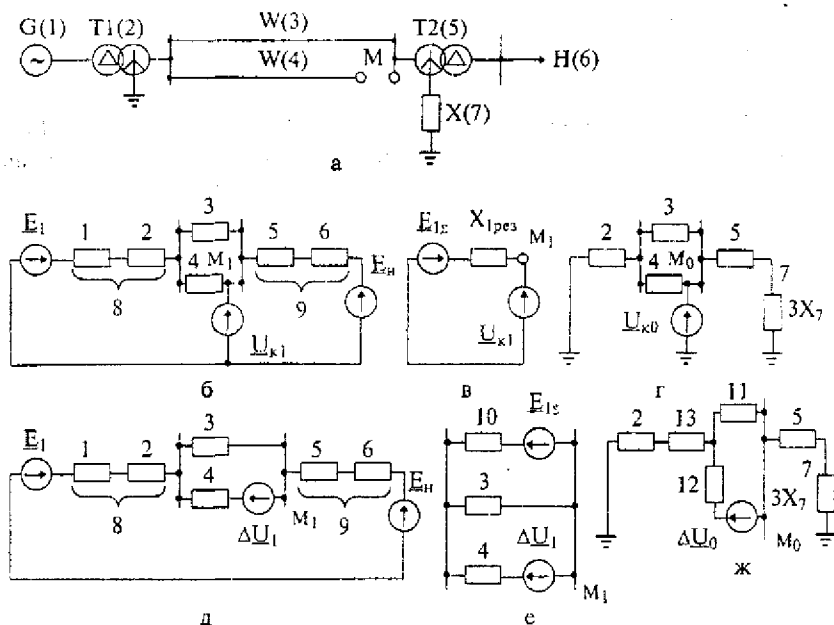


Рис. 7.4. Пример составления схем отдельных последовательностей и определения результирующих э.д.с. и сопротивлений при поперечной (б-г) и продольной (д-ж) несимметриях в точке М исходной схемы (а).

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. В чем сущность основных положений метода симметричных составляющих?
2. Каковы основные достоинства метода симметричных составляющих?
3. К чему сводится расчет несимметричных режимов по методу симметричных составляющих?
4. Каковы сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательности различных элементов короткозамкнутой цепи?

5. Как определяются сопротивления нулевой последовательности двухобмоточных и трехобмоточных трансформаторов?

6. Чем объясняется тот факт, что сопротивление на фазу для нулевой последовательности x_0 трехстержневого трансформатора неравно сопротивлению на фазу для прямой последовательности x_1 , но $x_1 = x_2$, где x_2 - сопротивление на фазу для обратной последовательности?

7. Как составляются расчетные схемы замещения различных последовательностей короткозамкнутой цепи при несимметричных КЗ?

8. Каковы особенности схемы замещения нулевой последовательности?

9. Как определяется результирующие сопротивления схем замещения разных последовательностей?

ПОПЕРЕЧНАЯ НЕСИММЕТРИЯ

8.1. 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. 8.1. Такой подход к рассматриваемой задаче позволяет получить ее решение в общем виде, из которого вытекают решения для частных случаев. Однако решение в общем виде (даже при неучете взаимоиндукции между фазами) приводит к весьма громоздким выражениям.

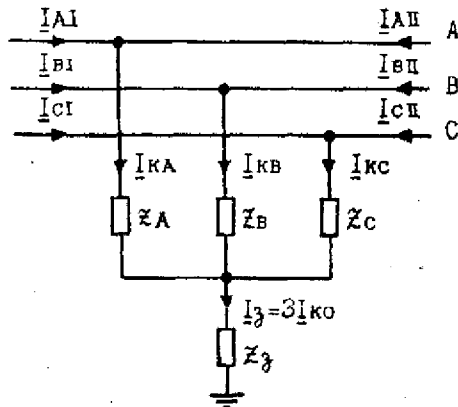


Рис. 8.1. Общее представление поперечной несимметрии в трех фазной системе.

Значительно проще и нагляднее решать задачу для каждого вида поперечной несимметрии, если использовать граничные условия, связанные с данным видом КЗ.

В приведенных ниже выкладках приняты следующие допущения:

рассматриваются только основные гармоники тока и напряжения;

результующие 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 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 следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{A1} &= \underline{E}_{A\Sigma} - j\underline{I}_{A1}x_{1\text{рез}}; \\ \underline{U}_{A2} &= 0 - j\underline{I}_{A2}x_{2\text{рез}}; \\ \underline{U}_{AO} &= 0 - j\underline{I}_{AO}x_{0\text{рез}}. \end{aligned} \right\} \quad (8.1)$$

Действительные токи и напряжения в месте КЗ можно найти по формулам, полученным на основании (7.4)

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{AO}; \\ \underline{I}_B &= a^2 \underline{I}_{A1} + a \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{AO}; \\ \underline{I}_C &= a \underline{I}_{A1} + a^2 \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{AO}; \end{aligned} \right\} \quad (8.2)$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{AO}; \\ \underline{U}_B &= a^2 \underline{U}_{A1} + a \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{AO}; \\ \underline{U}_C &= a \underline{U}_{A1} + a^2 \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{AO}. \end{aligned} \right\} \quad (8.3)$$

Заметим, что уравнениями (8.2) и (8.3) 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 (8.1) - (8.3) имеется 12 неизвестных ($\underline{I}_{A1}, \underline{I}_{A2}, \underline{I}_{AO}, \underline{U}_{A1}, \underline{U}_{A2}, \underline{U}_{AO}, \underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C, \underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$), поскольку ЭДС $\underline{E}_{A\Sigma}$ 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. Для внесения определенности в граничные условия предполагают, что КЗ происходит на ответвлении, сопротивление проводников которого равно нулю (рис. 8.2).

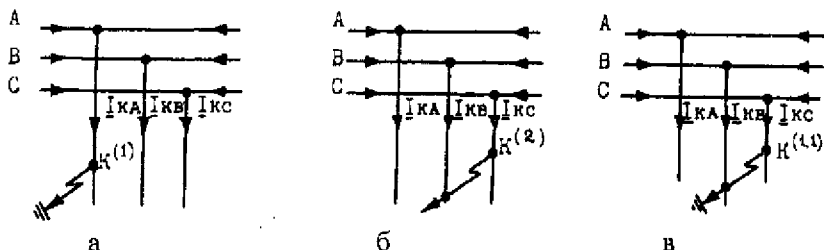


Рис. 8.2. Схемы ответвлений в точке однофазного (а), двухфазного (б) и двухфазного на землю (в) КЗ.

Расчет токов и напряжений при рассматриваемом несимметричном КЗ, по существу, сводится к вычислению их симметричных составляющих. Как только они найдены, фазные значения токов $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ и напряжений $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ определяются по (8.2) и (8.3).

Используя уравнения (8.1) - (8.3) и граничные условия (8.4), можно получить формулы для расчета трехфазного КЗ. При трехфазном КЗ напряжение всех фаз в месте КЗ равно нулю:

$$\underline{U}_{KA}^{(3)} = 0; \quad \underline{U}_{KB}^{(3)} = 0; \quad \underline{U}_{KC}^{(3)} = 0. \quad (8.4)$$

Подставив эти граничные условия для трехфазного КЗ в уравнения (8.3) и взяв сумму всех значений с одинаковыми коэффициентами при соответствующей последовательности, как это сделано при выводе (7.5), с учетом (8.1) получим

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_{A1}^{(3)} &= \underline{E}_{A\Sigma} / (jX_{1\text{ред}}); \\ \underline{I}_{A2}^{(3)} &= 0; \\ \underline{I}_{A0}^{(3)} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (8.5)$$

Токи в поврежденных фазах в соответствии с (8.2)

$$\underline{I}_{KA}^{(3)} = \underline{I}_{A1}^{(3)}; \quad \underline{I}_{KB}^{(3)} = a^2 \underline{I}_{A1}^{(3)}; \quad \underline{I}_{KC}^{(3)} = a \underline{I}_{A1}^{(3)}. \quad (8.6)$$

Коэффициент, связывающий значения тока аварийной фазы и тока прямой последовательности фазы А,

$$m^{(3)} = \underline{I}_{KA}^{(3)} / \underline{I}_{A1}^{(3)} = 1. \quad (8.7)$$

8.2. Однофазное короткое замыкание

Граничные условия для однофазного КЗ (рис. 8.2,а) являются

$$\underline{U}_{KA}^{(V)} = 0; \quad (8.8)$$

$$\underline{I}_{KB}^{(V)} = 0; \quad \underline{I}_{KC}^{(V)} = 0. \quad (8.9)$$

По разности второго и третьего уравнений системы (8.2) с учетом (8.9)

$$\underline{I}_{A1} = \underline{I}_{A2}. \quad (8.10)$$

а по их сумме с учетом (8.9) и (8.10)

$$\underline{I}_{A1} = \underline{I}_{A2} = \underline{I}_{A0}. \quad (8.11)$$

Учтя равенство (8.11) и условие (8.8), по сумме уравнений (8.1) легко получить формулу для определения тока прямой последовательности фазы А:

$$\underline{I}_{A1}^{(1)} = \underline{E}_{A\Sigma} / j(x_{1pez} + x_{2pez} + x_{0pez}). \quad (8.12)$$

Ток в аварийной фазе

$$\underline{I}_{KA}^{(1)} = \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{A0} = 3\underline{E}_{A\Sigma} / j(x_{1pez} + x_{2pez} + x_{0pez}). \quad (8.13)$$

Коэффициент взаимосвязи токов

$$m^{(V)} = \underline{I}_{KA}^{(V)} / \underline{I}_{A1}^{(V)} = 3. \quad (8.14)$$

Напряжения симметричных составляющих на основании системы уравнений (8.1):

нулевой и обратной последовательностей с учетом (8.11)

$$\underline{U}_{A0} = -j\underline{I}_{A1}x_{0pez}; \quad (8.15)$$

$$\underline{U}_{A2} = -j\underline{I}_{A1}x_{2pez}; \quad (8.16)$$

прямой последовательности с учетом (8.8), (8.15) и (8.16)

$$\underline{U}_{A1} = -\underline{U}_{A2} - \underline{U}_{A0} = j\underline{I}_{A1}(x_{2pez} + x_{0pez}). \quad (8.17)$$

Действительные напряжения в месте КЗ с учетом (8.8), второго и третьего уравнений системы (8.3) при подстановке значений \underline{U}_{A1} , \underline{U}_{A2} , \underline{U}_{A0} из (8.15) - (8.17)

$$\underline{U}_{KB}^{(1)} = a^2 j\underline{I}_{A1}(x_{2pez} + x_{0pez}) - aj\underline{I}_{A1}x_{2pez} - j\underline{I}_{A1}x_{0pez}; \quad (8.18)$$

$$\underline{U}_{KC}^{(1)} = aj\underline{I}_{A1}(x_{2pez} + x_{0pez}) - a^2 j\underline{I}_{A1}x_{2pez} - j\underline{I}_{A1}x_{0pez}. \quad (8.19)$$

8.3. Двухфазное короткое замыкание

Короткое замыкание между фазами В и С (рис. 8.2,б) можно охарактеризовать следующими граничными условиями :

$$\underline{I}_{KA}^{(2)} = 0; \quad (8.20)$$

$$\underline{I}_{KB}^{(2)} = -\underline{I}_{KC}^{(2)}; \quad (8.21)$$

$$\underline{U}_{KB}^{(2)} = \underline{U}_{KC}^{(2)}; \quad (8.22)$$

Так как сумма фазных токов равна нулю, то система является уравновешенной и, следовательно, $\underline{I}_{KO}^{(2)} = 0$. При этом согласно (8.2) ток фазы А будет

$$\underline{I}_A^{(2)} = \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{A0} = 0,$$

откуда

$$\underline{I}_{A1} = -\underline{I}_{A2}. \quad (8.23)$$

Из условия (8.22) с учетом значений \underline{U}_B и \underline{U}_C из (8.3) следует, что

$$\underline{U}_{A1} = \underline{U}_{A2}. \quad (8.24)$$

Подставив значения \underline{U}_{A1} и \underline{U}_{A2} из (8.1) в (8.24) получим

$$\underline{E}_{A\Sigma} - j\underline{I}_{A1}x_{1pez} = -j\underline{I}_{A2}x_{2pez},$$

откуда с учетом (8.23) выражение для определения тока прямой последовательности при двухфазном КЗ имеет вид

$$\underline{I}_{A1}^{(2)} = \underline{E}_{A\Sigma} / j(x_{1pez} + x_{2pez}). \quad (8.25)$$

Токи в поврежденных фазах В и С согласно (8.2) при условии (8.23) составляют

$$\underline{I}_{KB}^{(2)} = a^2 \underline{I}_{A1} + a \underline{I}_{A2} = (a^2 - a) \underline{I}_{A1} = -j\sqrt{3} \underline{I}_{A1}; \quad (8.26)$$

$$\underline{I}_{KC}^{(2)} = (a - a^2) \underline{I}_{A1} = j\sqrt{3} \underline{I}_{A1}. \quad (8.27)$$

Коэффициент взаимосвязи токов

$$m^{(2)} = I_{KB}^{(2)} / I_{A1}^{(2)} = I_{KC}^{(2)} / I_{A1}^{(2)} = \sqrt{3}. \quad (8.28)$$

Абсолютное значение полного тока при двухфазном КЗ

$$I_K^{(2)} = \sqrt{3} I_{A1}^{(2)} = \sqrt{3} E_{A\Sigma} / j(x_{1pez} + x_{2pez}). \quad (8.29)$$

Если \underline{U}_B и \underline{U}_C выразить через симметричные составляющие напряжения фазы А согласно (8.3), то (8.22) примет вид $a^2 \underline{U}_{A1} + a \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{AO} - a \underline{U}_{A1} - a^2 \underline{U}_{A2} - \underline{U}_{AO} = (a^2 - a)(\underline{U}_{A1} - \underline{U}_{A2}) = 0$, откуда с учетом (8.1) и (8.23)

$$\underline{U}_{A1} = \underline{U}_{A2} = j \underline{I}_{A1} x_{2pez}. \quad (8.30)$$

При определении напряжения $\underline{U}_{AO}^{(2)}$ следует учитывать, что в системах с заземленной нейтралью (x_{0pez} имеет конечное значение) напряжение $\underline{U}_{AO}^{(2)}$ при $\underline{I}_{AO}^{(2)} = 0$ на основании (8.1) равно нулю, а в системах с изолированной нейтралью ($x_{0pez} = \infty$) напряжение $\underline{U}_{AO}^{(2)} = -\infty$ и оно из уравнений напряжений исключается.

Фазные напряжения в месте КЗ по (8.3) с учетом (8.30) и (8.30) составляют

$$\underline{U}_{KA}^{(2)} = \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} = 2\underline{U}_{A1} = 2\underline{I}_{A1} j x_{2pez}; \quad (8.31)$$

$$\underline{U}_{KB}^{(2)} = \underline{U}_{KC}^{(2)} = a^2 \underline{U}_{A1} + a \underline{U}_{A2} = -\underline{U}_{A1} = -\underline{U}_{KA} / 2. \quad (8.32)$$

8.4. Двухфазное короткое замыкание на землю

Двухфазное КЗ на землю (рис. 8.2,в) характеризуется граничными условиями

$$\underline{I}_{KA}^{(1,j)} = 0; \quad (8.33)$$

$$\underline{U}_{KB}^{(1,j)} = 0; \quad \underline{U}_{KC}^{(1,j)} = 0. \quad (8.34)$$

Учитывая (8.33), получаем $\underline{I}_A^{(1,j)} = \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{AO} = 0$, откуда ток прямой последовательности

$$\underline{I}_{A1} = -(\underline{I}_{A2} + \underline{I}_{AO}). \quad (8.35)$$

По условиям (8.34) и разности второго и третьего уравнений системы (8.3) имеем

$$\underline{U}_{A1} = \underline{U}_{A2}. \quad (8.36)$$

По тем же условиям (8.34) и сумме второго и третьего уравнений (8.3) находим

$$\underline{U}_{A1} = \underline{U}_{A2} = \underline{U}_{AO}. \quad (8.37)$$

Используя равенство (8.37) и уравнения (8.1), получаем

$$\underline{I}_{AO} = -\underline{U}_{A1} / (j x_{0pez}); \quad (8.38)$$

$$\underline{I}_{A2} = -\underline{U}_{A1} / (jx_{2\text{рез}}). \quad (8.39)$$

С учетом (8.38) и (8.39) по (8.35) имеем

$$\underline{I}_{A1} = \underline{U}_{A1} (1 / (jx_{2\text{рез}}) + 1 / (jx_{0\text{рез}})), \quad (8.40)$$

откуда

$$\underline{U}_{A1} = \underline{I}_{A1} jx_{2\text{рез}} x_{0\text{рез}} / (x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}) \quad (8.41)$$

Приравняв значения \underline{U}_{A1} по (8.1) и (8.41), можно запи-

сать

$$\underline{I}_{A1}^{(1,1)} = \underline{E}_{A\Sigma} / [jx_{1\text{рез}} + jx_{2\text{рез}} x_{0\text{рез}} / (x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}})]. \quad (8.42)$$

Выразим токи обратной и нулевой последовательностей через ток прямой последовательности. Для этого напряжение \underline{U}_{A1} по (8.41) подставим в (8.38) и (8.39); тогда

$$\underline{I}_{A0} = -\underline{I}_{A1} x_{2\text{рез}} / (x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}); \quad (8.43)$$

$$\underline{I}_{A2} = -\underline{I}_{A1} x_{0\text{рез}} / (x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}), \quad (8.44)$$

а токи в поврежденных фазах с учетом (8.33) и (8.2) будут

$$\underline{I}_{KB}^{(1,1)} = \underline{I}_{A1}^{(1,1)} \left[a^2 - ax_{0\text{рез}} / (x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}) - x_{2\text{рез}} / (x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}) \right]; \quad (8.45)$$

$$\underline{I}_{KC}^{(1,1)} = \underline{I}_{A1}^{(1,1)} \left[a - a^2 x_{0\text{рез}} / (x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}) - x_{2\text{рез}} / (x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}) \right]. \quad (8.46)$$

Определив модуль комплексов (8.45) и (8.46), получим следующие значения токов аварийных фаз:

$$I_{KB}^{(1,1)} = I_{KC}^{(1,1)} = \sqrt{3} I_{A1}^{(1,1)} \sqrt{1 - x_{2\text{рез}} x_{0\text{рез}} / (x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}})^2} \quad (8.47)$$

Отсюда коэффициент взаимосвязи токов

$$m^{(1,1)} = I_{KB}^{(1,1)} / I_{A1}^{(1,1)} = I_{KC}^{(1,1)} / I_{A1}^{(1,1)} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - x_{2\text{рез}} x_{0\text{рез}} / (x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}})^2}. \quad (8.48)$$

В зависимости от отношения между $x_{2\text{рез}}$ и $x_{0\text{рез}}$ имеем

$$1,5 \leq m^{(1,1)} \leq \sqrt{3}.$$

Нижний предел $m^{(1,1)}$ наступает при $x_{2\text{рез}} = x_{0\text{рез}}$, а верхний - при $x_{2\text{рез}}/x_{0\text{рез}}$ равным 0 или ∞ .

Ток в земле

$$\underline{I}_z = \underline{I}_{KB} + \underline{I}_{KC} = 3\underline{I}_{KO}.$$

Действительные напряжения в месте КЗ с учетом (8.34) и

(8.37)

$$\underline{U}_{KA}^{(1,1)} = \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{AO} = 3\underline{U}_{A1}; \quad \underline{U}_{KB}^{(1,1)} = \underline{U}_{KC}^{(1,1)} = 0. \quad (8.49)$$

8.5. Учет переходного сопротивления в месте короткого замыкания

При расчетах КЗ в распределительных сетях особое значение имеет учет переходных сопротивлений 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, 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, исходят 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 В и С произошло через сопротивление дуги r_d . Его можно представить как глухое двухфазное КЗ на ответвлении, фазы которого имеют одинаковые сопротивления $r_d/2$ (рис. 8.3,а). Таким приемом несимметричный участок трехфазной цепи приведен к симметричному, что облегчает применение метода симметричных составляющих. Введение сопротивления $r_d/2$ в фазу А не меняет условий рассматриваемого КЗ, поскольку на данном участке ток в этой фазе отсутствует.

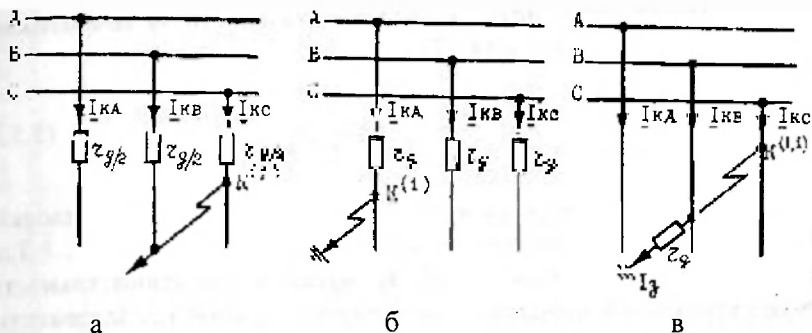


Рис. 8.3. Схемы несимметричных КЗ через дугу для двухфазного (а), однофазного (б) и двухфазного на землю (в).

Считая остальную часть схемы чисто индуктивной по аналогии с (8.25) ток прямой последовательности в месте КЗ запишем в виде

$$\begin{aligned} \underline{I}_{A1}^{(2)} &= \underline{E}_{A\Sigma} / \left[(r_d / 2 + jx_{1pez}) + (r_d / 2 + jx_{2pez}) \right] = \\ &= \underline{E}_{A\Sigma} / \left[r_d + j(x_{1pez} + x_{2pez}) \right]. \end{aligned} \quad (8.50)$$

Напряжение прямой и обратной последовательности за сопротивлением дуги r_d (точка $K^{(2)}$) определяется выражением

$$\underline{U}_{A1}^{(2)} = \underline{U}_{A1}^{(2)} - (r_d / 2 + jx_{2pez}) \underline{I}_{A1}^{(2)}. \quad (8.51)$$

Допустим, что фаза А замкнулась на землю через сопротивление дуги r_d (рис. 8.3,б). Чтобы сохранить симметрию данного участка трехфазной цепи, считаем, что такие же сопротивления имеются и в двух других фазах.

В новых условиях результирующее сопротивление каждой последовательности увеличилось на r_d . Следовательно, по аналогии с (8.12) ток прямой последовательности в месте КЗ

$$\begin{aligned} \underline{I}_{A1}^{(1)} &= \underline{E}_{A\Sigma} / \left[(r_d + jx_{1pez}) + (r_d + jx_{2pez}) + (r_d + jx_{0pez}) \right] = \\ &= \underline{E}_{A\Sigma} / \left[3r_d + j(x_{1pez} + x_{2pez} + x_{0pez}) \right]. \end{aligned} \quad (8.52)$$

Напряжение прямой последовательности за сопротивлением (точка $K^{(1)}$) с учетом (8.17)

$$\underline{U}_{A1}^{(1)} = [2r_0 + j(x_{2pez} + x_{0pez})] \underline{I}_{A1}^{(1)}. \quad (8.53)$$

При КЗ между фазами B и C с одновременным замыканием точки КЗ на землю через сопротивление дуги r_0 (рис. 8.3,в) последнее войдет только в схему нулевой последовательности своим утроенным значением. Поэтому ток прямой последовательности в месте КЗ по аналогии с (8.42)

$$\underline{I}_{A1}^{(1,1)} = \underline{E}_{A\Sigma} / [jx_{1pez} + jx_{2pez} \parallel (3r_0 + jx_{0pez})]. \quad (8.54)$$

Соответственно напряжение прямой последовательности за сопротивлением r_0 (точка $K^{(1,1)}$) с учетом (8.41)

$$\underline{U}_{A1}^{(1,1)} = \underline{I}_{A1}^{(1,1)} jx_{2pez} \parallel (3r_0 + jx_{0pez}). \quad (8.55)$$

Токи нулевой и обратной последовательностей в месте КЗ определяются соответственно по (8.43) и (8.44), где вместо x_{0pez} должно быть $(3r_0 + jx_{0pez})$.

Поскольку фазы B и C замкнуты между собой накоротко, независимо от значения r_0 равенство (8.37) сохраняется, т.е. напряжение обратной последовательности за сопротивлением r_0 следует определять по (8.55).

8.6. Правило эквивалентности прямой последовательности

Обращаясь к полученным выше выражениям симметричных составляющих токов и напряжений в месте несимметричного КЗ, сведенным в табл. 8.1, 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.

Таблица 8.1.

Выражения для определения симметричных составляющих, фазных токов и напряжений различных видов несимметричных КЗ

Расчетная величина	Вид несимметричного КЗ		
	двухфазное	двухфазное на землю	однофазное
1	2	3	4
Ток последовательностей:			
прямой \underline{I}_{K1}	$\underline{E}_{\Sigma} / j(x_{1pez} + x_{2pez})$	$\underline{E}_{\Sigma} / [j(x_{1pez} + x_{2pez}x_{0pez} / (x_{2pez} + x_{0pez}))]$	$\underline{E}_{\Sigma} / j(x_{1pez} + x_{2pez} + x_{0pez})$
обратной \underline{I}_{K2}	$-\underline{I}_{K1}$	$-\underline{I}_{K1}x_{0pez} / (x_{0pez} + x_{2pez})$	\underline{I}_{K1}
нулевой \underline{I}_{K0}	0	$-\underline{I}_{K1}x_{2pez} / (x_{0pez} + x_{2pez})$	\underline{I}_{K1}
Токи фаз: \underline{I}_{KA}	0	0	$3\underline{I}_{K1}$
\underline{I}_{KB}	$a^2\underline{I}_{K1} - a\underline{I}_{K1}$	$\underline{I}_{K1}(a^2 - (ax_{0pez} + x_{2pez}) / (x_{0pez} + x_{2pez}))$	0
\underline{I}_{KC}	$a\underline{I}_{K1} - a^2\underline{I}_{K1}$	$\underline{I}_{K1}(a - (a^2x_{0pez} + x_{2pez}) / (x_{0pez} + x_{2pez}))$	0

Продолжение табл. 8.1.

1	2	3	4
Напряжения последовательностей:			
прямой \underline{U}_{K1}	$jx_{2pez} \underline{I}_{K1}$	$jx_{2pez}x_{0pez} / (x_{2pez} + x_{0pez}) \underline{I}_{K1}$	$j(x_{2pez} + x_{0pez}) \underline{I}_{K1}$
обратной \underline{U}_{K2}	$jx_{2pez} \underline{I}_{K1}$	$jx_{2pez}x_{0pez} / (x_{2pez} + x_{0pez}) \underline{I}_{K1}$	$-jx_{2pez} \underline{I}_{K1}$
нулевой \underline{U}_{K0}	0	$jx_{2pez}x_{0pez} / (x_{2pez} + x_{0pez}) \underline{I}_{K1}$	$-jx_{0pez} \underline{I}_{K1}$
Напряжения фаз:			
\underline{U}_{KA}	$2\underline{I}_{K1} jx_{2pez}$	$3\underline{I}_{K1} jx_{0pez}x_{2pez} / (x_{0pez} + x_{2pez})$	0
\underline{U}_{KB}	$-\underline{I}_{K1} jx_{2pez}$	0	$\underline{I}_{K1} j[x_{2pez}(a^2 - a) + x_{0pez}(a^2 - 1)]$
\underline{U}_{KC}	$-\underline{I}_{K1} jx_{2pez}$	0	$\underline{I}_{K1} j[x_{2pez}(a - a^2) + x_{0pez}(a - 1)]$
Дополнительное сопротивление x_{Δ}	x_{2pez}	$x_{0pez}x_{2pez} / (x_{0pez} + x_{2pez})$	$x_{0pez} + x_{2pez}$
Коэффициент m	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{0pez}x_{2pez}}{(x_{0pez} + x_{2pez})^2}}$	3

Структура выражений (8.12), (8.25) и (8.42) позволяет в общем виде записать ток прямой последовательности фазы А при любом несимметричном КЗ через параметры цепи:

$$\underline{I}_{KA}^{(n)} = \underline{E}_{A\Sigma} / (j(x_{I_{рез}} + x_{\Delta}^{(n)})), \quad (8.56)$$

где (n) обозначает вид КЗ; $x_{\Delta}^{(n)}$ - дополнительное сопротивление в зависимости от вида КЗ (см. табл. 8.1).

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

$$I_K^{(n)} = m^{(n)} I_{K1}^{(n)}, \quad (8.57)$$

где $m^{(n)}$ - коэффициент, который можно найти по данным табл. 8.1.

Обобщенная запись (8.56) дает возможность сформулировать правило эквивалентности прямой последовательности (правило Щедрина): 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 \underline{U}_{K1} (см. табл. 8.1) справедливо

$$\underline{U}_{K1}^{(n)} = jx_{\Delta}^{(n)} \underline{I}_{K1}^{(n)}. \quad (8.58)$$

Рис. 8.4 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).

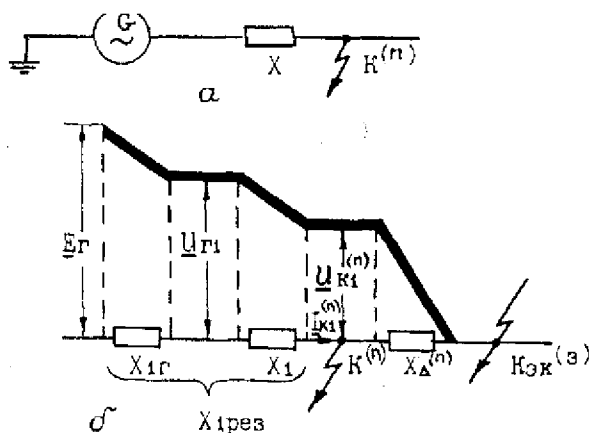


Рис. 8.4. Несимметричное (а) и эквивалентное трехфазное (б) КЗ при определении токов и напряжений прямой последовательности.

Так, если нейтраль генератора, 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 распространять на случай несимметричного КЗ.

8.7. 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. 8.5 показаны комплексные схемы замещения короткозамкнутой цепи, которые характеризуются сопротивлениями $X_{1рез}$, $X_{2рез}$, $X_{0рез}$ и соответствуют фазе А. Нетрудно убедиться в том,

что при этом соблюдаются соотношения между симметричными составляющими напряжений и токов в месте КЗ.

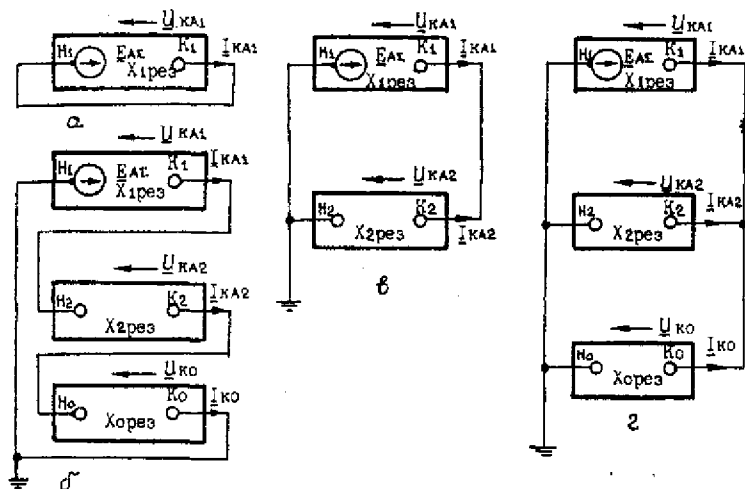


Рис. 8.5. Комплексные схемы замещения трехфазного (а), однофазного (б), двухфазного (в) и двухфазного на землю (г) КЗ.

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. 8.5,а).

При двухфазном КЗ не обтекается током эквивалентная схема нулевой последовательности, симметричные составляющие напряжения прямой и обратной последовательностей в месте КЗ одинаковы. Это позволяет объединить схемы отдельных последовательностей (рис.8.5,в) 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 (8.17) равно суммарному падению напряжения в схемах обратной и нулевой последовательностей. Это дает возможность представить комплексную схему однофазного КЗ как последовательную цепь всех трех эквивалентных схем (рис. 8.5,б).

Комплексная схема замещения в случае двухфазного КЗ а землю показана на рис. 8.5, г. При этом виде КЗ симметричные оставляющие напряжения в месте КЗ равны между собой, что позволяет объединить концы всех эквивалентных схем. В схемах обмотной 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 соотношения между токами и симметричными составляющими напряжений, известны, зная $I_{KA1}^{(n)}$ по (8.56), легко найти симметричные составляющие токов и напряжений в месте КЗ, а по (8.2) и (8.3) определить их действительные значения.

Если требуется рассчитать значения токов поврежденных фаз в месте КЗ, то их можно вычислить по коэффициенту $m^{(n)}$ согласно (8.57).

8.8. Сравнение токов при различных видах несимметричного короткого замыкания

Правило эквивалентности прямой последовательности и установленные значения $x_{\Delta}^{(n)}$ и $m^{(n)}$ (см. табл. 8.1) позволяет 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. 8.1 можно записать следующие неравенства:

$$x_{\Delta}^{(1)} > x_{\Delta}^{(2)} > x_{\Delta}^{(1,1)} > x_{\Delta}^{(3)} = 0; \quad (8.59)$$

$$I_{K1}^{(1)} < I_{K1}^{(2)} < I_{K1}^{(1,1)} < I_K^{(3)}; \quad (8.60)$$

$$U_{K1}^{(1)} > U_{K1}^{(2)} > U_{K1}^{(1,1)} > U_K^{(3)} = 0. \quad (8.61)$$

Выясним пределы, в которых могут находиться значения токов при несимметричных КЗ по сравнению со значениями токов трехфазного КЗ, возникающего в той же точке системы. Значение 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 (8.56) и (8.57) отношение тока в месте несимметричного КЗ к току трехфазного КЗ при тех же условиях можно записать так:

$$k_{(n-3)} = I_{\kappa}^{(n)} / I_{\kappa}^{(3)} = m^{(n)} E_{\Sigma}^{(n)} / (E_{\Sigma}^{(3)} (1 + x_{\Delta}^{(n)} / x_{1n\sigma})), \quad (8.62)$$

где индекс у результирующей ЭДС 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 ЭДС. Для приближенной оценки пределов изменения $k_{(n-3)}$ можно пренебречь различием $\bar{E}_{\Sigma}^{(n)}$ и $\bar{E}_{\Sigma}^{(3)}$. При этом выражение (8.62) упрощается и принимает вид

$$k_{(n-3)} \approx m^{(n)} / (1 + x_{\Delta}^{(n)} / x_{1n\sigma}). \quad (8.63)$$

Рассмотрим какие предельные значения может принимать отношение $k_{(n-3)}$ при различных видах КЗ.

Двухфазное КЗ. Согласно данным табл.8.1

$$k_{(2-3)} = \sqrt{3} / (1 + x_{2p\sigma} / x_{1p\sigma}). \quad (8.64)$$

При КЗ вблизи зажимов генератора $x_{\sigma} \approx 0$. При этом в начальный момент КЗ ($t=0$) $x_{1r} = x_d$, $x_{2r} \approx x_d$. Следовательно,

$$x_{1p\sigma} \approx x_{2p\sigma}; \quad k_{(2-3)} = \sqrt{3} / 2.$$

В установившемся режиме ($t = \infty$), при котором $x_{1Г} = x_d$, $x_{2Г} \ll x_d$, $x_{1рез} \gg x_{2рез}$, можно полагать $x_{2рез} \approx 0$. Тогда $\kappa_{(2-3)} = \sqrt{3}$. Следовательно, отношение $\kappa_{(2-3)}$ находится примерно в следующих пределах:

$$\sqrt{3}/2 \leq \kappa_{(2-3)} < \sqrt{3}. \quad (8.65)$$

При КЗ в удаленной точке системы значения токов двух- и трехфазного короткого замыкания изменяются во времени незначительно, благодаря чему между ними в течение всего переходного процесса сохраняется приблизительно постоянное соотношение:

$$I_k^{(2)} \approx (\sqrt{3}/2) I_k^{(3)} \approx 0,87 I_k^{(3)} \quad (8.66)$$

Однофазное КЗ. Согласно данным табл.8.1 и выражению (8.63) отношение токов

$$\kappa_{(1-3)} = 3 / (1 + (x_{2рез} + x_{0рез}) / x_{1рез}). \quad (8.67)$$

Индуктивное сопротивление $x_{0рез}$ 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 ($x_m \approx 0$), если $x_{0рез} = 0$, рассматривается установившийся режим КЗ, когда $x_{1рез} \gg x_{2рез}$ и можно считать, что $x_{2рез} \approx 0$. В этом случае предельное значение $\kappa_{(1-3)} = 3$. Если же $x_{0рез} \approx \infty$, то $\kappa_{(1-3)} = 0$. Следовательно, отношение $\kappa_{(1-3)}$ находится в пределах

$$0 \leq \kappa_{(1-3)} < 3. \quad (8.68)$$

При КЗ в удаленной точке системы, где $x_{2рез} \approx x_{1рез}$, предельные условия, соответствующие $x_{0рез} = 0$ и $x_{0рез} = \infty$, будут следующими:

$$0 \leq \kappa_{(1-3)} < 1,5. \quad (8.69)$$

Двухфазное КЗ на землю. Согласно табл.8.1 и зависимости (8.63)

$$K_{(1,1-3)} = m^{(1,1)} / (1 + (x_{2pez} x_{0pez} / (x_{2pez} + x_{0pez}) / x_{1pez})), \quad (8.70)$$

где $m^{(1,1)} = 1.5$ при $x_{2pez} = x_{0pez}$ (см.п.8.4) и $m^{(1,1)} = \sqrt{3}$ при x_{2pez}/x_{0pez} равном 0 или ∞ . Если $x_{0pez} = 0$, то $K_{(1,1-3)} = 3$, а если $x_{0pez} = \infty$, то комплексная схема замещения (рис.8.5,г) превращается в комплексную схему замещения при двухфазном КЗ (рис.8.5,в), в результате чего

$$K_{(1,1-3)} = \sqrt{3} / (1 + x_{2pez} / x_{1pez}). \quad (8.71)$$

При КЗ в удаленной точке, где $x_{2pez} \approx x_{1pez}$ $K_{(1,1-3)} = \sqrt{3}/2$. Поэтому $K_{(1,1-3)}$ изменяется в пределах

$$\sqrt{3}/2 \leq K_{(1,1-3)} \leq 3, \quad (8.72)$$

т.е. в таких же пределах, как и при двухфазном КЗ.

Значение тока двухфазного КЗ на землю также во многом зависит от отношения x_{0pez}/x_{1pez} . Однако при этом следует заметить, что там, где $I_{\alpha}^{(1)} \gg I_{\alpha}^{(2)}$, соотношение параметров схем таково, что $I_{\alpha}^{(1)} \gg I_{\alpha}^{(2)}$. Если $I_{\alpha}^{(1)} \approx I_{\alpha}^{(2)}$, то $I_{\alpha}^{(1)} \approx I_{\alpha}^{(2)}$. Поэтому при выборе электрооборудования расчет значений токов двухфазного КЗ на землю не производят, выполняя лишь расчет двухфазного и однофазного несимметричных КЗ.

Для ограничения тока однофазного КЗ применяют там, где это допустимо, разземление части нейтралей силовых трансформаторов, что приводит к увеличению x_{0pez} . Возможно также заземление части нейтралей через специальные токоограничивающие сопротивления.

8.9. Векторные диаграммы токов и напряжений

В соответствии с соотношениями, полученными при рассмотрении одно-, двух- и двухфазного на землю КЗ на рис.8.6-8.8 построены векторные диаграммы токов и напряжений.

На рис. 8.6 изображены векторные диаграммы токов и напряжений в месте однофазного КЗ. Анализируя соотношения для однофазного КЗ, построение начинают, например, с вектора I_{A1} .

Пользуясь (8.11), строят векторы \underline{I}_{A2} и \underline{I}_{A0} , а остальные фазные составляющие - на основании определения прямой, обратной и нулевой последовательностей. Фазные токи находят как геометрическую сумму симметричных составляющих соответствующих фаз, правильность построения которых подтверждается формулами.

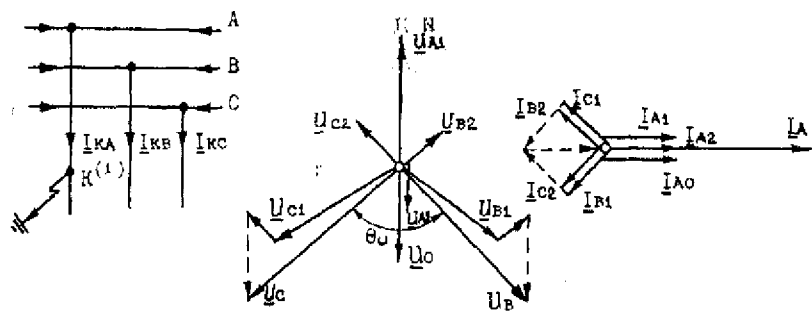


Рис. 8.6. Векторные диаграммы токов и напряжений в месте однофазного КЗ.

СМББ:

Аналогично выполняют построение векторной диаграммы напряжений в месте однофазного КЗ и векторных диаграмм токов и напряжений для остальных видов несимметричного КЗ (см. рис. 8.7, 8.8). 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_l между токами поврежденных фаз может изменяться в пределах $60^\circ < \theta_l < 180^\circ$, 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.

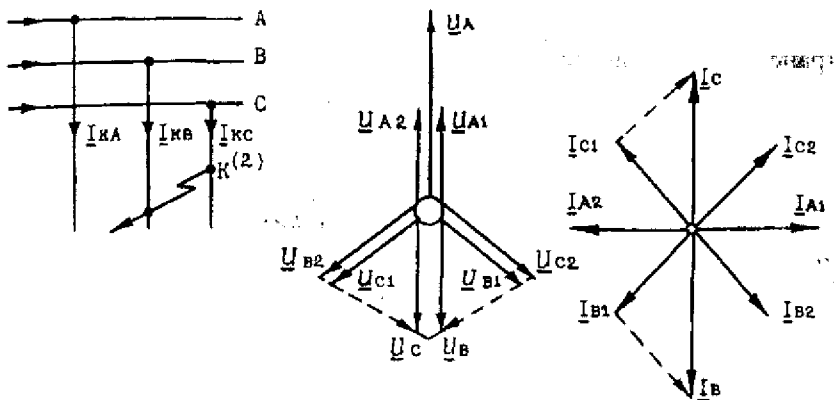


Рис. 8.7. Векторные диаграммы токов и напряжений в месте двухфазного КЗ.

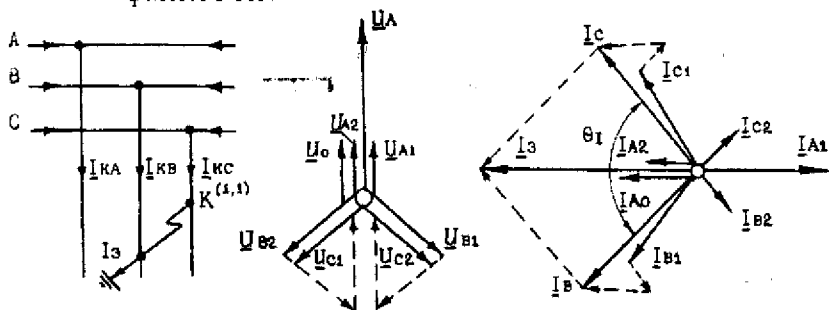


Рис. 8.8. Векторные диаграммы токов и напряжений в месте двухфазного КЗ на землю.

Проследим, как деформируются векторные диаграммы токов и напряжений при переходе через трансформатор. При переходе через трехфазный трансформатор (трехфазную группу однофазных трансформаторов) в нормальном режиме токи и напряжения в общем случае 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. 8.9, где показано соединение обмоток трансформатора по схеме $Y/\Delta-11$. Если число витков фазных об-

моток соответственно равны W_Y и W_Δ , то линейный коэффициент трансформации

$$k = \sqrt{3} W_Y / W_\Delta. \quad (8.73)$$

При заданных фазных токах $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ в соответствии с принятыми на рис. 8.9 положительными направлениями токи в линейных проводах за треугольником

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_a &= \underline{I}_{a\Delta} - \underline{I}_{b\Delta} = (\underline{I}_A - \underline{I}_B) W_Y / W_\Delta = (\underline{I}_A - \underline{I}_B) k / \sqrt{3}; \\ \underline{I}_b &= \underline{I}_{b\Delta} - \underline{I}_{c\Delta} = (\underline{I}_B - \underline{I}_C) W_Y / W_\Delta = (\underline{I}_B - \underline{I}_C) k / \sqrt{3}; \\ \underline{I}_c &= \underline{I}_{c\Delta} - \underline{I}_{a\Delta} = (\underline{I}_C - \underline{I}_A) W_Y / W_\Delta = (\underline{I}_C - \underline{I}_A) k / \sqrt{3}. \end{aligned} \right\} \quad (8.74)$$

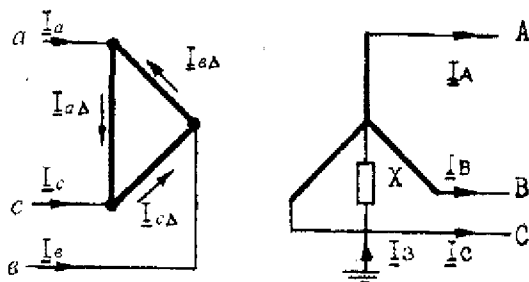


Рис.8.9. Соединение обмоток трансформатора по схеме $Y/\Delta-11$.

Выражения (8.74) можно видоизменить, записав токи через их симметричные составляющие. Так, например, для тока \underline{I}_a получим:

$$\begin{aligned} \underline{I}_a &= (\underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{A0} - a^2 \underline{I}_{A1} - a \underline{I}_{A2} - \underline{I}_{A0}) k / \sqrt{3} = \\ &= [(1 - a^2) \underline{I}_{A1} + (1 - a) \underline{I}_{A2}] k / \sqrt{3} = (\underline{I}_{A1} e^{j30^\circ} + \underline{I}_{A2} e^{-j30^\circ}) k, \end{aligned} \quad (8.75)$$

откуда следует, что линейные токи за треугольником не содержат составляющих нулевой последовательности.

Аналогично могут быть найдены напряжения за рассматриваемым трансформатором. Если $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ - фазные напря-

жения со стороны звезды, включающие в себя падения напряжения в самом трансформаторе, то искомые фазные напряжения со стороны треугольника

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_a &= (\underline{U}_A - \underline{U}_B) / (k\sqrt{3}); \\ \underline{U}_b &= (\underline{U}_B - \underline{U}_C) / (k\sqrt{3}); \\ \underline{U}_c &= (\underline{U}_C - \underline{U}_A) / (k\sqrt{3}) \end{aligned} \right\} \text{ где от с (8.76)}$$

или при их выражении через симметричные составляющие, например для фазы а,

$$\underline{U}_a = (\underline{U}_{A1} e^{j30^\circ} + \underline{U}_{A2} e^{-j30^\circ}) / k. \quad (8.77)$$

Из (8.76) и (8.77) следует, что напряжения на стороне треугольника не зависят от напряжения нулевой последовательности на стороне звезды.

Структура выражений (8.75) и (8.77) показывает, что при переходе со стороны звезды на сторону треугольника трансформатора, обмотки которого соединены по схеме $Y/\Delta-II$, векторы прямой последовательности поворачиваются на 30° в направлении вращения векторов, а векторы обратной последовательности - на 30° в противоположном направлении (рис. 8.10).

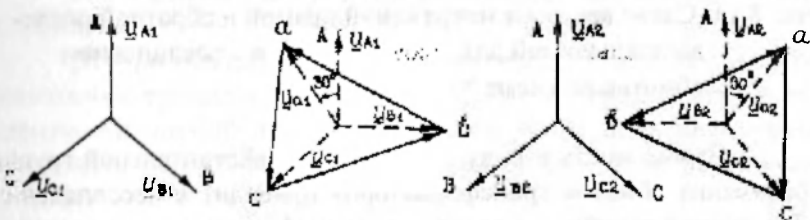


Рис. 8.10. Сдвиг векторов напряжений прямой и обратной последовательностей для трансформатора с соединением обмоток по схеме $Y/\Delta-11$.

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 Y/Y_0 , 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, что его обмотки соединены по группе 3 (или 9). При этом векторы прямой и обратной последовательностей повернуты на 90° в противоположные стороны (рис.8.11). 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 обмоток по схеме Y_0/Δ или Δ/Y_0 достаточно только у векторов обратной последовательности изменить знак на противоположный.

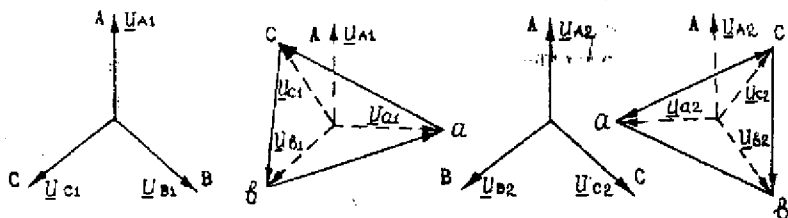


Рис. 8.11. Сдвиг векторов напряжений прямой и обратной последовательностей для трансформатора с соединением обмоток по схеме Y/Δ -9.

Нужно иметь в виду, что отказ от действительной группы соединения обмоток трансформаторов приводит к несовпадению обозначений линейных проводов за трансформатором с маркировкой, соответствующей действительной группе соединений.

Если токи и напряжения выражены в о.е., то при их трансформации должны учитываться лишь угловые сдвиги, обусловленные соответствующей группой соединения обмоток трансформатора.

8.10. Расчет несимметричных коротких замыканий

Как следует из (8.56) и (8.57), для вычисления несимметричных токов КЗ следует пользоваться теми же приемами, которыми пользовались при вычислении трехфазного КЗ. Никаких специальных методов для вычисления тока прямой последова-

тельности и токов в поврежденных фазах при любом виде несимметричных КЗ не требуется, а все делается так же, как и при трехфазном КЗ.

Порядок расчета переходного процесса при любом несимметричном КЗ (аналитически), используя правило эквивалентности прямой последовательности, будет следующим:

1. Задаются базисными условиями (S_0, U_0).
2. Составляются схемы замещения обратной и нулевой последовательности относительно места повреждения, из которых определяются результирующие сопротивления $x_{2рез}$ и $x_{0рез}$.
3. По значениям $x_{2рез}$ и $x_{0рез}$ определяется для рассматриваемого вида КЗ величина дополнительного сопротивления $x_{\Delta}^{(n)}$.
4. Составляется схема замещения прямой последовательности (генераторы и нагрузки вводятся своими ЭДС и сопротивлениями для рассматриваемого режима переходного процесса), в которой действительная точка КЗ удаляется за сопротивление $x_{\Delta}^{(n)}$.
5. Определяется ток прямой последовательности $I_{KI}^{(n)} = \tilde{I}_n^{(n)}$ по (8.56).
6. По выражению (8.57) определяется полный ток в месте повреждения.

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: несимметричные КЗ рассчитываются как симметричное трехфазное с отнесением места КЗ к дополнительному сопротивлению $x_{\Delta}^{(n)}$ для данного вида КЗ (табл. 8.1).

Для расчета несимметричных КЗ в начале составляют схемы замещения всех последовательностей (прямой, обратной и нулевой), используя рекомендации п.7.3. Определяют параметры элементов схем замещения и находят результирующие сопротивления отдельных последовательностей $x_{1рез}, x_{2рез}, x_{0рез}$ относительно точки КЗ, а также результирующую ЭДС прямой последовательности

тельности E_{Σ} относительно той же точки. По значениям $x_{1рез}$, $x_{2рез}$ и $x_{0рез}$ вычисляют эквивалентное сопротивление

$$x_{рез}^{(n)} = x_{1рез} + x_{\Delta}^{(n)} \quad (8.78)$$

комплексной схемы замещения для данного вида несимметричного КЗ.

Чтобы воспользоваться расчетными кривыми (рис. 6.2, 6.3) для приближенного определения тока прямой последовательности в произвольный момент переходного процесса любого несимметричного КЗ, предварительно нужно найти расчетное сопротивление $x_{*рас}^{(n)}$ для данного вида КЗ. С учетом индивидуального изменения токов расчетное сопротивление выделяемой генерирующей j -й ветви при любом несимметричном КЗ по аналогии с (6.3) определяют по формуле

$$x_{*расj}^{(n)} = x_{рез}^{(n)} S_{номj} / (c_j U_{\delta}^2), \quad (8.79)$$

или

$$x_{*расj}^{(n)} = x_{рез}^{(n)} S_{номj} / (c_j S_{\delta}^{(n)}), \quad (8.80)$$

где $x_{рез}^{(n)}$ ($x_{*рез}^{(n)}$) - эквивалентное сопротивление для данного вида несимметричного КЗ, определяемое на основании (8.78), 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 сопротивление обратной последовательности равным результирующему 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. 8.1, определяют токи обратной и нулевой последовательностей, а также напряжения всех последовательностей в месте КЗ. Распределяют токи и напряжения отдельных последовательностей, а также напряжения всех 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

$$I_{\text{кз}}^{(n)} = m^{(n)} I_{\text{ном}\Sigma}^{(n)} \quad (8.81)$$

а при расчете с учетом индивидуального изменения - по формуле

$$I_{\text{кз}}^{(n)} = m^{(n)} \left[I_{*I\text{II}} I_{\text{номI}} + I_{*III} I_{\text{номII}} + \dots \right], \quad (8.82)$$

где $m^{(n)}$ - коэффициент, значения которого для каждого вида КЗ приведены в табл. 8.1; $I_{\text{ном}\Sigma}$ - суммарный номинальный ток генераторов, приведенный к напряжению той ступени, где рассматривается КЗ; $I_{*I\text{II}}, I_{*III}, \dots$ - относительные значения токов прямой последовательности, найденные по расчетным кривым для выделенных ветвей I, II и т.д.; $I_{\text{номI}}, I_{\text{номII}}, \dots$ - номинальные токи тех же ветвей, приведенные к напряжению ступени, где рассматривается КЗ, кА.

Система бесконечной мощности при расчете несимметричных КЗ учитывается так же, как и при расчете трехфазного КЗ. Его взаимное сопротивление определяется выражением

$$x_{*c} = (x_{*I\text{рез}} + x_{*\Delta}^{(n)}) / c_c, \quad (8.83)$$

где c_c - коэффициент распределения для луча, через который в заданной схеме осуществляется связь с системой (если такая система связана с точкой КЗ несколькими лучами, то под c_c следует понимать сумму соответствующих коэффициентов распределения).

Ток прямой последовательности, создаваемый этой системой, рассчитывают по формуле

$$I_{Ic}^{(n)} = I_{\delta} / x_{*c}, \quad (8.84)$$

если сопротивление x_{*c} системы выражено в о.е., или по формуле

$$I_{1c}^{(n)} = U_0 / (\sqrt{3}x_c), \quad (8.85)$$

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 сопротивления $x_{\Delta}^{(n)}$ 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.

8.11. Примеры расчетов

Пример 8.1. Определить величину ударного тока при однофазном КЗ в точке K_2 для схемы (рис. 5.7). Расчет произвести аналитически.

Решение. Примем базисные условия: $S_0 = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $U_0 = 115 \text{ кВ}$;

$$I_0 = S_0 / (\sqrt{3} U_0) = 0,502 \text{ кА}.$$

Схема замещения прямой последовательности изображена на рис. 8.12, в которой ее параметры взяты из рис. 5.8, исключив из нее ветвь с сопротивлениями x_5 и x_6 .

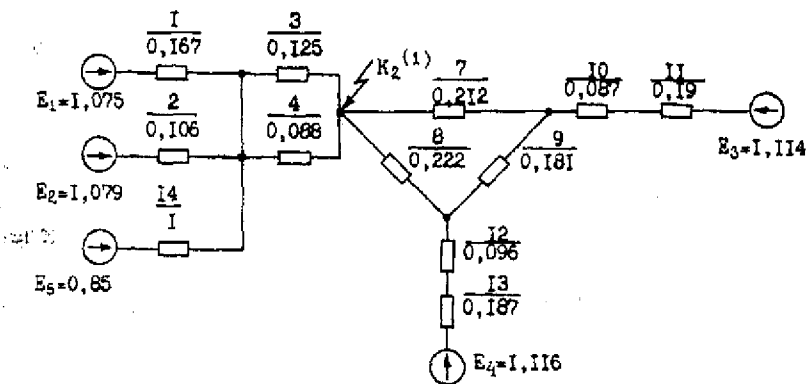


Рис. 8.12. Схема замещения прямой последовательности.

К примеру 8.1.

Используя методы преобразования схем, схему замещения прямой последовательности приведем к виду, приведенному на рис. 8.13.

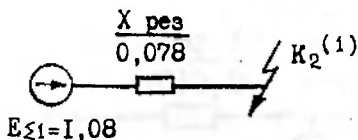


Рис.8.13. К примеру 8.1.

Схема замещения обратной последовательности приведена на рис. 8.14.

Определяем параметры схемы замещения. Значения сопротивлений обратной последовательности генераторов приводятся в каталогах и справочниках. При отсутствии этих данных можно принимать для ТГ с демпферными обмотками $x_2 = 1,22x_1$, а для ГГ без демпферных обмоток $x_2 = 1,45x_1$. Тогда имеем:

$$x_1 = 1,22x_1 = 1,22 \cdot 0,167 = 0,203; \quad x_2 = 1,22 \cdot 0,129 = 0,129;$$

$$x_{11} = 1,45x_1 = 1,45 \cdot 0,19 = 0,275; \quad x_{13} = 1,45 \cdot 0,187 = 0,271.$$

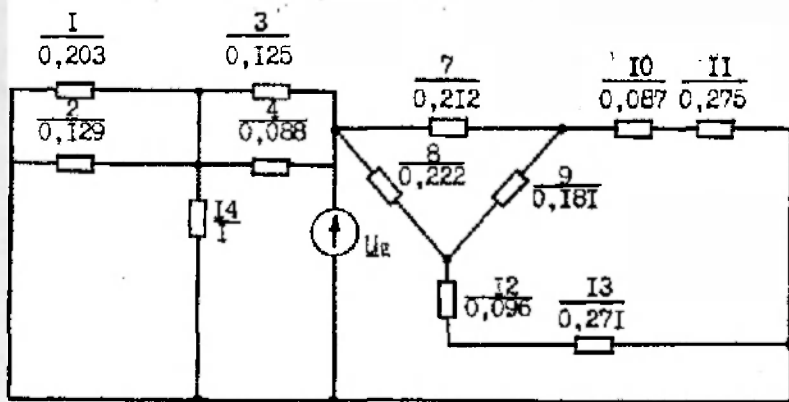


Рис.8.14. Схема замещения обратной последовательности.
К примеру 8.1.

Сопротивления остальных элементов схемы будут такими же как и для прямой последовательности.

Используя методы преобразования схем, схему замещения обратной последовательности приведем к виду, представленному на рис. 8.15.

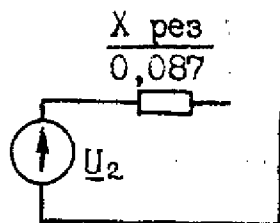


Рис.8.15. К примеру 8.1.

Схема замещения нулевой последовательности для рассматриваемого примера будет иметь вид, приведенный на рис. 8.16.

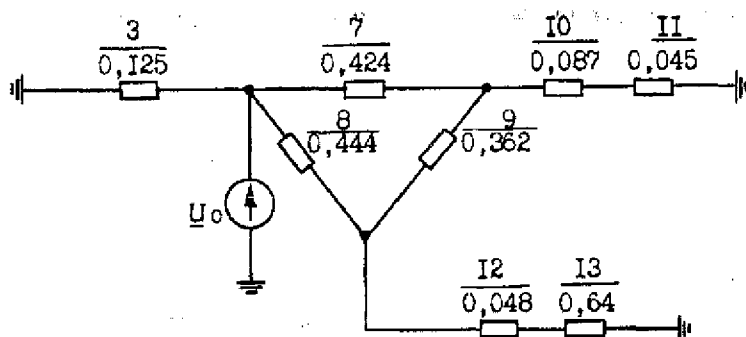


Рис. 8.16. Схема замещения нулевой последовательности.
К примеру 8.1.

Определим сопротивления всех элементов, вошедших в схему нулевой последовательности:

Трансформатор Т1 - $x_3=0,125$; Трансформатор Т3 - $x_{10}=0,087$;

Трансформатор Т4 - $x_{12}=0,5x_{12}=0,5 \cdot 0,096=0,048$;

$$x_{13}=x_{10}S_{T4}/S_{ном}=0,8 \cdot 100/125=0,64.$$

Считаем, что линии в схеме одноцепные с хорошо проводящими тросами:

$$W1 - x_7 = 2x_7 = 2 \cdot 0,212 = 0,424;$$

$$W2 - x_8 = 2x_8 = 2 \cdot 0,222 = 0,444;$$

$$W3 - x_9 = 2x_9 = 2 \cdot 0,181 = 0,362.$$

Так как через сопротивление заземления нейтрали трансформатора ТЗ протекает утроенное значение тока нулевой последовательности, его вводим в схему замещения утроенным значением:

$$x_{11} = 3x_N S_\sigma / U_{cp}^2 = 3 \cdot 2 \cdot 100 / 115^2 = 0,045.$$

После преобразования треугольника в звезду, последовательного и параллельного сложений соответствующих сопротивлений схема преобразуется к виду, приведенному на рис. 8.17, где $x_{0рез} = 0,092$.

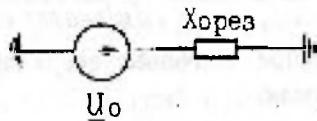


Рис. 8.17. К примеру 8.1.

Зная сопротивления всех последовательностей, определим, используя правило Щедрина, ток прямой последовательности в месте повреждения:

$$I_{*1}^{(1)} = E_\Sigma / (x_{1рез} + x_{2рез} + x_{0рез}) = 1,08 / (0,078 + 0,087 + 0,092) = 4,2.$$

Определим полный ток однофазного КЗ в месте повреждения:

$$I_{*1}^{(1)} - I_{*1}^{(1)} \cdot m^{(1)} = 4,2 \cdot 3 = 12,6.$$

Действительное значение периодической составляющей тока КЗ определяется

$$I^{(1)} = I_{*1}^{(1)} \cdot I_\sigma = 12,6 \cdot 0,502 = 6,325 \text{ кА.}$$

Ударный ток однофазного КЗ

$$i_y^{(1)} = \sqrt{2} k_y I^{(1)} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 6,32 = 16,1 \text{ кА.}$$

Пример 8.2. Определить величину сверхпереходного тока в месте повреждения при двухфазном КЗ на землю для схемы рис.5.7.

Решение. Данными по составлению и расчету схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей воспользуемся из примера 8.1.

Ток прямой последовательности в соответствии с правилом Щедрина будет определяться

$$I_{*1}^{(1,1)} = E_{\Sigma} / \left[x_{1\text{рез}} + x_{2\text{рез}} x_{0\text{рез}} / (x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}) \right] = \\ = 1,08 / \left[0,078 + 0,087 \cdot 0,092 / (0,087 + 0,092) \right] = 8,8.$$

Полный ток двухфазного КЗ на землю будет равен

$$I_{*}^{(1,1)} = m^{(1,1)} \cdot I_{*1}^{(1,1)} = 1,5 \cdot 8,8 = 13,2,$$

где

$$m^{(1,1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - x_{2\text{рез}} x_{0\text{рез}} / (x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}})^2} = \sqrt{3} \sqrt{1 - 0,087 \cdot 0,092 / (0,087 + 0,092)^2} = 1,5.$$

Действительное значение сверхпереходного тока при двухфазном КЗ на землю

$$I^{(1,1)} = I_{*}^{(1,1)} \cdot I_{\text{б}} = 13,2 \cdot 0,502 = 6,63 \text{ кА}.$$

Пример 8.3. Определить величину тока, протекающего через нейтраль трансформатора ТЗ при двухфазном КЗ на землю в точке К₂ для схемы рис.5.7.

Решение. Воспользуемся результатами расчета примеров (8.1) и (8.2). Через нейтраль трансформатора будет протекать утроенное значение тока нулевой последовательности трансформатора ТЗ при КЗ в точке К₂.

Значение тока нулевой последовательности в месте повреждения при двухфазном КЗ на землю определяется

$$I_{*0}^{(1,1)} = I_{*1}^{(1,1)} x_{2\text{рез}} / (x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}) = 8,8 \cdot 0,087 / (0,087 + 0,092) = 4,28.$$

Этот ток распределяется по отдельным ветвям схемы нулевой последовательности. Поэтому схему нулевой последовательности (рис.8.16) приведем к виду, представленному на рис.8.18.

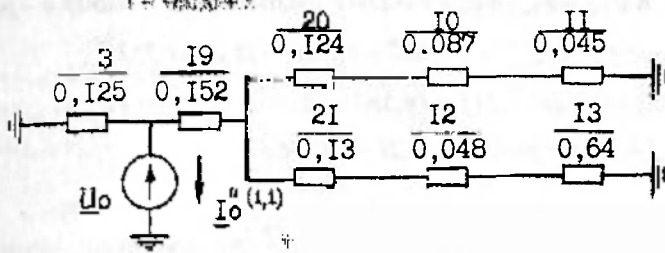


Рис. 8.18. К примеру 8.3.

Для расчета распределения тока $I_{*025}^{(1,1)}$ по отдельным ветвям определим эквивалентное сопротивление правой части схемы:

$$x_{22} = x_{20} + x_{10} + x_{11} = 0,124 + 0,087 + 0,045 = 0,256;$$

$$x_{23} = x_{21} + x_{12} + x_{13} = 0,13 + 0,048 + 0,64 = 0,818;$$

$$x_{24} = x_{22} \cdot x_{23} / (x_{22} + x_{23}) = 0,256 \cdot 0,818 / (0,256 + 0,818) = 0,195;$$

$$x_{25} = x_{24} + x_{19} = 0,195 + 0,152 = 0,347.$$

Определим ток, протекающий через сопротивление x_{25}

$$I_{*025}^{(1,1)} = I_{*0}^{(1,1)} \cdot x_{25} / (x_{25} + x_{23}) = 4,28 \cdot 0,125 / (0,125 + 0,347) = 1,13.$$

Этот ток обратно пропорционально распределяется по ветвям с сопротивлениями x_{22} и x_{23} :

$$I_{*022}^{(1,1)} = I_{*025}^{(1,1)} \cdot x_{23} / (x_{22} + x_{23}) = 1,13 \cdot 0,818 / (0,256 + 0,818) = 0,86.$$

Этот ток протекает по трансформатору ТЗ, а через нейтраль этого трансформатора будет протекать утроенное значение тока $I_{*022}^{(1,1)}$.

$$I_{*NT3} = 3I_{*022}^{(1,1)} = 3 \cdot 0,86 = 2,58.$$

Определим значение этого тока в кА:

$$I_{NT3} = I_{*NT3} \cdot I_6 = 2,58 \cdot 0,502 = 1,3 \text{ кА}.$$

Пример 8.4. Построить векторную диаграмму напряжений в точке А при однофазном КЗ в точке K_2 для схемы рис. 5.7.

Решение. Для расчета и построения воспользуемся данными из примера 8.1. Зная ток прямой последовательности, можно определить значения напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей в месте повреждения:

$$I_{*1}^{(1)} = E_{\Sigma} / j(x_{1\text{пов}} + x_{2\text{пов}} + x_{0\text{пов}}) = 1,08 / j(0,078 + 0,087 + 0,092) = -j4,2;$$

$$U_{*A1} = j(x_{2\text{пов}} + x_{0\text{пов}}) I_{*1}^{(1)} = j(0,087 + 0,092)(-j4,2) = 0,752e^{j0^\circ};$$

$$U_{A1} = U_{*A1} \cdot U_{\phi} = 0,752e^{j0^\circ} \cdot 115 = 86,5e^{j0^\circ}, \text{кВ};$$

$$U_{*A2} = -jx_{2\text{пов}} I_{*1}^{(1)} = -j0,087(-j4,2) = -0,366e^{j180^\circ};$$

$$U_{A2} = U_{*A2} \cdot U_{\phi} = -0,366e^{j180^\circ} \cdot 115 = -42,1e^{j180^\circ}, \text{кВ};$$

$$U_{*A0} = -jx_{0\text{пов}} \cdot I_{*1}^{(1)} = -j0,092(-j4,2) = -0,386e^{j180^\circ};$$

$$U_{A0} = U_{*A0} \cdot U_{\phi} = -0,386e^{j180^\circ} \cdot 115 = -44,4e^{j180^\circ}, \text{кВ};$$

$$U_{B1} = U_{A1} \cdot a^2 = 86,5e^{j240^\circ}, \text{кВ};$$

$$U_{B2} = U_{A2} \cdot a = -42,1e^{j180^\circ} \cdot e^{j120^\circ} = -42,1e^{j300^\circ}, \text{кВ};$$

$$U_{C1} = U_{A1} \cdot a = 86,5e^{j120^\circ}, \text{кВ};$$

$$U_{C2} = U_{A2} \cdot a^2 = -42,1e^{j180^\circ} \cdot e^{j240^\circ} = -42,1e^{j60^\circ}, \text{кВ}$$

$$U_{B0} = U_{C0} = U_{A0} = -44,4e^{j180^\circ}, \text{кВ}.$$

Примем группу соединения трансформаторов Т1 и Т2 $Y/\Delta-11$. Коэффициент трансформации этих трансформаторов $\kappa = 115/6,3 = 18,25$.

Определяем составляющие напряжения в точке А (на стороне треугольника)

$$U_{a1} = U_{A1} e^{j30^\circ} / \kappa = 86,5e^{j30^\circ} / 18,25 = 4,74e^{j30^\circ}, \text{кВ};$$

$$U_{a1} = U_{B1} e^{j30^\circ} / \kappa = 86,5e^{j240^\circ} \cdot e^{j30^\circ} / 18,25 = 4,74e^{j270^\circ}, \text{кВ};$$

$$U_{c1} = U_{C1} e^{j30^\circ} / \kappa = 86,5e^{j120^\circ} \cdot e^{j30^\circ} / 18,25 = 4,74e^{j150^\circ}, \text{кВ};$$

$$U_{a2} = U_{A2} e^{-j30^\circ} / \kappa = (-42,1e^{j180^\circ}) e^{-j30^\circ} / 18,25 = -2,3e^{j150^\circ}, \text{кВ};$$

$$U_{a2} = U_{B2} e^{-j30^\circ} / \kappa = (-42,1e^{j300^\circ}) e^{-j30^\circ} / 18,25 = -2,3e^{j270^\circ}, \text{кВ};$$

$$U_{c2} = U_{C2} e^{-j30^\circ} / \kappa = (-42,1e^{j60^\circ}) e^{-j30^\circ} / 18,25 = -2,3e^{j30^\circ}, \text{кВ}.$$

Фазные напряжения на стороне треугольника (точка А)

$$\underline{U}_a = \underline{U}_{a1} + \underline{U}_{a2} = 4,74e^{j30^\circ} - 2,3e^{j150^\circ} = 4,11 + j2,37 + 1,99 - j1,15 = 6,1 + j1,22 = 6,22e^{j11^\circ}, \text{кВ},$$

$$\underline{U}_b = \underline{U}_{b1} + \underline{U}_{b2} = 4,74e^{j270^\circ} - 2,3e^{j270^\circ} = -j4,74 + j2,3 = -j2,44 = 2,44e^{j270^\circ}, \text{кВ},$$

$$\underline{U}_c = \underline{U}_{c1} + \underline{U}_{c2} = 4,74e^{j150^\circ} - 2,3e^{j30^\circ} = -4,11 + j2,37 - 1,99 - j1,15 = -6,1 + j1,22 = 6,22e^{j169^\circ}, \text{кВ}.$$

Выбрав масштаб, строим на комплексной плоскости векторную диаграмму напряжений в точке А, которая приведена на рис. 8.19.

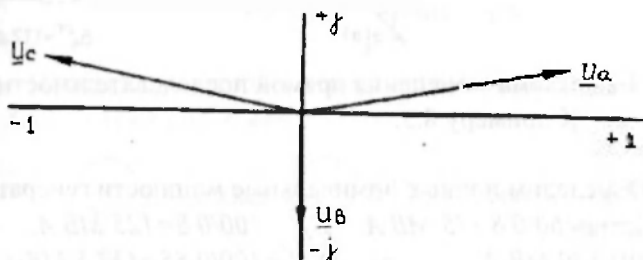


Рис. 8.19. Векторная диаграмма напряжений в точке А при однофазном КЗ.

Пример 8.5. Определить установившийся и сверхпереходный токи для схемы рис. 5.7 при двухфазном КЗ в точке K_2 . Расчет произвести по индивидуальному изменению тока.

Решение. Примем базисные условия: $S_0 = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $U_0 = 115 \text{ кВ}$;

$$I_0 = S_0 / (\sqrt{3} U_0) = 100 / \sqrt{3} \cdot 115 = 0,502 \text{ кА}.$$

Для расчета двухфазного КЗ необходимо составить схемы замещения прямой и обратной последовательностей. При их составлении воспользуемся данными из примера 8.1.

Схема обратной последовательности имеет вид (рис. 8.14) и ее результирующее сопротивление $x_{2\text{рез}} = 0,087$.

Величина дополнительного сопротивления для двухфазного КЗ $x_{\Delta}^{(2)} = x_{2\text{рез}} = 0,087$.

Схема прямой последовательности приведена на рис. 8.20, в которой действительная точка КЗ $K_2^{(2)}$ удалена на величину шунта $x_{\Delta}^{(2)}$ (согласно правила Щедрина) и ее параметры взяты из рис. 8.12. В этой схеме генераторы вместо ЭДС введены своими

полными номинальными мощностями $S_{ном}$, а также не введена нагрузка, поскольку она учтена при построении расчетных кривых.

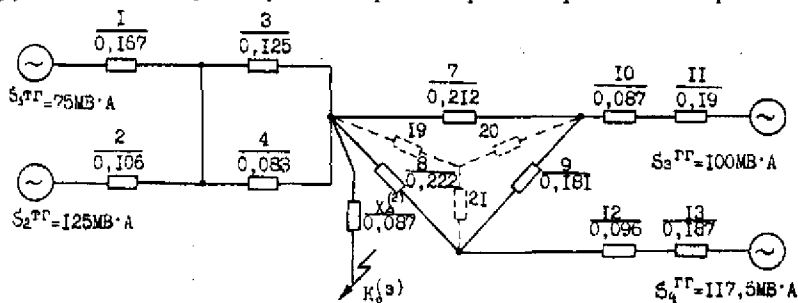


Рис. 8.20. Схема замещения прямой последовательности.

К примеру 8.5.

Определим полные номинальные мощности генераторов:

$$S_1^{IT} = P_{ном} / \cos \varphi = 60 / 0,8 = 75 \text{ MB} \cdot \text{A}; \quad S_2^{IT} = 100 / 0,8 = 125 \text{ MB} \cdot \text{A};$$

$$S_3^{IT} = 80 / 0,8 = 100 \text{ MB} \cdot \text{A}; \quad S_4^{IT} = 100 / 0,85 = 117,5 \text{ MB} \cdot \text{A}.$$

Преобразуем схему к лучевому виду, используя известные методы для линейных электрических цепей:

$$x_{15} = x_1 + x_3 = 0,167 + 0,125 = 0,292;$$

$$x_{16} = x_2 + x_4 = 0,106 + 0,088 = 0,194;$$

$$x_{17} = x_{10} + x_{11} = 0,087 + 0,19 = 0,277;$$

$$x_{18} = x_{12} + x_{13} = 0,096 + 0,187 = 0,283.$$

Заменим треугольник с сопротивлениями 7-9 звездой с сопротивлениями 19-21:

$$x_{19} = x_7 x_8 / (x_7 + x_8 + x_9) = 0,212 \cdot 0,222 / (0,212 + 0,222 + 0,181) = 0,076;$$

$$x_{20} = x_7 x_9 / (x_7 + x_8 + x_9) = 0,212 \cdot 0,181 / (0,212 + 0,222 + 0,181) = 0,062;$$

$$x_{21} = x_8 x_9 / (x_7 + x_8 + x_9) = 0,222 \cdot 0,181 / (0,212 + 0,222 + 0,181) = 0,065.$$

Сделаем дальнейшие преобразования:

$$x_{22} = x_{17} + x_{20} = 0,277 + 0,062 = 0,339;$$

$$x_{23} = x_{18} + x_{21} = 0,283 + 0,065 = 0,348.$$

Лучи с мощностями S_1^{IT} и S_2^{IT} заменим эквивалентным с мощностью S^{IT} и сопротивлением x_{24}

$$S^{IT} = S_1^{IT} + S_2^{IT} = 75 + 125 = 200 \text{ MB} \cdot \text{A};$$

$$x_{24} = x_{15} x_{16} / (x_{15} + x_{16}) = 0,292 \cdot 0,194 / (0,292 + 0,194) = 0,117.$$

Эквивалентуем лучи с мощностями S_3^{IT} и S_4^{IT} :

$$S^{IT} = S_3^{IT} + S_4^{IT} = 100 + 117,5 = 217,5 \text{ MB} \cdot \text{A};$$

$$x_{25} = x_{22} x_{23} / (x_{22} + x_{23}) + x_{19} = 0,339 \cdot 0,348 / (0,339 + 0,348) + 0,076 = 0,248.$$

После этих преобразований получаем схему, приведенную на рис. 8.21.

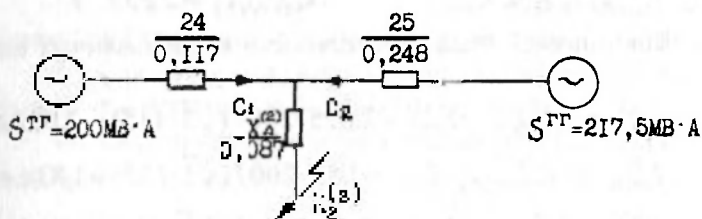


Рис. 8.21. К примеру 8.5.

Пользуясь способом токораспределения, приводим схему рис. 8.21 к схеме рис. 8.22.

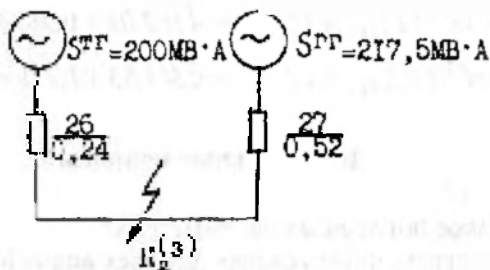


Рис. 8.22. К примеру 8.5.

$$x_{экв} = x_{24} \cdot x_{25} / (x_{24} + x_{25}) = 0,117 \cdot 0,248 / (0,117 + 0,248) = 0,079;$$

$$x_{рез} = x_{экв} + x_{д}^{(2)} = 0,079 + 0,087 = 0,166;$$

$$c_1 = x_{экв} / x_{24} = 0,079 / 0,117 = 0,68;$$

$$c_2 = x_{экв} / x_{25} = 0,079 / 0,248 = 0,32;$$

$$x_{26} = x_{рез} / c_1 = 0,166 / 0,68 = 0,24;$$

$$x_{27} = x_{рез} / c_2 = 0,166 / 0,32 = 0,52.$$

Определим расчетные сопротивления каждого луча:

$$x_{*расч1}^{(2)} = x_{26} \cdot S^{ГГ} / S_{\varepsilon} = 0,24 \cdot 200 / 100 = 0,48;$$

$$x_{*расчГ}^{(2)} = x_{27} \cdot S^{ГГ} / S_{\varepsilon} = 0,52 \cdot 217,5 / 100 = 1,131.$$

Считаем, что все генераторы с АРВ. По расчетным кривым (рис.6.2 и 6.3) определяем относительные значения токов прямой последовательности в ветвях:

$$I_{*I=0(TT)}^{(2)} = 2,075; \quad I_{*I=\infty(TT)}^{(2)} = 1,82;$$

$$I_{*I=0(1T)}^{(2)} = 0,95; \quad I_{*I=\infty(1T)}^{(2)} = 1,13.$$

Токи прямой последовательности в именованных единицах:

$$I_{1(TT)}^{(2)} = I_{*I=0(TT)}^{(2)} \cdot I_{НТТ} = 2,075 \cdot 200 / (\sqrt{3} \cdot 115) = 2,09 \text{ кА} ;$$

$$I_{1\infty(TT)}^{(2)} = I_{*I=\infty(TT)}^{(2)} \cdot I_{НТТ} = 1,82 \cdot 200 / (\sqrt{3} \cdot 115) = 1,83 \text{ кА} ;$$

$$I_{1(1T)}^{(2)} = I_{*I=0(1T)}^{(2)} \cdot I_{НТТ} = 0,95 \cdot 217,5 / (\sqrt{3} \cdot 115) = 0,96 \text{ кА} ;$$

$$I_{1\infty(1T)}^{(2)} = I_{*I=\infty(1T)}^{(2)} \cdot I_{НТТ} = 1,13 \cdot 217,5 / (\sqrt{3} \cdot 115) = 1,23 \text{ кА} .$$

Пользуясь выражением (8.82), определяем величину периодической составляющей тока в точке К₂:

$$I^{(2)} = m^{(2)} (I_{1(TT)}^{(2)} + I_{1(1T)}^{(2)}) = \sqrt{3} (2,09 + 0,96) = 5,28 \text{ кА} ;$$

$$I_{\infty}^{(2)} = m^{(2)} (I_{1\infty(TT)}^{(2)} + I_{1\infty(1T)}^{(2)}) = \sqrt{3} (1,83 + 1,23) = 5,29 \text{ кА} .$$

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?
11. В чем заключается правило эквивалентности прямой последовательности?
12. Что представляют собой комплексные схемы замещения?

13. Каковы соотношения между токами трехфазного КЗ и несимметричных КЗ?

14. В каких практических случаях возникают наибольшие (наименьшие) значения кратности токов несимметричных КЗ?

15. Как деформируются векторные диаграммы токов и напряжений при переходе через трансформатор?

16. Как определяются токи несимметричных КЗ по расчетным кривым?

ПРОДОЛЬНАЯ НЕСИММЕТРИЯ И СЛОЖНЫЕ ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ

9.1. 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 ЭЭС. Расчет этот необходим для выбора элементов ЭЭС, релейной защиты, а также анализа работы устройств системной автоматики.

Продольную несимметрию в какой-либо точке трехфазной системы в общем виде можно представить включением в рассечку каждой фазы неодинаковых сопротивлений. При этом исходят из следующего условия, рассматривая только основную гармонику режима; разрыв фазы тождественен 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 А, принятой за основную:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \underline{U}_{LA} &= \Delta \underline{U}_{LA1} + \Delta \underline{U}_{LA2} + \Delta \underline{U}_{LA0}; \\ \Delta \underline{U}_{LB} &= \Delta \underline{U}_{LA1} a^2 + \Delta \underline{U}_{LA2} a + \Delta \underline{U}_{LA0}; \\ \Delta \underline{U}_{LC} &= \Delta \underline{U}_{LA1} a + \Delta \underline{U}_{LA2} a^2 + \Delta \underline{U}_{LA0}; \end{aligned} \right\} \quad (9.1)$$

и

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_{LA} &= \underline{I}_{LA1} + \underline{I}_{LA2} + \underline{I}_{LA0}; \\ \underline{I}_{LB} &= \underline{I}_{LA1} a^2 + \underline{I}_{LA2} a + \underline{I}_{LA0}; \\ \underline{I}_{LC} &= \underline{I}_{LA1} a + \underline{I}_{LA2} a^2 + \underline{I}_{LA0}; \end{aligned} \right\} \quad (9.2)$$

где \underline{I}_{LA} , \underline{I}_{LB} , \underline{I}_{LC} и $\Delta \underline{U}_{LA}$, $\Delta \underline{U}_{LB}$, $\Delta \underline{U}_{LC}$ - токи и падения напряжения для несимметричной системы фазных величин А, В, С;

$\underline{I}_{LA1}, \underline{I}_{LA2}, \underline{I}_{LA0}$ и $\Delta\underline{U}_{LA1}, \Delta\underline{U}_{LA2}, \Delta\underline{U}_{LA0}$ - 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.

$$\left. \begin{aligned} \underline{E}_{A\Sigma} &= \Delta\underline{U}_{LA1} + jx_{1рез} \underline{I}_{LA1}; \\ 0 &= \Delta\underline{U}_{LA2} + jx_{2рез} \underline{I}_{LA2}; \\ 0 &= \Delta\underline{U}_{LA0} + jx_{0рез} \underline{I}_{LA0}, \end{aligned} \right\} \quad (9.3)$$

где $\underline{E}_{A\Sigma}$ - суммарная ЭДС источников питания, действующая только в схеме прямой последовательностей;
 $x_{1рез}, x_{2рез}, x_{0рез}$ - 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 (9.1)-(9.3) 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 несимметрия в разных комбинациях, которые приводят к сложным видам повреждений. Причинами появления таких повреждений в ЭЭС могут быть наложения как аварийных режимов, так и аварийного режима с процессом его отключения (например, неодновременное отключение несимметричного КЗ выключателями в сети с двухсторонним питанием, появление несимметричных КЗ в нескольких точках электрической сети, обрыв фазы с замыканием на землю одного из концов оборванного провода и т.п.).

При однократной несимметрии, поперечной или продольной, составляется 6 уравнений, с помощью которых устанавливается связь между симметричными составляющими токов и напряжений в месте повреждения. При двукратной несимметрии определению подлежат 12 неизвестных (симметричные составляющие отдельных последовательностей токов и напряжений в каждом из мест повреждений). Поэтому для анализа таких видов повреждений необходимо составить 12 уравнений : 6 уравнений получается из граничных условий и 6 уравнений, связывающие симметричные составляющие напряжений и токов в каждом из мест повреждений.

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 высоковольтных выключателей, перегорании предохранителей в одной или двух фазах, несинхронном включении синхронных машин, аварийном отключении фаз ЛЭП.

9.2. Разрыв одной фазы трехфазной цепи

При разрыве одной фазы трехфазной цепи (рис. 9.1) возникает несимметричный режим, характеризующийся следующими граничными условиями:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_{LA} &= 0; \\ \Delta \underline{U}_{LB} &= 0; \\ \Delta \underline{U}_{LC} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (9.4)$$

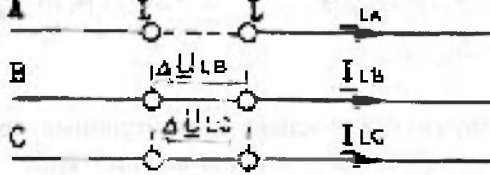


Рис. 9.1. Трехфазная цепь с разрывом фазы А в месте L-L'.

Эти условия аналогичны граничным условиям двухфазного КЗ на землю, причем данная аналогия найдет свое отражение и в расчетных выражениях.

Для анализа рассматриваемого режима в разрыв фазы вводят источник продольного напряжения $\Delta \underline{U}_{LA}$ (рис.9.2,а) и составляют схемы замещения отдельных последовательностей (рис.9.2,б-г).

Из сравнения падений напряжений для неповрежденных фаз, выраженных через симметричные составляющие следует

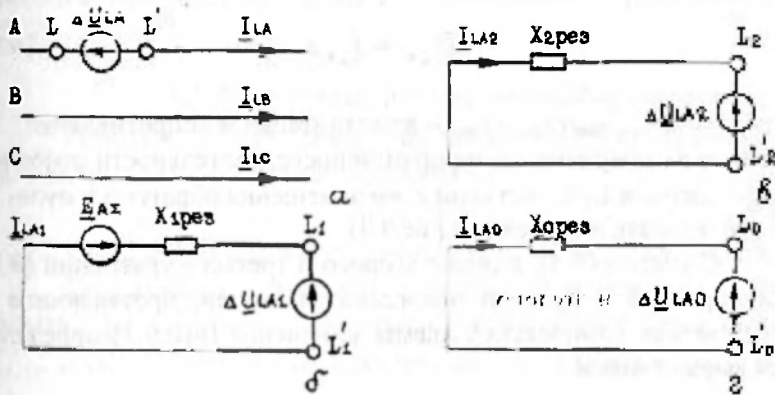


Рис. 9.2. Исходная схема для анализа нарушения продольной симметрии при разрыве фазы А в месте L-L' (а) и схемы замещения прямой (б), обратной (в) и нулевой (г) последовательностей.

$$a^2 \Delta \underline{U}_{LA1} + a \Delta \underline{U}_{LA2} + \Delta \underline{U}_{LA0} = a \Delta \underline{U}_{LA1} + a^2 \Delta \underline{U}_{LA2} + \Delta \underline{U}_{LA0} \Rightarrow \Delta \underline{U}_{LA1} = \Delta \underline{U}_{LA2}$$

$$\Delta \underline{U}_{LB} = (a^2 + a)\Delta \underline{U}_{LA1} + \Delta \underline{U}_{LA0} = -\Delta \underline{U}_{LA1} + \Delta \underline{U}_{LA0} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta \underline{U}_{LA1} = \Delta \underline{U}_{LA0}.$$

Таким образом, на основе симметричных составляющих граничные условия (9.4) могут быть записаны в виде

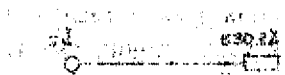
$$\Delta \underline{U}_{LA1} = \Delta \underline{U}_{LA2} = \Delta \underline{U}_{LA0} = \Delta \underline{U}_{LA} / 3; \quad (9.5)$$

$$\underline{I}_{LA1} = -(\underline{I}_{LA2} + \underline{I}_{LA0}). \quad (9.6)$$

По этим уравнениям может быть синтезирована комплексная схема замещения рассматриваемого нарушения продольной симметрии (рис. 9.3). По ней составляют расчетные выражения для определения тока прямой последовательности

$$\underline{I}_{LA1} = \underline{E}_{A\Sigma} / (x_{1pez} + x_{LL1}) \quad \text{мм} \quad (9.7)$$

и падения напряжения прямой последовательности в месте разрыва



$$\Delta \underline{U}_{LA1} = \underline{I}_{LA1} x_{LL1}, \quad \text{мм} \quad (9.8)$$

где $x_{LL1} = x_{2pez} x_{0pez} / (x_{2pez} + x_{0pez})$ - дополнительное сопротивление, вносимое в схему замещения прямой последовательности относительно зажимов L_1-L_1 ветвями схем замещения обратной и нулевой последовательностей (см.рис.9.3).

С учетом (9.5), а также второго и третьего уравнений (9.3) токи обратной и нулевой последовательностей, протекающие в других ветвях комплексной схемы замещения (рис.9.3) определяются выражениями

$$\underline{I}_{LA2} = -\underline{I}_{LA1} x_{0pez} / (x_{2pez} + x_{0pez}) = -\underline{I}_{LA1} x_{LL1} / x_{2pez}; \quad (9.9)$$

$$\underline{I}_{LA0} = -\underline{I}_{LA1} x_{2pez} / (x_{2pez} + x_{0pez}) = -\underline{I}_{LA1} x_{LL1} / x_{0pez}. \quad (9.10)$$

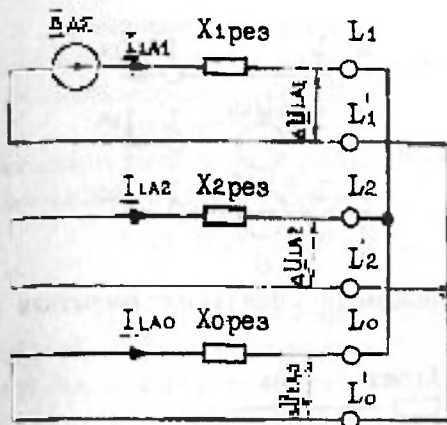


Рис. 9.3. Комплексная схема замещения нарушения продольной симметрии при разрыве фазы А.

Полученные расчетные соотношения (9.5)-(9.11) представляют собой уравнения связи симметричных составляющих параметров режима особой фазы. Токи и напряжения других фаз выражаются через оператор фазы с использованием уравнений (9.1) и (9.2).

9.3. Разрыв двух фаз трехфазной цепи

Разрыв двух фаз трехфазной цепи (рис.9.4,а) характеризуется следующими граничными условиями:

$$\underline{I}_{LB} = 0; \underline{I}_{LC} = 0; \Delta \underline{U}_{LA} = 0, \quad (9.12)$$

т.е. они аналогичны граничным условиям однофазного КЗ.

По аналогии с разрывом одной фазы включаем в местах разрыва фаз В и С источники продольного напряжения $\Delta \underline{U}_{LB}$ и $\Delta \underline{U}_{LC}$ (рис.9.4,б). Полученная таким образом расчетная схема позволяет составить комплексную схему замещения (рис.9.5). Приняв в качестве основной неповрежденную фазу А, граничные условия (9.12), выраженные через симметричные составляющие, можно записать в следующем виде:

$$\underline{I}_{LB} = a^2 \underline{I}_{LA1} + a \underline{I}_{LA2} + \underline{I}_{LA0}; \quad (9.13)$$

$$\underline{I}_{LC} = a \underline{I}_{LA1} + a^2 \underline{I}_{LA2} + \underline{I}_{LA0}. \quad (9.14)$$

В соответствии с (9.5) и (9.3) напряжение источника продольного напряжения, включаемого в месте повреждения, определяется выражением

$$\Delta \underline{U}_{LA} = 3 \underline{E}_{A\Sigma} x_{LL1} / (x_{1рез} + x_{LL1}). \quad (9.11)$$

Полученные расчетные соотношения (9.5)-(9.11) представляют собой уравнения связи симметричных составляющих параметров режима особой фазы.

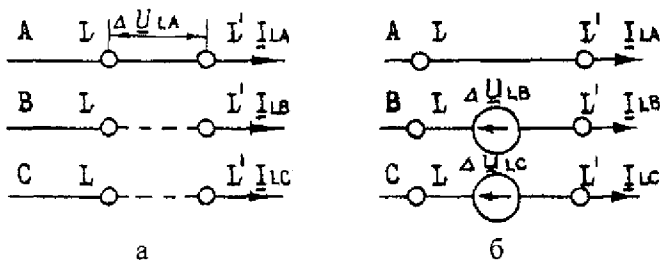


Рис. 9.4. Трехфазная цепь с разрывом двух фаз (а) и ее расчетная схема (б).

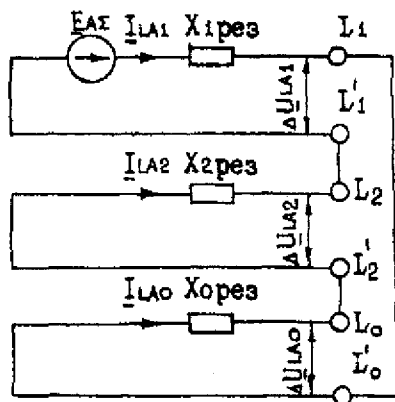


Рис. 9.5. Комплексная схема замещения нарушения продольной симметрии при разрыве фаз В и С.

Из разности полученных уравнений следует, что

$$\underline{I}_{LA1} = \underline{I}_{LA2}. \quad (9.15)$$

После подстановки тождества (9.15) в уравнения (9.13) и (9.14) и соответствующих преобразований получим равенство

$$\underline{I}_{LA1} = \underline{I}_{LA2} = \underline{I}_{LA0} = \underline{I}_{LA} / 3. \quad (9.16)$$

Разложение граничного условия $\Delta \underline{U}_{LA} = 0$ на симметричные составляющие позволяет записать равенство

$$\Delta \underline{U}_{LA1} = -(\Delta \underline{U}_{LA2} + \Delta \underline{U}_{LA0}), \quad (9.17)$$

которое вместе с равенством (9.16) характеризует граничные условия данного вида повреждения на основе симметричных составляющих, отнесенные к фазе А.

Синтезированная по (9.16) и (9.17) комплексная схема замещения фазы А изображена на рис. 9.5. По ней определяем симметричные составляющие токов

$$\underline{I}_{LA1} = \underline{I}_{LA2} = \underline{I}_{LA0} = \underline{E}_{A\Sigma} / (x_{1pez} + x_{2pez} + x_{0pez}) . \quad (9.18)$$

Падения напряжений обратной и нулевой последовательностей находим из уравнения (9.3). При этом напряжение прямой последовательности определяется выражением

$$\Delta \underline{U}_{LA1} = \underline{E}_{A\Sigma} (x_{2pez} + x_{0pez}) / (x_{1pez} + x_{2pez} + x_{0pez}) . \quad (9.19)$$

По симметричным составляющим параметров режима фазы А на основании уравнений (9.1)-(9.3) можно рассчитать токи и напряжения в месте повреждения.

9.4. Включение в фазы неодинаковых сопротивлений

Рассмотрим случай, когда в одну или в две фазы включаются сопротивления z (рис. 9.6). Такие условия могут возникнуть, например, при неодновременном расхождении контактов полюсов выключателя, при котором дуга отключаемого тока возникает еще не на всех полюсах.

Включение сопротивления z в одну фазу трехфазной цепи характеризуется следующими граничными условиями:

$$\Delta \underline{U}_{LA} = \underline{I}_{LA} z; \quad \Delta \underline{U}_{LB} = 0; \quad \Delta \underline{U}_{LC} = 0 . \quad (9.20)$$

При рассмотрении этого несимметричного режима используем тот же прием, что и в п.9.2, введя в фазу вместо сопротивления z источник продольного напряжения $\Delta \underline{U}_{LA}$ (рис. 9.6,а). При $z \rightarrow \infty$ граничные условия (9.20) вырождаются в частный случай граничных условий разрыва фазы (9.4), так как

$$\underline{I}_{LA} = \Delta \underline{U}_{LA} / z \Big|_{z \rightarrow \infty} = 0 . \quad (9.21)$$

Анализ несимметричного режима при $z \neq \infty$ становится более общим.

При разложении граничных условий (9.20) на симметричные составляющие, отнесенные к особой фазе А, остается действительным ранее полученное тождество (9.5) и кроме того

$$\Delta \underline{U}_{LA} = (\underline{I}_{LA1} + \underline{I}_{LA2} + \underline{I}_{LA0}) z . \quad (9.22)$$

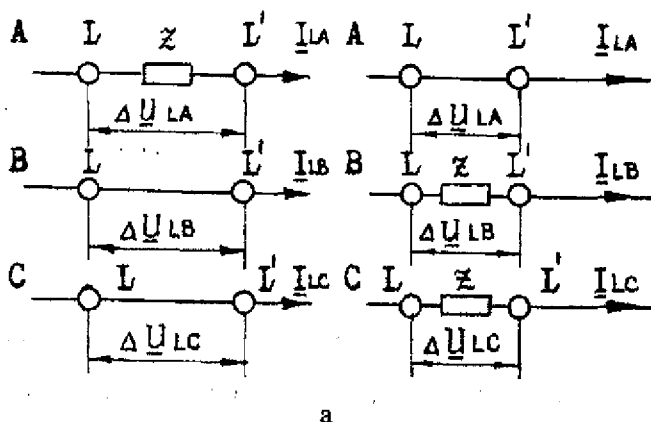


Рис. 9.6. Нарушение продольной симметрии при включении сопротивлений в одну (а) и две (б) фазы.

Из совместного преобразования (9.3), (9.5) и (9.22) получаем выражения для синтезирования комплексной схемы замещения (рис. 9.7,а):

$$\underline{I}_{LA1} = (\underline{E}_{AZ} - \Delta \underline{U}_{LA1}) / x_{1pez}; \quad (9.23)$$

$$\underline{I}_{LA1} = \Delta \underline{U}_{LA1} (3/z + 1/x_{2pez} + 1/x_{opez}). \quad (9.24)$$

Для определения тока прямой последовательности преобразуем комплексную схему замещения к виду, показанному на рис. 9.7,б, где на основании (9.24) дополнительное сопротивление, включаемое в месте несимметрии,

$$z_{LL1} = 1 / (3/z + 1/x_{2pez} + 1/x_{opez}). \quad (9.25)$$

Из выражения (9.25) при $z \rightarrow \infty$ следует выражение (9.8), относящееся к случаю разрыва фазы.

Симметричные составляющие тока и напряжения, выраженные через сопротивление z_{LL1} , могут быть найдены соответственно по (9.7), (9.9), (9.10) и (9.3), (9.5).

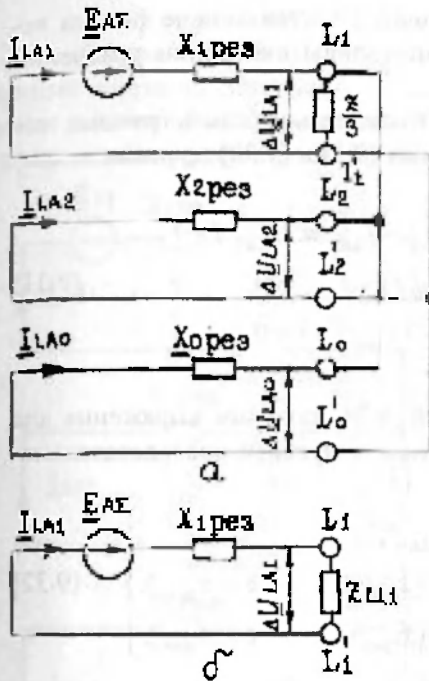


Рис. 9.7. Комплексная схема замещения основной фазы А (а) и ее эквивалентированное преобразование (б) для случая нарушения продольной симметрии при включении сопротивления z в фазу А.

Зная симметричные составляющие особой фазы А, 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 (рис.9.6,б):

$$\begin{aligned} \Delta \underline{U}_{LA} &= 0; \quad \Delta \underline{U}_{LB} = \underline{I}_{LB} z; \\ \Delta \underline{U}_{LC} &= \underline{I}_{LC} z. \end{aligned} \quad (9.26)$$

Выполнив переход к симметричным составляющим основной фазы А, уравнения системы (9.26) можно записать в следующем виде:

$$\Delta \underline{U}_{LA1} + \Delta \underline{U}_{LA2} + \Delta \underline{U}_{LA0} = 0; \quad (9.27)$$

$$a^2 \Delta \underline{U}_{LA1} + a \Delta \underline{U}_{LA2} + \Delta \underline{U}_{LA0} = (a^2 \underline{I}_{LA1} + a \underline{I}_{LA2} + \underline{I}_{LA0}) z; \quad (9.28)$$

$$a \Delta \underline{U}_{LA1} + a^2 \Delta \underline{U}_{LA2} + \Delta \underline{U}_{LA0} = (a \underline{I}_{LA1} + a^2 \underline{I}_{LA2} + \underline{I}_{LA0}) z. \quad (9.29)$$

Их решение относительно падений напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей дает

$$\left. \begin{aligned} \Delta \underline{U}_{LA1} &= (2 \underline{I}_{LA1} - \underline{I}_{LA2} - \underline{I}_{LA0}) z / 3; \\ \Delta \underline{U}_{LA2} &= (-\underline{I}_{LA1} + 2 \underline{I}_{LA2} - \underline{I}_{LA0}) z / 3; \\ \Delta \underline{U}_{LA0} &= (-\underline{I}_{LA1} - \underline{I}_{LA2} + 2 \underline{I}_{LA0}) z / 3. \end{aligned} \right\} \quad (9.30)$$

Таким образом, симметричные составляющие фазных величин фазы А могут быть представлены системами уравнений (9.3) и (9.30).

После преобразований относительно симметричных составляющих тока фазы А уравнения (9.3) и (9.30) принимают следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_{LA1}(2 + 3x_{1pez} / z) - \underline{I}_{LA2} - \underline{I}_{LA0} &= 3\underline{E}_{A\Sigma} / z; \\ -\underline{I}_{LA1} + \underline{I}_{LA2}(2 + 3x_{2pez} / z) - \underline{I}_{LA0} &= 0; \\ -\underline{I}_{LA1} - \underline{I}_{LA2} + \underline{I}_{LA0}(2 + 3x_{opez} / z) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (9.31)$$

Решив систему уравнений (9.31) получим выражения для определения токов прямой обратной и нулевой последовательностей:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_{LA1} &= \underline{E}_{A\Sigma} / (x_{1pez} + x_{LL1}); \\ \underline{I}_{LA2} &= \underline{E}_{A\Sigma}(z - x_{LL1}) / (x_{1pez} + x_{LL1})(z + x_{2pez}); \\ \underline{I}_{LA0} &= \underline{E}_{A\Sigma}(z - x_{LL1}) / (x_{1pez} + x_{LL1})(z + x_{opez}), \end{aligned} \right\} \quad (9.32)$$

где дополнительное сопротивление в схеме прямой последовательности, включаемое в месте несимметрии, определяется выражением

$$x_{LL1} = z((zx_{2pez} / (z + x_{2pez}) + (zx_{opez} / (z + x_{opez}))) / (z + (zx_{2pez} / (z + x_{2pez}) + (zx_{opez} / (z + x_{opez}))). \quad (9.33)$$

С учетом систем уравнений (9.32) и (9.3) падения напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей можно рассчитать по формулам

$$\left. \begin{aligned} \Delta \underline{U}_{LA1} &= \underline{E}_{A\Sigma} x_{LL1} / (x_{1pez} + x_{LL1}); \\ \Delta \underline{U}_{LA2} &= -\underline{E}_{A\Sigma}(z - x_{LL1})x_{2pez} / [(x_{1pez} + x_{LL1})(z + x_{2pez})]; \\ \Delta \underline{U}_{LA0} &= -\underline{E}_{A\Sigma}(z - x_{LL1})x_{opez} / [(x_{1pez} + x_{LL1})(z + x_{opez})]. \end{aligned} \right\} \quad (9.34)$$

Комплексную схему замещения основной фазы при включении в две фазы системы сопротивлений z (рис.9.8) можно составить на основе выражения, полученного суммированием выражения (9.33) и уравнений (9.3):

$$\underline{E}_{A\Sigma} = \underline{I}_{LA1}x_{1pez} + \underline{I}_{LA2}x_{2pez} + \underline{I}_{LA0}x_{opez}. \quad (9.35)$$

С помощью этой схемы могут быть определены симметричные составляющие фазных величин фазы А в месте повреждения и в любой точке системы. Токи и напряжения других фаз определяются уравнениями (9.1) и (9.2).

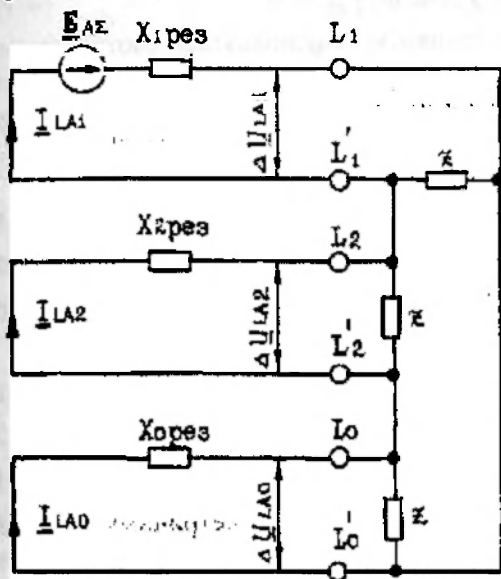


Рис. 9.8. Комплексная схема замещения основной фазы А для случая нарушения продольной симметрии при включении сопротивлений z в фазах В и С.

Отсюда следует, что аналитический анализ каждого вида однократной продольной 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.

9.5. Однофазное короткое замыкание с разрывом фазы

Рассмотрим случаи, когда одновременно возникает как поперечная, так и продольная несимметрия.

Пусть на каком-либо участке сети, нейтраль которой заземлена, произошел разрыв одного провода, причем один конец провода заземлился, а другой остался изолированным (рис. 9.9,а). Питание двойного участка осуществляется с обеих его сторон.

Граничные условия для повреждений следующие:
при разрыве фазы А в точке L

$$\underline{I}_{LA} = 0; \Delta \underline{U}_{LB} = 0; \Delta \underline{U}_{LC} = 0. \quad (9.36)$$

При однофазном КЗ фазы А на землю в точке К

$$\underline{U}_{KA} = 0; \underline{I}_{KB} = 0; \underline{I}_{KC} = 0. \quad (9.37)$$

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

$$\Delta \underline{U}_{LA1} = \Delta \underline{U}_{LA2}; \quad (9.38)$$

$$\Delta \underline{U}_{LA2} = \Delta \underline{U}_{LA0}; \quad (9.39)$$

$$\underline{I}_{LA1} + \underline{I}_{LA2} + \underline{I}_{LA0} = 0; \quad (9.40)$$

в точке однофазного КЗ

$$\underline{I}_{KA1} = \underline{I}_{KA2}; \quad (9.41)$$

$$\underline{I}_{KA2} = \underline{I}_{KA0}; \quad (9.42)$$

$$\underline{U}_{KA1} + \underline{U}_{KA2} + \underline{U}_{KA0} = 0. \quad (9.43)$$

Расчетные соотношения между несимметричными 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.9.9, б-г).

Для контуров схемы замещения прямой последовательности (рис.9.9,б) имеем следующие уравнения:

$$\Delta \underline{U}_{LA1} = \underline{E}_F - \underline{E}_{3K} - \underline{I}_{LA1} x_{1l'пер} + \underline{I}_{KA1} x_{1cпер}; \quad (9.44)$$

$$\underline{U}_{KA1} = \underline{E}_{3K} + (\underline{I}_{LA1} - \underline{I}_{KA1}) x_{1cпер}. \quad (9.45)$$

для контуров схемы замещения обратной последовательности (рис.9.9,в) - уравнения

$$\Delta \underline{U}_{LA2} = -\underline{I}_{LA2} x_{2l'пер} + \underline{I}_{KA2} x_{2cпер}; \quad (9.46)$$

$$\underline{U}_{KA2} = (\underline{I}_{LA2} - \underline{I}_{KA2}) x_{2cпер}, \quad (9.47)$$

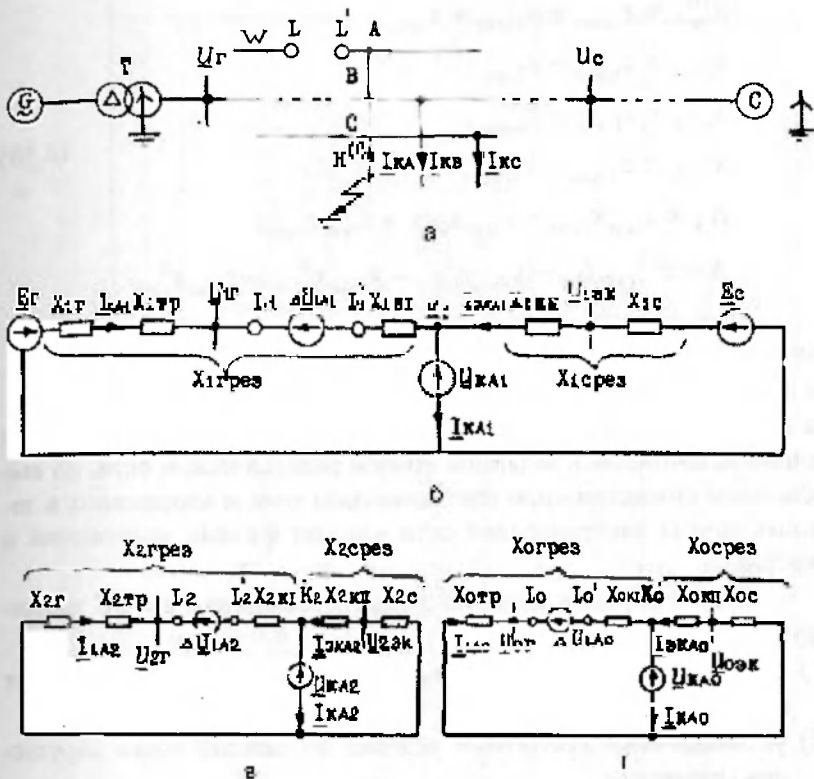


Рис. 9.9. Расчетная схема при однофазном КЗ с разрывом фазы А (а) и схемы замещения прямой (б), обратной (в) и нулевой (г) последовательностей.

а для контуров схемы замещения нулевой последовательности (рис.9.9,г) - уравнения

$$\Delta \underline{U}_{LA0} = -\underline{I}_{LA0} x_{0\Gamma\text{рез}} + \underline{I}_{KA0} x_{0\text{срез}}; \quad (9.48)$$

$$\underline{U}_{KA0} = (\underline{I}_{LA0} - \underline{I}_{KA0}) x_{0\text{срез}}. \quad (9.49)$$

Таким образом, параметры режима в ветвях повреждений описываются системой 12 независимых уравнений (9.38)-(49). Решение этой системы уравнений приведено в табл. 9.1. Там же помещены выражения для определения симметричных составляющих токов в ветвях расчетной схемы. В этих выражениях приняты следующие обозначения:

$$\left. \begin{aligned}
 x_{\text{срез}}^{(1)} &= x_{1\text{срез}} + x_{2\text{срез}} + x_{0\text{срез}}; \\
 x_{\text{с}1-2} &= x_{1\text{срез}} - x_{2\text{срез}}; \\
 x_{\text{с}1-0} &= x_{1\text{срез}} - x_{0\text{срез}}; \\
 x_{\text{с}2-0} &= x_{2\text{срез}} - x_{0\text{срез}}; \\
 \Delta_A &= x_{1\text{рез}}x_{2\text{рез}} + x_{1\text{рез}}x_{0\text{рез}} + x_{2\text{рез}}x_{0\text{рез}}; \\
 \Delta &= x_{\text{срез}}^{(1)}\Delta_A - x_{0\text{рез}}x_{\text{с}1-2}^2 - x_{2\text{рез}}x_{\text{с}1-0}^2 - x_{1\text{рез}}x_{\text{с}2-0}^2.
 \end{aligned} \right\} (9.50)$$

При известных симметричных составляющих токов в различных ветвях электрической сети, ЭДС генератора и всей системы легко рассчитать напряжения в интересующих точках сети. Отняв от ЭДС источника падения напряжения на участке сети между данным 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 ЭЭС 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 ветвях и точках электрической сети;
- 8) вычисляют фазные напряжения и полные токи фаз в заданных ветвях и точках электрической сети.

Таблица 9.1

Выражения для определения симметричных составляющих токов и напряжений в ветвях электрической сети

Ветвь сети	Симметричные составляющие	Расчетные выражения
1	2	3
С разрывом в точке L	\underline{I}_{LA1} \underline{I}_{LA2} \underline{I}_{L10} $\Delta \underline{U}_{LA1} = \Delta \underline{U}_{LA2} = \Delta \underline{U}_{LA0}$	$\left[(\underline{E}_f - \underline{E}_{ж}) \left(x_{2пер} + x_{0пер} \right) x_{Lпер}^{(1)} - x_{L2-0}^2 \right] + \underline{E}_{ж} (x_{0пер} x_{c1-2} + x_{2пер} x_{c1-0}) / \Delta$ $\left[(\underline{E}_f - \underline{E}_{ж}) (x_{c1-0} x_{c2-0} - x_{0пер} x_{cпер}^{(1)}) + \underline{E}_{ж} (x_{1пер} x_{c2-0} - x_{0пер} x_{c1-2}) \right] / \Delta$ $\left[-(\underline{E}_f - \underline{E}_{ж}) (x_{2пер} x_{cпер}^{(1)} + x_{c1-2} x_{c2-0}^2) - \underline{E}_{ж} (x_{1пер} x_{c2-0} + x_{2пер} x_{c1-2}) \right] / \Delta$ $\left[(\underline{E}_f - \underline{E}_{ж}) (x_{2пер} x_{0пер} x_{cпер}^{(1)} + x_{2пер} x_{0пер} x_{c1-0} + x_{0пер} x_{2пер} x_{c1-2}) + \underline{E}_{ж} (x_{1пер} x_{2пер} x_{0пер} + x_{1пер} x_{2пер} x_{0пер} + x_{2пер} x_{0пер} x_{1пер}) \right] / \Delta$
Однофазного КЗ в точке К	$\underline{I}_{KA1} = \underline{I}_{KA2} - \underline{I}_{KA0}$ \underline{U}_{KA1}	$\left[(\underline{E}_f - \underline{E}_{ж}) (x_{2пер} x_{c1-0} + x_{0пер} x_{c1-2}) + \underline{E}_{ж} \Delta_A \right] / \Delta$ $\underline{E}_{ж} + \left[(\underline{E}_f - \underline{E}_{ж}) x_{1пер} \left\{ (x_{2пер} + x_{0пер}) x_{cпер}^{(1)} - x_{c2-0} - x_{2пер} x_{c1-0} - x_{0пер} x_{c1-0} \right\} + \underline{E}_{ж} x_{1пер} (x_{2пер} x_{c1-0} + x_{0пер} x_{c1-0} - \Delta_A) \right] / \Delta$

1	2	3
	$\underline{U}_{КА2}$	$[(\underline{E}_r - \underline{E}_{эк})x_{2pez}(x_{c1-0}x_{c2-0} - x_{0pez}x_{cpez}^{(1)} - x_{2pez}x_{c1-0} - x_{0pez}x_{c1-2}) + \\ + \underline{E}_{эк}x_{2cpez}(x_{1pez}x_{c2-0} - x_{0pez}x_{c1-2} - \Delta_A)] / \Delta$
	$\underline{U}_{КА0}$	$[-(\underline{E}_r - \underline{E}_{эк})x_{0cpez}(x_{2pez}x_{cpez}^{(1)} + x_{c1-2}x_{c2-0} + \\ + x_{2pez}x_{c1-0} + x_{0pez}x_{c1-0}) - \underline{E}_{эк}x_{0cpez}(x_{1pez}x_{c2-0} \\ - x_{2pez}x_{c1-0} - \Delta_A)] / \Delta$
Точка К-шины систе- мы	$\underline{I}_{эКА1}$	$[(\underline{E}_r - \underline{E}_{эк})[x_{2pez}x_{c1-0} + x_{0pez}x_{c1-2} - (x_{2pez} + \\ + x_{0pez})x_{cpez}^{(1)} + x_{c2-0}^2] + \underline{E}_{эк}(\Delta_A - x_{2cpez}x_{c1-0} - \\ - x_{0pez}x_{c1-2})] / \Delta$
	$\underline{I}_{эКА2}$	$[(\underline{E}_r - \underline{E}_{эк})[x_{2pez}x_{c1-0} + x_{0pez}(x_{cpez}^{(1)} + x_{c1-2}) - \\ - x_{c1-0}x_{c2-0}] + \underline{E}_{эк}(\Delta_A - x_{1pez}x_{c2-0} + \\ + x_{0pez}x_{c1-2})] / \Delta$
	$\underline{I}_{эКА0}$	$[(\underline{E}_r - \underline{E}_{эк})[x_{2pez}(x_{cpez}^{(1)} + x_{c1-0}) + x_{0pez}x_{c1-2} + \\ + x_{c1-2}x_{c2-0}] + \underline{E}_{эк}(\Delta_A + x_{1pez}x_{c2-0} + \\ + x_{2pez}x_{c1-0})] / \Delta$

9.6. Примеры расчетов

Пример 9.1. На воздушной линии напряжением 110 кВ, питающей нагрузку $S_H=50 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ (рис. 9.10,а) произошло отключение фазы А. Исходные данные указаны на рисунке. Определить токи в неотключенных фазах ВЛ.

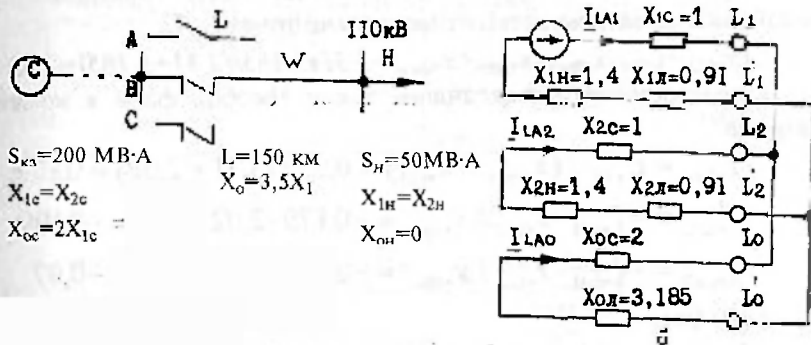


Рис. 9.10. К примеру 9.1.

Решение. Составляем комплексную схему замещения разорванной фазы А в точке L (рис. 9.10,б) и определяем параметры ее элементов в о.е. для базисных условий ($S_6=200 \text{ МВ}\cdot\text{А}$; $U_6=115 \text{ кВ}$;
 $I_6=S_6/(\sqrt{3}U_6) = 200 / (\sqrt{3} \cdot 115) = 1,01 \text{ кА}$;

сопротивления связи с питающей энергетической системой

$$x_{*1c} = x_{*2c} = S_6/S_{k3} = 200/200 = 1;$$

$$x_{*0c} = 2x_{*1c} = 2$$

сопротивления воздушной линии

$$x_{*1л} = x_{*2л} = x_0 l S_6 / U_{cp}^2 = 0,4 \times 150 \times 200 / 115^2 = 0,91$$

$$x_{*0л} = 3,5 \times 0,91 = 3,185$$

сопротивления нагрузки

$$x_{*1н} = x_{*2н} = 0,35 S_н / S_u = 0,35 \times 200 / 50 = 1,4$$

После этого рассчитываем:

результатирующие сопротивления отдельных последовательностей относительно точки разрыва

$$x_{*1рез} = x_{*2рез} = x_{*1c} + x_{*1л} + x_{*1н} = 1 + 0,91 + 1,4 = 3,31;$$

$$x_{*0pez} = x_{*0c} + x_{*0л} = 2 + 3,185 = 5,185;$$

ЭДС питающей энергетической системы

$$\underline{E}_{*A\Sigma} = \left[(\underline{E}_{*c} \cdot x_{*1н} + \underline{E}_{*н} (x_{*1c} + x_{*1н})) / (x_{*1c} + x_{*1л} + x_{*1н}) \right] = \\ \left[(1 \cdot 1,4 + 0,85(1 + 0,91)) / (1 + 0,91 + 1,4) \right] = 0,95;$$

дополнительное сопротивление за счет ветвей обратной и нулевой последовательностей относительно точек L_1-L_1'

$$x_{*LL1} = x_{*2pez} x_{*0pez} / (x_{*2pez} + x_{*0pez}) = 3,31 \cdot 5,185 / (3,31 + 5,185) = 2,02$$

симметричные составляющие токов особой фазы в момент разрыва

$$\underline{I}_{*LA1} = \underline{E}_{*A\Sigma} / (x_{*1pez} + x_{*LL1}) = 0,95 / (3,31 + 2,02) = 0,179;$$

$$\underline{I}_{*LA2} = -\underline{I}_{*LA1} \cdot x_{*LL1} / x_{*2pez} = -0,179 \cdot 2,02 / 3,31 = -0,109;$$

$$\underline{I}_{*LA0} = -\underline{I}_{*LA1} \cdot x_{*LL1} / x_{*0pez} = -0,179 \cdot 2,0 / 5,185 = -0,07.$$

токи фаз

$$\underline{I}_{*A} = \underline{I}_{*LA} = \underline{I}_{*LA1} + \underline{I}_{*LA2} + \underline{I}_{*LA0} = 0,179 - 0,109 - 0,07 = 0,$$

что соответствует исходному граничному условию $\underline{I}_{LA} = 0$;

$$\underline{I}_B = (a^2 \underline{I}_{*LA1} + a \underline{I}_{*LA2} + \underline{I}_{*LA0}) I_0 = (e^{j240^\circ} \cdot 0,179 e^{j90^\circ} - e^{j120^\circ} \cdot 0,109 e^{j90^\circ} - \\ - 0,07 e^{j90^\circ}) 1,01 = 0,276 e^{-j22,83^\circ} \text{ kA};$$

$$\underline{I}_C = (a \underline{I}_{*LA1} + a^2 \underline{I}_{*LA2} + \underline{I}_{*LA0}) I_0 = (e^{j120^\circ} \cdot 0,179 e^{j90^\circ} - e^{j240^\circ} \cdot 0,109 e^{j90^\circ} - \\ - 0,07 e^{j90^\circ}) 1,01 = 0,276 e^{-j157,17^\circ} \text{ kA}.$$

Пример 9.2. На линии ЭЭС напряжением 110 кВ в фазе одно- временно произошли однофазные КЗ в точке К и обрыв в начале линии в точках $L-L'$ (рис. 9.11,а). Определить значения фазных токов линии в месте КЗ и напряжения на шинах подстанции Г и Э (исходные данные для расчета указаны на рисунке).

Решение. Используем метод симметричных составляющих и расчетные соотношения для данного вида повреждения. На основе схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей (рис. 9.11,б-г) и исходя из базисных условий ($S_0 = 500 \text{ MVA}$;

$U_{ф.б.} = 115 / \sqrt{3} = 66,4 \text{ кВ}$; $I_0 = 500 / (\sqrt{3} \cdot 115) = 2,51 \text{ кА}$) рассчитываем сопротивления в о.е. их элементов:

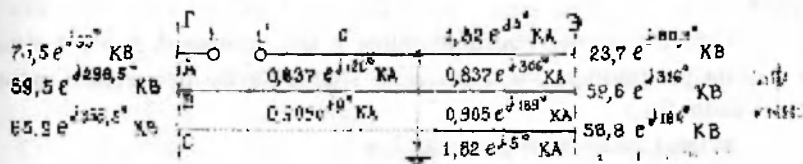
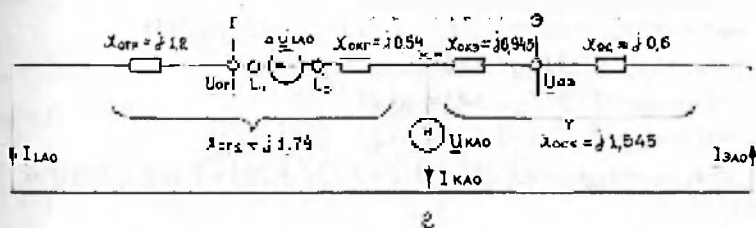
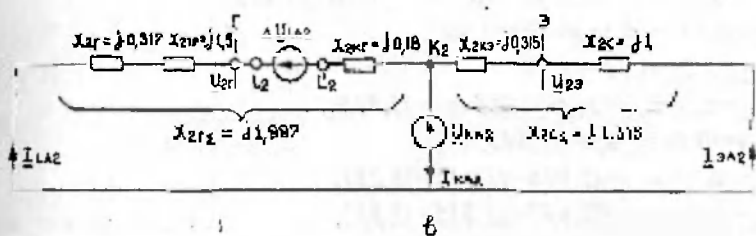
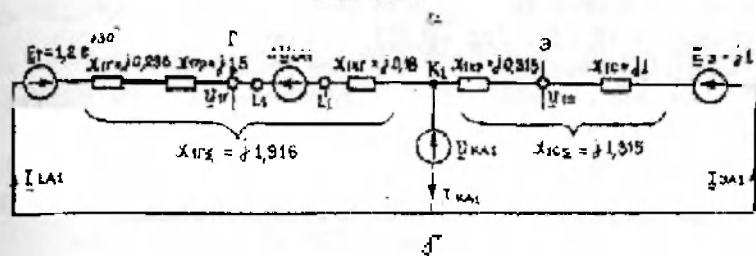
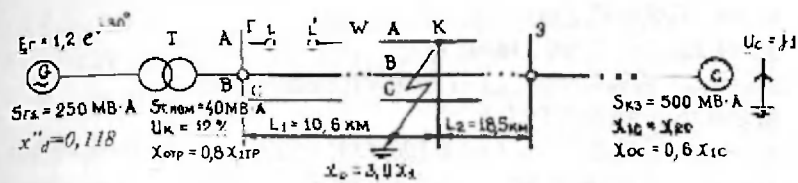


Рис. 9.11. К примеру 9.2.

$$\begin{aligned}
x_{1r} &= x_{dS\theta/S_j\Sigma} = 0,236; \\
x_{2r} &= 1,22x_{1r} = 1,22 \cdot 0,236 = 0,317; \\
x_{1rp} &= x_{2rp} = U_k S_\theta / (100 S_{T, \text{ном}}) = 12 \cdot 500 / (100 \cdot 40) = 1,5; \\
x_{0rp} &= 0,8x_{1rp} = 0,8 \cdot 1,5 = 1,2; \\
x_{1kr} &= x_{2kr} = x_{0l} S_\theta / U_{cp}^2 = 0,4 \cdot 10,6 \cdot 500 / 115^2 = 0,18; \\
x_{0kr} &= 3 \cdot x_{1kr} = 3 \cdot 0,18 = 0,54; \\
x_{1кз} &= x_{2кз} = 0,4 \cdot 18,5 \cdot 500 / 115^2 = 0,315; \\
x_{0кз} &= 3 \cdot 0,315 = 0,945; \\
x_{1c} &= x_{2c} = S_\theta / S_{кз} = 500 / 500 = 1; \\
x_{0c} &= 0,6x_{1c} = 0,6 \cdot 1 = 0,6.
\end{aligned}$$

Результирующие сопротивления схем замещения

$$\begin{aligned}
x_{1r\Sigma} &= x_{1r} + x_{1rp} + x_{1kr} = j0,236 + j1,5 + j0,18 = j1,916; \\
x_{2r\Sigma} &= j0,317 + j1,5 + j0,18 = j1,997; \\
x_{0r\Sigma} &= j1,2 + j0,54 = j1,74; \\
x_{1c\Sigma} &= x_{2c\Sigma} = x_{1кз} + x_{1c} = j0,315 + j1 = j1,315; \\
x_{0c\Sigma} &= j0,945 + j0,6 = j1,545; \\
x_{1\Sigma} &= x_{1r\Sigma} + x_{1c\Sigma} = j1,916 + j1,315 = j3,231; \\
x_{2\Sigma} &= x_{2r\Sigma} + x_{2c\Sigma} = j1,997 + j1,315 = j3,312; \\
x_{0\Sigma} &= x_{0r\Sigma} + x_{0c\Sigma} = j1,74 + j1,545 = j3,285; \\
x^{(1)}_{\text{срез}} &= x_{1c\Sigma} + x_{2c\Sigma} + x_{0c\Sigma} = j1,315 + j1,315 + j1,545 = j4,175; \\
x_{c1-2} &= x_{1c\Sigma} - x_{2c\Sigma} = j1,315 - j1,315 = 0; \\
x_{c1-0} &= x_{1c\Sigma} - x_{0c\Sigma} = j1,315 - j1,545 = -j0,23; \\
x_{c2-0} &= x_{2c\Sigma} - x_{0c\Sigma} = j1,315 - j1,545 = -j0,23; \\
\Delta_A &= x_{1\Sigma} x_{2\Sigma} + x_{1\Sigma} x_{0\Sigma} + x_{2\Sigma} x_{0\Sigma} = (3,231 \cdot 3,312 + 3,231 \cdot 3,285 + 3,312 \cdot 3,285) j^2 = \\
&= -32,195; \\
\Delta &= x^{(1)}_{\text{срез}} \Delta_A - x_{0c} x_{c1-2}^2 - x_{2c} x_{c1-0}^2 - x_{1c} x_{c2-0}^2 = j 4,175 (-32,195) - 0 + j0,34 = \\
&= -j134,1.
\end{aligned}$$

Симметричные составляющие токов основной фазы А и токи фаз на различных участках ЭЭС (используем расчетные выражения табл. 9.1):

ветвь с разрывом в точках L и L'

$$\begin{aligned}
\underline{I}_{LA1} &= (1,2e^{j30^\circ} - j1) [(j3,312 + j3,285) \cdot j4,175 - (-j0,23)^2] / (-j134,1) + \\
&+ j1(0 - j0,23 \cdot j3,312) / (-j134,1) = 0,23e^{j248^\circ};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{LA2} &= (1,2e^{j30^\circ} - j1)[(-j0,23)^2 - j3,285 \cdot j4,175]/(-j134,1) + \\ &+ j1(-j3,231 \cdot j0,230)/(-j134,1) = 0,112e^{j72^\circ}; \\ \underline{I}_{LA0} &= -(1,2e^{j30^\circ} - j1) \cdot j3,312 \cdot j4,175/(-j134,1) - j1 \cdot (-j3,231 \cdot j0,23)/ \\ &/(-j134,1) = 0,119e^{j64^\circ}; \end{aligned}$$

$$\underline{I}_{LA} = \underline{I}_{LA1} + \underline{I}_{LA2} + \underline{I}_{LA0} = 0,23e^{j248^\circ} + 0,112e^{j72^\circ} + 0,119e^{j64^\circ} \approx 0;$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{LB} &= (a^2 \underline{I}_{LA1} + a \underline{I}_{LA2} + \underline{I}_{LA0}) \underline{I}_\phi = (a^2 0,23e^{j248^\circ} + a 0,112e^{j72^\circ} + \\ &+ 0,119e^{j64^\circ}) \cdot 2,51 = 0,851e^{j188^\circ} \text{ kA}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{LC} &= (a \underline{I}_{LA1} + a^2 \underline{I}_{LA2} + \underline{I}_{LA0}) \underline{I}_\phi = (a 0,23e^{j72^\circ} + a^2 0,112e^{j72^\circ} + \\ &+ 0,119e^{j64^\circ}) \cdot 2,51 = 0,905e^{j19^\circ} \text{ kA}; \end{aligned}$$

ветвь однофазного КЗ в точке К

$$\begin{aligned} \underline{I}_{KA1} = \underline{I}_{KA2} = \underline{I}_{KA0} &= (1,2e^{j30^\circ} - j1)(-j3,312 \cdot j0,23)/(-j134,1) + \\ &+ j1(-32,195)/(-134,1) = 0,242e^{j3^\circ}; \end{aligned}$$

$$\underline{I}_{KA} = 3 \underline{I}_{KA1} \underline{I}_\phi = 3 \cdot 0,242e^{j3^\circ} \cdot 2,51 = 1,82e^{j3^\circ} \text{ kA};$$

ветвь точка К - подстанция Э (симметричные составляющие токов рассчитываем с использованием закона Кирхгофа для узла К)

$$\underline{I}_{3A1} = \underline{I}_{KA1} - \underline{I}_{LA1} = 0,242e^{j3^\circ} - 0,23e^{j248^\circ} = 0,396e^{j34^\circ};$$

$$\underline{I}_{3A2} = \underline{I}_{KA2} - \underline{I}_{LA2} = 0,242e^{j3^\circ} - 0,112e^{j72^\circ} = 0,23e^{j348^\circ};$$

$$\underline{I}_{3A0} = \underline{I}_{KA0} - \underline{I}_{LA0} = 0,242e^{j3^\circ} - 0,119e^{j64^\circ} = 0,215e^{j332^\circ};$$

$$\underline{I}_{3A} = (\underline{I}_{3A1} + \underline{I}_{3A2} + \underline{I}_{3A0}) \underline{I}_\phi = (0,396e^{j34^\circ} + 0,23e^{j348^\circ} + 0,215e^{j332^\circ}) \cdot 2,51 = 1,82e^{j3^\circ} \text{ kA};$$

$$\underline{I}_{3B} = (a^2 \cdot 0,396e^{j34^\circ} + a \cdot 0,23e^{j348^\circ} + 0,215e^{j332^\circ}) \cdot 2,51 = 0,837e^{j306^\circ};$$

$$\underline{I}_{3C} = (a \cdot 0,396e^{j34^\circ} + a^2 \cdot 0,23e^{j348^\circ} + 0,215e^{j332^\circ}) \cdot 2,51 = 0,905e^{j189^\circ} \text{ kA}.$$

Результаты расчета фазных токов отражены на рис. 9.11, д.

Симметричные составляющие напряжения основной фазы и фазные напряжения на шинах подстанции Г

$$\underline{U}_{rA1} = \underline{E}_r - I_{L11}(x_{1r} + x_{1rp}) = 1,2e^{j30} - 0,23e^{j248'} (j0,236 + j1,5) = 0,98e^{j56'};$$

$$\underline{U}_{rA2} = -I_{L12}(x_{2r} + x_{2rp}) = -0,112e^{j72'} (j0,317 + j1,5) = 0,203e^{j342'};$$

$$\underline{U}_{rA0} = -I_{L10}x_{0rp} = -0,119e^{j64'} \cdot j1,2 = 0,142e^{j334'};$$

$$\underline{U}_{r\phi} = (\underline{U}_{rA1} + \underline{U}_{rA2} + \underline{U}_{rA0})U_{\phi} = (0,98e^{j56'} + 0,203e^{j342'} + 0,142e^{j334'}) \cdot 66,4 = 75,5e^{j33'} \text{ кВ};$$

$$\underline{U}_{rB} = (a^2 \underline{U}_{rA1} + a \underline{U}_{rA2} + \underline{U}_{rA0})U_{\phi} = (a^2 \cdot 0,98e^{j56'} + a \cdot 0,203e^{j342'} + 0,142e^{j334'}) 66,4 = 59,5e^{j296,5'} \text{ кВ};$$

$$\underline{U}_{rC} = (a \underline{U}_{rA1} + a^2 \underline{U}_{rA2} + \underline{U}_{rA0})U_{\phi} = (a \cdot 0,98e^{j56'} + a^2 \cdot 0,203e^{j342'} + 0,142e^{j334'}) 66,4 = 65,9e^{j358,2'} \text{ кВ}.$$

Результаты расчета напряжений на шинах подстанции Э отражены на рис. 9.11, д.

Контрольные вопросы

1. Какими примерами можно охарактеризовать продольную несимметрию в ЭЭС?
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. В чем различие несимметричных режимов при разрыве двух фаз и включения в них одинаковых сопротивлений?
6. Каковы граничные условия для однофазного КЗ с разрывом фазы?
7. Какова последовательность действий при анализе сложных видов повреждений по методу симметричных составляющих?
8. Какие исходные расчетные условия и приемы используют при анализе продольной несимметрии?

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ОСОБЫХ УСЛОВИЯХ

При изучении данной темы следует ознакомиться с исследованием режимов КЗ в особых условиях. Студентам специализации «Электроснабжение» следует особое внимание уделить вопросам замыканий в распределительных сетях 3-35 кВ, учету изменения сопротивления проводников сети, а также специфике расчета токов КЗ в установках напряжением до 1000 В.

Распределительные сети напряжением 3-35 кВ, питание которых осуществляется от районных подстанций ЭЭС, обычно являются второй или третьей ступенью трансформации от генераторов станций системы. Поэтому одним из характерных признаков таких сетей является их относительно большая электрическая удаленность от источников питания, в силу чего аварийные процессы, возникающие в этих сетях, сравнительно мало сказываются на работе генераторов системы. Последнее обстоятельство позволяет практически считать, что при любых нарушениях режима работы распределительной сети напряжение высшей ступени трансформации системы остается неизменным.

В распределительных сетях часто встречаются воздушные и кабельные линии с проводниками сравнительно малых сечений. Это приводит к необходимости учета активных сопротивлений таких линий. Более того, при достаточной продолжительности процесса КЗ увеличение активного сопротивления проводника может вызвать заметное снижение тока КЗ, которое условно называют тепловым спадом тока. Особенно сильно этот эффект проявляется на участках воздушной сети, выполненных стальными проводами.

Электрические установки до 1000 В находятся на еще большей удаленности от генераторов ЭЭС, что позволяет с большим основанием считать напряжение в узле, от которого питаются такие установки, неизменным независимо от происходящих в них аварийных процессов.

Основой объединения ЭЭС являются дальние электропередачи переменного тока 330 кВ и выше. Поэтому современный инженер-электрик должен иметь представление об электромаг-

нитных переходных процессах, возникающих в дальних линиях передачи переменного тока.

До этого предполагалось, что возникший в ЭЭС электромагнитный переходный процесс не сопровождается качаниями синхронных генераторов этой системы. В данной главе остановимся на качественной стороне влияния качания генераторов на величины токов и напряжений в системе при внезапных нарушениях ее режима.

10.1. 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 схем сети, сопротивления цепи замыкания.

Сопротивления нулевой последовательности в сетях напряжением 6-35кВ определяются 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 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 устанавливаются 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. 10.1, а) ток протекающий по поврежденному соединению, 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. 10.1, б). Поэтому ток I_0 , определяемый емкостным сопротивлением неповрежденной сети, протекает в поврежденном элементе в направлении к шинам, а в неповрежденном - от них.

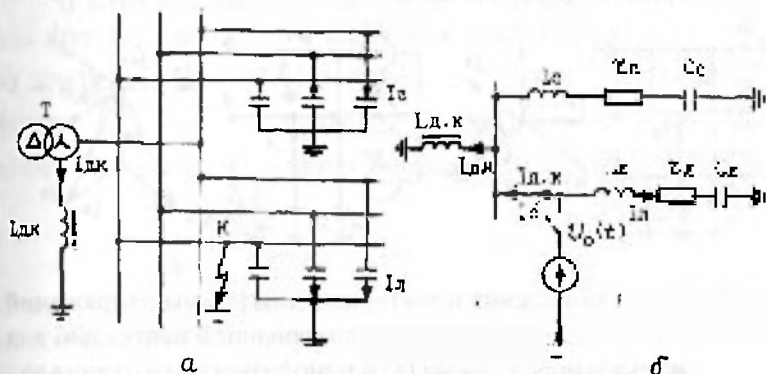


Рис. 10.1. Схема сети (а) и ее замещение схемой нулевой последовательности (б).

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 (емкостной 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 замыкании 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. 10.2). Введем ряд допущений, исходя из целей и постановки практических задач расчета аварийных режимов сети:

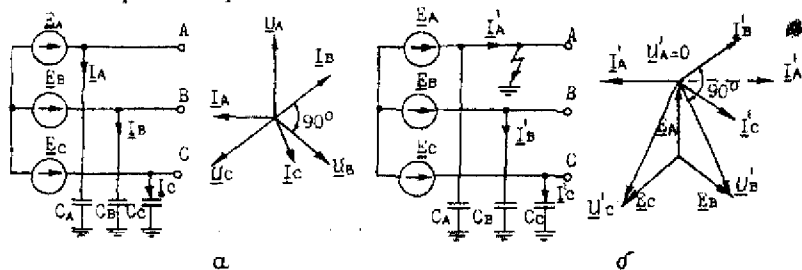


Рис. 10.2. Схема замещения и векторные диаграммы напряжений и емкостных токов сети с изолированной нейтралью для нормального режима (а) и однофазного замыкания за землю (б).

1) емкости отдельных фаз относительно земли, равномерно распределенные вдоль проводов, заменяем эквивалентными сосредоточенными емкостями $C_A=C_B=C_C=C$, включенными посредине 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. 10.2, а). Напряжение нейтрали (между нулевой точкой сети и землей) определяется выражением

$$\underline{U}_{ov} = (\underline{E}_A Y_A + \underline{E}_B Y_B + \underline{E}_C Y_C) / (Y_A + Y_B + Y_C) = 0, \quad (10.1)$$

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 А приобретает потенциал земли (рис. 10.2, б). Поэтому $\underline{U}_A = \hat{U}_1 Y_A = \infty$. Напряжение нейтрали \underline{U}_{o0} становится равным $-\underline{E}_A$. Напряжения неповрежденных фаз по отношению к земле возрастают в $\sqrt{3}$ раза и составляют

$$\underline{U}_B = \sqrt{3} \underline{E}_A e^{-j150^\circ}; \underline{U}_C = \sqrt{3} \underline{E}_A e^{j150^\circ}.$$

Емкостные токи фаз также увеличиваются в $\sqrt{3}$ раза. Опережая напряжения \underline{U}_B и \underline{U}_C на 90° , эти токи суммируются в земле и возвращаются через поврежденную фазу, ток которой равен току замыкания на землю:

$$\underline{I}_{3A}^{(1)} = 3\underline{I}_o = \underline{I}_A = -(\underline{I}_B + \underline{I}_C) = 3j\omega C \underline{E}_A, \quad (10.2)$$

где \underline{I}_o - ток нулевой последовательности при замыкании на землю.

Токи I_{3A} и I_o опережают ЭДС 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

$$\underline{I}_{3\Sigma} = 3\underline{I}_{o\Sigma} = 3j\omega C_\Sigma \underline{U}_\Phi. \quad (10.3)$$

Здесь C_Σ - суммарная емкость одной фазы всех ЛЭП, причем $C_\Sigma = C_{y0} l$,

где C_{y0} - емкость одной фазы сети относительно земли, $\Phi/\text{км}$;

l - общая протяженность одной фазы сети.

Ток замыкания на землю для сети с КЛ можно определить также по эмпирической формуле

$$I_{г\sigma} = (95 + 2,84q) U_{ном} \cdot l / (2200 + 6q), \quad (10.4)$$

где $U_{ном}$ - номинальное линейное напряжение сети, кВ;

l - длина КЛ, км;

q - сечение кабеля, мм².

Для ограничения тока замыкания на землю целесообразно нейтраль трансформатора заземлять через индуктивную катушку. Индуктивность такой катушки выбирают таким образом, чтобы в цепи нулевой последовательности был обеспечен резонанс между индуктивностью и емкостью, что приведет к $x_{г\sigma} = \infty$, т.е. полной компенсации тока замыкания на землю. Пренебрегая реактивностью трансформатора, найдем, что данное условие будет выполнено при $x_L = x_{с0\sigma} / 3$, где $x_{с0\sigma}$ - результирующее емкостное сопротивление нулевой последовательности всех элементов, электрически связанных с местом повреждения.

Такие катушки выполняют с регулированием индуктивности для того, чтобы можно было производить их настройку при изменениях параметров в защищаемой сети. Опытным установлено, что дугогасящие катушки устанавливают, если при $U = 6$ кВ, $I_3 \geq 30$ А; $U = 10$ кВ, $I_3 \geq 20$ А; $U = 20$ кВ, $I_3 \geq 15$ А; $U = 35$ кВ, $I_3 \geq 10$ А.

Согласно правилам устройства электроустановок, с замыканием на землю можно работать не более двух часов. Это связано с тем, что напряжение неповрежденных фаз возрастает до линейного, и имеется вероятность пробоя изоляции неповрежденных фаз, т.е. замыкание на землю может перейти к двухфазному или трехфазному КЗ. Поэтому изоляция сетей с изолированной нейтралью выполняется на линейное напряжение, что значительно удорожает их стоимость.

Пример 10.1. Рассчитать значения емкостного тока замыкания на землю в распределительной сети и индуктивности дугогасящей катушки для полной компенсации емкостного 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 $C_{г0} = 0,37 \cdot 10^{-6}$ Ф/км. Емкость электроприемников не учитывать.

Решение. Емкостной ток замыкания на землю

$$I_{3c} = \sqrt{3} U_{ном} \omega C_{\Sigma} = \sqrt{3} \cdot 10000 \cdot 314 \cdot 0,37 \cdot 10^{-6} (1,5 + 1,8 + 2,4 + 2,1) = 15,67 \text{ A}$$

Индуктивность дугогасящей катушки при условии, что $I_k = I_c$

$$L_{д.к} = U_{ном} / (\sqrt{3} \cdot \omega I_{3c}) = 10000 / (\sqrt{3} \cdot 314 \cdot 15,67) = 1,17 \text{ Гн}$$

10.2. Увеличение активного сопротивления проводников от их нагрева током короткого замыкания

Когда в цепи имеется проводник, активное сопротивление которого составляет значительную часть полного сопротивления всей цепи, то при прохождении по нему большого тока КЗ нагрев проводника быстро возрастает. Последнее приводит к увеличению активного сопротивления проводника, что в свою очередь вызывает снижение тока. Этот эффект так называемого теплого спада тока короткого замыкания и его практический учет исследованы И.А. Сыромятниковым.

Пусть проводник сечением q , мм^2 и длиной l , м , с удельным электрическим сопротивлением ρ_{θ_0} (при начальной температуре θ_0) и индуктивным сопротивлением x , Ом/м , присоединен через x_c , Ом , к источнику, напряжение которого неизменно по амплитуде и частоте. При трехфазном КЗ в конце этого проводника начальное значение периодической слагающей тока будет:

$$I_{n(\theta_0)} = U_{\phi} / \sqrt{(\rho_{\theta_0} l / (q))^2 + (x_c + xl)^2} = U_{\phi} / \sqrt{r_{\theta_0}^2 + x_{\Sigma}^2}. \quad (10.5)$$

Дифференциальное уравнение теплового баланса для данного проводника, если рассматривать процесс его нагрева адиабатическим (ввиду кратковременности КЗ), имеет вид:

$$(U_{\phi} / \sqrt{r_{\theta}^2 + x_{\Sigma}^2})^2 r_{\theta} dt = C \gamma q l d\theta, \quad (10.6)$$

где $r_\theta = r_{\theta_0}(1 + \alpha\theta) / (1 + \alpha\theta_0)$

Здесь α - температурный коэффициент сопротивления материала проводника при θ °C, 1/град;

C - средняя удельная теплоемкость материала,

Вт·с/г·град;

γ - удельный вес материала, г/см³.

После разделения переменных (t и θ) в (10.6) и интегрирования в пределах от θ до t и от θ_0 до θ , получим зависимость между температурой проводника и временем его нагрева током КЗ:

$$\Delta = (I_{n(\theta)} / q)^2 t = C\gamma / \rho_{\theta_0} \{ m / (1 + \alpha\theta_0) [(\theta - \theta_0) + (\alpha / 2)(\theta^2 - \theta_0^2)] + [(1 - m)(1 + \alpha\theta_0) / \alpha] \ln((1 + \alpha\theta) / (1 + \alpha\theta_0)) \} \quad (10.7)$$

где $m = r_{\theta_0}^2 / (r_{\theta_0}^2 + x_\Sigma^2)$.

При температуре проводника θ величина тока составляет

$$I_n = U_\phi / \sqrt{r_\theta^2 + x_\Sigma^2} = U_\phi n_\theta / \sqrt{r_{\theta_0}^2 + x_\Sigma^2} = I_{n(\theta_0)} \cdot n_\theta, \quad (10.8)$$

где $n_\theta = I_n / I_{n(\theta_0)} = 1 / \sqrt{m[(1 + \alpha\theta) / (1 + \alpha\theta_0)]^2 + (1 - m)}$ - коэффициент, учитывающий тепловой спад тока.

Зависимость $\theta - f(t)$ определяется из (10.7).

Полученные выражения, как видно, достаточно сложны. Для упрощения подобных расчетов служит диаграмма рис. 10.3, построенная по (10.7) и (10.8). В ней $m = r_{\theta_0}(r_c + r_{\theta_0}) / [(r_c + r_{\theta_0})^2 + x_\Sigma^2]$. позволяет дополнительно учитывать активное сопротивление r_c прочих элементов цепи, которое принимается постоянным. При построении диаграммы принято: $\theta_0 = 65$ °C: для меди и алюминия $\alpha = 0,004$ 1/°C, для стали $\alpha = 0,0045$ 1/°C (при θ °C). Продолжения кривых пунктиром и дополнительные пунктирные кривые относятся к стальным провод-

Из физической сущности явления и характера кривых рис. 10.3 следует, что тепловой спад тока КЗ тем интенсивнее, чем больше плотность тока и продолжительность КЗ, а также чем большую долю составляет активное сопротивление данного проводника от общего сопротивления цепи КЗ. Рассматриваемый фактор особенно сказывается в достаточно протяженных кабельных сетях.

Пример 10.2. Понижающий трансформатор 25 МВ·А, 110/6,6 кВ, $U_k=10,5\%$ присоединен к системе, напряжение которой практически неизменно и составляет 110 кВ. От шин пониженного напряжения трансформатора отходят к распределительным пунктам кабельные линии. Распределительные пункты расположены на расстоянии 0,5-1 км от данного трансформатора. Для питания каждого из них в нормальном рабочем режиме достаточно проложить кабель А-3х50 с изоляцией на 6 кВ, у которого $x_l=0,083$ Ом/км и $r_l=0,62$ Ом/км при $\theta_0=20^\circ\text{C}$.

Требуется определить наибольшее допустимое время отключения выключателем В (рис. 10.4) возникающего за этим выключателем КЗ (точка К), чтобы указанный кабель был термически стойким, т.е. его температура при таких условиях не превышала 200°C . Определить также величину тока КЗ в найденный момент времени.

Решение. Найдем напряжение системы, приведенное к стороне низшего напряжения трансформатора:

$$\dot{U} = 110 \frac{6,6}{110} = 6,6 \text{ кВ};$$

то же реактивность трансформатора

$$x = 0,105 \frac{6,6^2}{25} = 0,183 \text{ Ом}.$$

Активное сопротивление кабеля при его нормальной рабочей температуре $\theta_0=65^\circ\text{C}$ и температурном коэффициенте алюминия $\alpha=0,004$ $1/^\circ\text{C}$ составит:

$$r_2 = 0,62(1 + 0,004 \cdot 65) / (1 + 0,004 \cdot 20) = 0,726 \text{ Ом / км}.$$

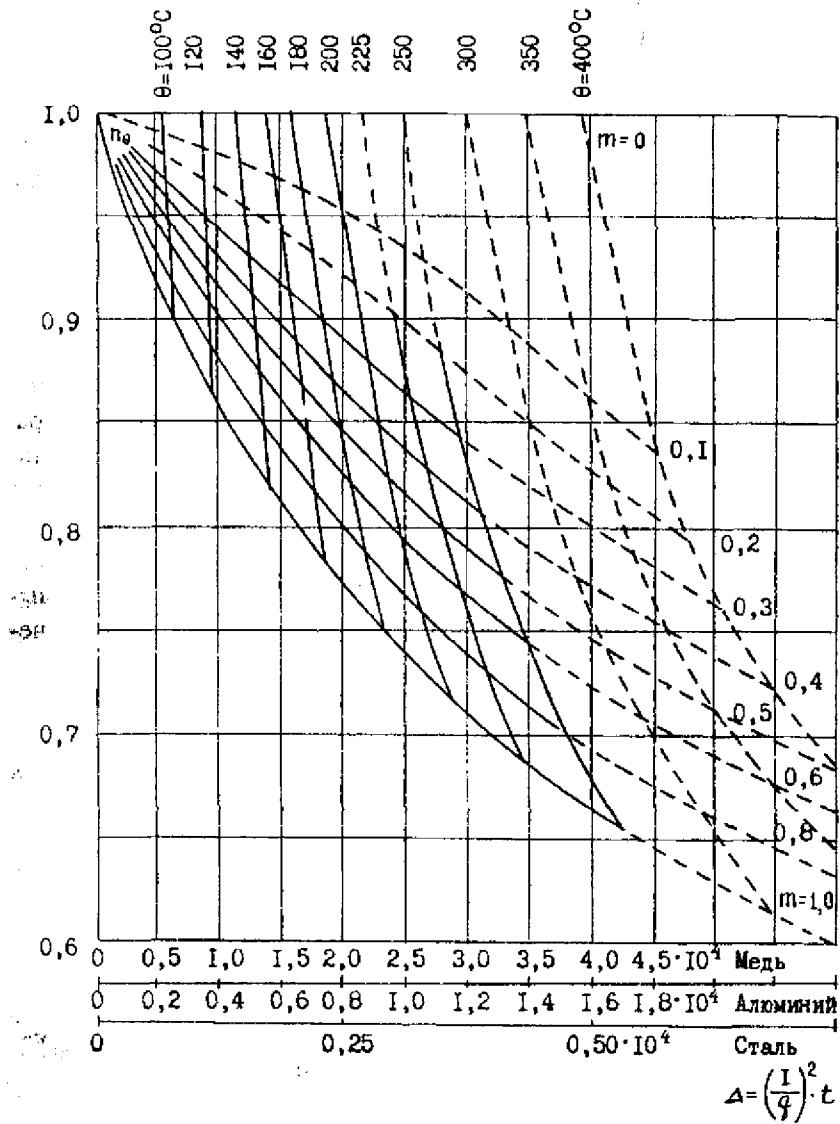


Рис. 10.3. Диаграмма для учета теплового спада тока короткого замыкания.

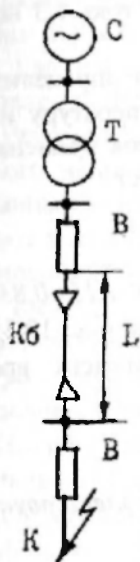


Рис.10.4. К примеру 10.2.

При протяженности кабеля 0,5 км сопротивления в начальный момент КЗ будут:

$$x_{\Sigma} = 0,183 + 0,5 \cdot 0,083 = 0,225 \text{ Ом};$$

$$r_{\theta} = 0,5 \cdot 0,726 = 0,363 \text{ Ом};$$

$$z = \sqrt{0,363^2 + 0,225^2} = 0,428 \text{ Ом}.$$

Начальное значение периодической составляющей тока КЗ

$$I_{n(0)} = 6600 / (\sqrt{3} \cdot 0,428) = 8900 \text{ А}.$$

По диаграмме рис. 10.3 для $m = (0,363/0,428)^2 = 0,73$ и $\theta = 200^\circ \text{C}$ находим $\Delta = 1,02 \cdot 10^4$ и $n_{\theta} = 0,77$.

Искомое время определяем из

$$(8900/50)^2 t = 1,02 \cdot 10^4,$$

откуда $t = 0,32 \text{ с}$; ток в этот момент времени по (10.8) будет $I = 0,77 \cdot 8900 = 6850 \text{ А}$.

Если не учитывать спад тока от нагрева проводника при КЗ, искомое время $t = 0,25 \text{ с}$, т.е. оно меньше на 22 %.

При протяженности кабеля 1 км сопротивления в начальный момент КЗ составляют: $x_{\Sigma} = 0,266 \text{ Ом}$, $r_{\theta} = 0,726 \text{ Ом}$ и $z = 0,775 \text{ Ом}$; соответственно начальное значение периодической составляющей тока КЗ $I_{n(0)} = 4900 \text{ А}$.

При $m = (0,726/0,775)^2 = 0,88$ и $\theta = 200^\circ \text{C}$ по диаграмме рис. 10.3 находим $\Delta = 1,1 \cdot 10^4$ и $n_{\theta} = 0,74$. Тогда искомое время $t = 1,1 \cdot 10^4 / (4900/50)^2 = 1,15 \text{ с}$ и соответствующий этому моменту времени ток

$$I = 0,74 \cdot 4900 = 3620 \text{ А}.$$

При решении без учета теплового спада тока КЗ искомое время составляет 0,84 с, т.е. оно меньше на 27%.

Пользуясь диаграммой рис. 10.3, можно определить для разных моментов времени величину тока и температуру нагрева заданного кабеля за рассматриваемый промежуток времени. Так, например, при двухфазном КЗ начальный ток будет

$$I_{n(t)} = \sqrt{3} / 2 \cdot (4900) = 4250 \text{ A.}$$

Соответственно при $t = 1,15 \text{ с}$ $\Delta = (4250/50)^2 \cdot 1,15 = 0,83 \cdot 10^4$.

Для этого значения Δ и при $m = 0,88$ по диаграмме рис. 10.3 находим $\theta = 170 \text{ }^\circ\text{C}$ и $n_\theta = 0,78$, т.е. ток в этот момент времени $I = 0,78 \cdot 4250 = 3300 \text{ A}$.

10.3. Расчет токов короткого замыкания в электроустановках напряжением до 1000 В

Электроустановки напряжением до 1000 В характеризуются большой электрической удаленностью относительно источников питания, как правило, значительной мощности. Обычно мощность подстанции примерно в 25 раз превышает мощность трансформаторов 6-10/0,4 кВ. Поэтому амплитуду периодической составляющей аварийного тока при КЗ на стороне низшего напряжения 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 с системой можно определить по формуле

$$x_c'' = U_{срВ} / (\sqrt{3} I_{кВ}), \quad (10.9)$$

или

$$x_c'' = U_{срВ} / (\sqrt{3} I_{откл.ном}), \quad (10.10)$$

где $U_{срВ}$ - среднее номинальное напряжение соответствующей обмотки высшего напряжения трансформатора;

$I_{кВ}$ - значение тока при трехфазном КЗ у выводов обмотки высшего напряжения 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 килловольт-амперах, ток - в килоамперах, напряжение - в килловольтах.

Достоверность расчета токов КЗ зависит от того, насколько правильно оценены и полно учтены все сопротивления цепи КЗ. В электроустановках напряжением до 1000 В 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.

Рассмотрим в отдельности, как определяются сопротивления силовых элементов короткозамкнутой цепи.

Силовые трансформаторы. Полное, активное и индуктивное сопротивления понижающего трансформатора, приведенные к ступени низшего напряжения, в миллиомах рассчитывают по формулам

$$z_{\text{тр}} = U_{\text{к}} U_{\text{ном}}^2 \cdot 10^4 / S_{\text{тр}}; \quad (10.11)$$

$$r_{\text{тр}} = P_{\text{к}} U_{\text{ном}}^2 \cdot 10^6 / S_{\text{тр}}^2; \quad (10.12)$$

$$x_{\text{тр}} = U_{\text{кр}} U_{\text{ном}}^2 \cdot 10^4 / S_{\text{тр}} = \sqrt{U_{\text{к}}^2 - \left(P_{\text{к}} / (10 S_{\text{тр}}) \right)^2} \cdot U_{\text{ном}}^2 \cdot 10^4 / S_{\text{тр}}, \quad (10.13)$$

где $S_{\text{тр}}$ - номинальная мощность трансформатора, кВ·А;

$U_{\text{ном}}$ - номинальное линейное напряжение обмотки низшего напряжения трансформатора, кВ;

$P_{\text{к}}$ - потери КЗ в трансформаторе, кВт;

$U_{\text{кр}}$ - реактивная составляющая напряжения КЗ, %;

$U_{\text{к}}$ - напряжение КЗ трансформатора, %.

Таблица 10.1

Активное и индуктивное сопротивления плоских шин

Сечение шин, мм ²	Сопротивления, мОм/м					
	Активное при 65 °С		Индуктивное при среднем гео- метрическом расстоянии между фазами, мм			
	Медь	Алюми- ний	100	150	200	300
25x3	0,268	0,457	0,179	0,200	0,295	0,244
30x3	0,233	0,394	0,163	0,189	0,206	0,235
30x4	0,167	0,296	0,163	0,189	0,206	0,235
40x4	0,125	0,222	0,145	0,170	0,189	0,214
40x5	0,100	0,177	0,145	0,170	0,189	0,214
50x5	0,080	0,142	0,137	0,156	0,180	0,200
50x6	0,067	0,118	0,137	0,156	0,180	0,200
60x6	0,056	0,099	0,119	0,145	0,163	0,189
60x8	0,042	0,074	0,119	0,145	0,163	0,189
80x8	0,031	0,055	0,102	0,126	0,145	0,170
80x10	0,025	0,044	0,102	0,126	0,145	0,170
100x10	0,020	0,035	0,090	0,113	0,133	0,157
2(60x8)	0,0209	0,037	0,120	0,145	0,163	0,189
2(80x8)	0,0157	0,0277	-	0,126	0,145	0,170
2(80x10)	0,0125	0,0222	-	0,126	0,145	0,170
2(100x10)	0,010	0,0178	-	-	0,133	0,157

Таблица 10.2

Активное и индуктивное сопротивления фазы комплектных шинопроводов

Тип шинопровода	Номинальный ток, А	Сопротивления, мОм/м	
		активное	индуктивное
ШМА 73	1600	0,031	0,017
ШМА 68Н	2500	0,027	0,023
ШМА 68Н	4000	0,013	0,020
ШЗМ16	1600	0,017	0,014
ШРА 73	250	0,200	0,100
ШРА 73	400	0,130	0,100
ШРА 73	630	0,085	0,075

Таблица 10.3.

Индуктивные сопротивления первичных обмоток трансформаторов тока, мОм

Коэффициент трансформации трансформаторов тока	Класс точности трансформаторов 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

Примечание: Сопротивлениями одновитковых трансформаторов тока на токи более 500 А можно пренебречь.

Шины и шинопроводы. Их сопротивления определяются на основании значений активного и индуктивного сопротивлений, отнесенных к единице длины шины. В табл. 10.1 эти значения указаны для плоских шин, а в табл. 10.2 - для фазы комплектных шинопроводов.

Воздушные и кабельные линии. Значения активного и индуктивного сопротивлений ЛЭП также вычисляют через табличные данные, которые достаточно полно помещены в [8]. 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. 10.3, 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	0,26	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

$$r_n = r_k + r_a + r_{mp.m} + r_d, \quad (10.14)$$

здесь r_k - переходное сопротивление контактного соединения токоведущих шин;

r_a - активное сопротивление автоматического выключателя, состоящее из активного сопротивления токовых катушек расцепителя и переходного сопротивления контактов;

$r_{mp.m}$ - активное сопротивление первичной обмотки трансформатора тока;

r_d - активное сопротивление дуги в месте КЗ.

Результирующее активное переходное сопротивление зависит от мощности понижающего трансформатора комплектной трансформаторной подстанции (КТП). 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	6,41	5,51	5,12

Сопротивления рассмотренных элементов цепи КЗ напряжением до 1000 В приводятся к базисным условиям на основании выражений:

при сопротивлении элемента, выраженном в миллиомах, x_0 д.д.т.

$$x_0 = x U_{\text{б}}^2 / U_{\text{ср}}^2, \quad (10.15)$$

при сопротивлении элемента, заданного в о.е.,

$$x_{\sigma} = x_{*n} U_{\sigma}^2 / S_{ном}, \quad (10.16)$$

где U_{σ} - напряжение ступени, на которой находится точка КЗ, кВ;
 U_{cp} - среднее номинальное напряжение ступени, где включен соответствующий элемент;
 $S_{ном}$ - номинальная мощность элемента, кВ·А.

Индуктивное сопротивление внешней системы до понижающего трансформатора, приведенное к ступени низшего напряжения

$$x_{c.б.} = x_c U_{\sigma}^2 / U_{cp}^2, \quad (10.17)$$

где U_{cp} - среднее номинальное напряжение ступени соответствующей обмотки высшего напряжения трансформатора.

Результирующие сопротивления $r_{рез.б}$ и $x_{рез.б}$ цепи КЗ находят путем преобразования схемы замещения согласно рекомендациям п. 2.7 с учетом активного переходного сопротивления. По найденным значениям активного и реактивного результирующих сопротивлений определяют (в килоамперах):

начальное действующее значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ

$$I^{(3)} = U_{\sigma} \cdot 10^3 / \left(\sqrt{3} \cdot \sqrt{r_{рез.б}^2 + x_{рез.б}^2} \right); \quad (10.18)$$

ударный ток трехфазного КЗ в электроустановках напряжением до 1000 В

$$i_y = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I^{(3)}, \quad (10.19)$$

где $k_y = 1 + e^{-0,01 \cdot T_a}$, а $T_a = x_{рез.б} / (\omega r_{рез.б})$;

действующее значение периодической составляющей тока однофазного КЗ, необходимое для выбора защиты от замыканий на землю,

$$I^{(1)} = \sqrt{3} U_{\sigma} \cdot 10^3 / \sqrt{\left(2r_{рез.б} + r_{0рез.б} \right)^2 + \left(2X_{рез.б} + X_{0рез.б} \right)^2}, \quad (10.15)$$

где $r_{рез.б}$, $x_{рез.б}$ - результирующие активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности, мОм;

$r_{0рез.б}$, $x_{0рез.б}$ - результирующие активное и индуктивное

сопротивления нулевой последовательности мОм;

начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ, создаваемого местными асинхронными двигателями,

$$I_{\delta\theta}'' = E_{(0)\delta\theta}'' \cdot 10^3 / \sqrt{(x_{\delta\theta}'' + x_{\text{вн}}'')^2 + (r_{\delta\theta}'' + r_{\text{вн}}'')^2}, \quad (10.20)$$

где $E_{(0)\delta\theta}''$ - фазная сверхпереходная ЭДС двигателя, кВ;

$x_{\delta\theta}''$, $r_{\delta\theta}''$ - сверхпереходные индуктивное и активное сопротивления двигателя, мОм;

$x_{\text{вн}}''$, $r_{\text{вн}}''$ - внешние сопротивления кабеля, мОм.

Кроме того, рассчитывают:

сверхпереходную ЭДС (в вольтах)

$$E_{(0)\delta\theta}'' = \sqrt{\left(U_{\phi(0)} \cos \varphi_{(0)} - I_{(0)} r_{\delta\theta}'' \right)^2 + \left(U_{\phi(0)} \sin \varphi_{(0)} - I_{(0)} X_{\delta\theta}'' \right)^2}, \quad (10.21)$$

где $U_{\phi(0)}$, $I_{(0)}$, $\varphi_{(0)}$ - соответственно фазное напряжение, ток статора и угол между векторами напряжения и тока статора в режиме, предшествующем КЗ. Обычно принимают

$U_{\phi(0)} = U_{\text{ном}}$, $I_{(0)} = I_{\text{ном}}$, $\varphi_{(0)} = \varphi_{\text{ном}}$, либо полагают $E_{(0)\delta\theta}'' = 0,9U$;

суммарное активное сопротивление асинхронного двигателя в момент КЗ (в миллиомах)

$$r_{\delta\theta}'' = r_1 + r_2/c_2, \quad (10.22)$$

где r_1 - активное сопротивление статора, мОм;

$c_2 = 1,04$ - коэффициент, характеризующий соотношение сопротивлений рассеяния обмотки ротора и намагничивания двигателя;

r_2 - активное сопротивление ротора, приведенное к статору (мОм) и определяемое выражением

$$r_2 = M_{\text{пуск}} (P_{\text{ном}} \div \Delta P_{\text{мн}}) c_2 \cdot 10^6 / (3I_{\text{пуск}}^2 I_{\text{ном}} (1 - S_{\text{ном}})), \quad (10.23)$$

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;

$\Delta P_{\text{мн}}$ - механические потери двигателя, включая добавочные потери (кВт), причем $\Delta P_{\text{мн}} = 0,01 P_{\text{ном}}$;

$I_{\text{пуск}}$ - 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

$$r_1 = c_1 M_{\text{пуск}} (1/S_{\text{кр}} + S_{\text{кр}} - 2M_{\text{макс}}/M_{\text{пуск}}) / (2S_{\text{кр}} M_{\text{макс}}), \quad (10.24)$$

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

$$r_1 = k_v P_{\text{ном}} (1 - \eta_{\text{ном}}) \cdot 10^6 / (3I_{\text{ном}}^2 \eta_{\text{ном}}), \quad (10.25)$$

где $k_v = 0,3 \div 35$ - отношение потерь в меди статора к суммарным потерям мощности в двигателе при его работе в номинальном режиме;

$\eta_{\text{ном}}$ - номинальный КПД двигателя;

сверхпереходное индуктивное сопротивление асинхронного двигателя (в миллиомах)

$$X_{\text{дв}}'' = \sqrt{\left(i_{\text{у.дв}}'' \cdot 10^3 / (I_{\text{макс}} I_{\text{ном}}) \right)^2 - r_{\text{дв}}^2}, \quad (10.26)$$

где $U_{\text{ф.ном}}$ - номинальное фазное напряжение двигателя, В;

ударный ток КЗ (в килоамперах), создаваемый асинхронным двигателем,

$$i_{\text{у.дв}}'' = \sqrt{2} k_{\text{у.дв}} I_{\text{дв}}'$$

где $k_{\text{у.дв}}$ - ударный коэффициент для цепи двигателя, определяемый выражением

$$k_{удв} = I + e^{-0,01 \cdot T_p} + e^{-0,01 \cdot T_a} \quad (10.27)$$

Здесь T_p - расчетная постоянная времени затухания периодической составляющей тока статора, причем

$$T_p \approx (x''_{\sigma\sigma} + X_{\sigma\sigma}) / (\omega r_2); \quad (10.28)$$

постоянную времени затухания аperiodической составляющей тока статора

$$T_a \approx (x''_{\sigma\sigma} + X_{\sigma\sigma}) / (\omega(r_1 + r_{\sigma\sigma})). \quad (10.29)$$

Пример 10.3. 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. 10.5). Определить начальное значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ, создаваемого двигателем при КЗ на сборных шинах (двигатель до КЗ имел номинальную нагрузку).

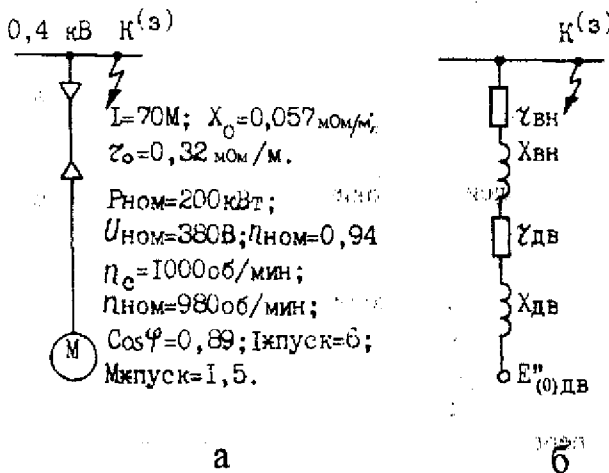


Рис. 10.5. К примеру 10.3.

Решение. Номинальный ток двигателя

$$I_{ном} = P_{ном} / (\sqrt{3} U_{ном} \eta_{ном} \cos \varphi_{ном}) = 200 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,94 \cdot 0,89) = 363,2 \text{ А.}$$

Номинальное скольжение двигателя

$$S_{ном} = (1000 - 980) / 1000 = 0,02.$$

Активное сопротивление ротора, приведенное к статору согласно (10.23),

$$r_2 = 1,5(200 + 0,01 \cdot 200) \cdot 1,04^2 \cdot 10^6 / (3 \cdot 6^2 \cdot 363,2^2 \cdot (1 - 0,02)) = 23,5 \text{ мОм.}$$

Активное сопротивление статора в соответствии с (10.25) при $k_s = 0,33$

$$r_1 = 0,33 \cdot 200(1 - 0,94) \cdot 10^6 / (3 \cdot 363,2^2 \cdot 0,94) = 10,65 \text{ мОм.}$$

Суммарное активное сопротивление двигателя

$$r_{\text{дв}} = 10,65 + 23,5 / 1,04 = 33,25 \text{ мОм.}$$

Сверхпереходное индуктивное сопротивление двигателя согласно (10.26)

$$x_{\text{дв}} = \sqrt{(380 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 363,2))^2 - 33,25^2} = 95,03 \text{ мОм.}$$

Сверхпереходная ЭДС асинхронного двигателя в соответствии с (10.21)

$$E_{(0) \text{дв}} = \sqrt{\left(\frac{380}{\sqrt{3}} \cdot 0,89 - 363,2 \cdot 33,25 \cdot 10^{-3} \right)^2 + \left(\frac{380}{\sqrt{3}} \cdot 0,456 - 363,2 \cdot 95,03 \cdot 10^{-3} \right)^2} = 194,57 \text{ В.}$$

Активное и индуктивное сопротивление кабеля

$$r_{\text{вн}} = 0,32 \cdot 70 = 22,4 \text{ мОм; } x_{\text{вн}} = 0,057 \cdot 70 = 3,99 \text{ мОм.}$$

Начальное значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ согласно (10.20)

$$I_{\text{дв}}'' = 194,57 / \sqrt{(95,03 + 3,99)^2 + (33,25 + 22,4)^2} = 1,7 \text{ кА.}$$

Пример 10.4. Рассчитать токи трехфазного КЗ в точках K_1 и K_2 СЭС, схема которой изображена на рис. 10.6. Параметры элементов схемы указаны на рисунке. Электроустановки напряжением 0,4 кВ питаются через шинопровод типа ШМА-73.

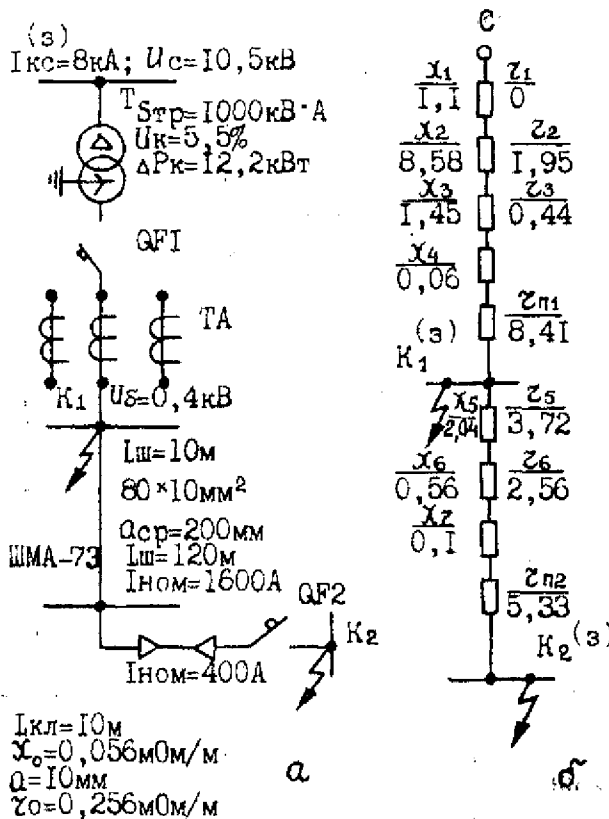


Рис. 10.6. К примеру 10.4.

Решение. Расчет токов КЗ в точке K_2 . Сопротивления связи питающей подстанции с системой

$$x_1 = 10500 \cdot 0,4^2 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 8000 \cdot 10,5^2) = 1,1 \text{ мОм}; \quad r_1 = 0.$$

Сопротивления трансформатора согласно (10.11)-(10.13)

$$z_2 = 5,5 \cdot 0,4^2 \cdot 10^4 / 1000 = 8,8 \text{ мОм};$$

$$r_2 = 12,2 \cdot 0,4^2 \cdot 10^6 / 1000^2 = 1,95 \text{ мОм};$$

$$x_2 = \sqrt{8,8^2 - 1,95^2} = 8,58 \text{ мОм}.$$

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 расцепителя 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 для трансформатора мощностью $S_{тр} = 1000 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, $r_{н1} = 8,41 \text{ мОм}$.

Результирующие сопротивления короткозамкнутой цепи до точки K_1

$$r_{к1 \text{ рез.б}} = r_2 + r_3 + r_{н1} = 1,95 + 0,44 + 8,41 + 10,8 \text{ мОм};$$

$$x_{к1 \text{ рез.б}} = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 1,1 + 8,58 + 1,45 + 0,06 = 11,2 \text{ мОм}.$$

Полное сопротивление короткозамкнутой цепи

$$z_{к1 \text{ рез.б}} = \sqrt{10,8^2 + 11,2^2} = 15,6 \text{ мОм}.$$

Начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ в точке K_1

$$I_{к1}^{(3)} = 0,4 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 15,6) = 14,8 \text{ кА}.$$

Ударный ток КЗ в точке K_1

$$i_{ук1} = K_{ук1} \sqrt{2} I_{к1}^{(3)} = 1,005 \cdot \sqrt{2} \cdot 14,8 = 21 \text{ кА},$$

где

$$K_{ук1} = 1 + e^{-0,01/T_{эм1}} = 1 + e^{-0,01/0,0033} = 1,005;$$

$$T_{эм1} = 11,2 / (314 \cdot 10,8) = 0,0033 \text{ с}.$$

Расчет токов КЗ в точке K_2 . Сопротивление шинпровода ШМА-73

$$x_5 = 0,017 \cdot 120 = 2,04 \text{ мОм}; \quad r_5 = 0,031 \cdot 120 = 3,72 \text{ мОм}.$$

Сопротивление КЛ от шинпровода до выключателя QF2

$$x_6 = 0,056 \cdot 10 = 0,56 \text{ мОм}; \quad r_6 = 0,256 \cdot 10 = 2,56 \text{ мОм}.$$

Индуктивное сопротивление токовой катушки расцепителя автомата QF2

$$x_{7\text{рез}} = 0,1 \text{ МОм.}$$

Результирующее переходное сопротивление в точке K_2 с учетом коэффициента ступени КЗ принимаем $r_{n2} = 5,33 \text{ МОм.}$

Результирующие сопротивления короткозамкнутой цепи до точки K_2

$$r_{к2 \text{ рез.б}} = r_2 + r_3 + r_5 + r_6 + r_{n2} = 1,95 + 0,44 + 3,72 + 2,56 + 5,33 = 14 \text{ МОм;}$$

$$x_{к2 \text{ рез.б}} = x_{к1 \text{ рез.б}} + x_5 + x_6 + x_7 = 11,2 + 2,04 + 0,56 + 0,1 = 13,9 \text{ МОм.}$$

$$z_{к2 \text{ рез.б}} = \sqrt{14^2 + 13,9^2} = 19,7 \text{ МОм.}$$

Начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ в точке K_2

$$I''_{к2}^{(3)} = 0,4 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 19,7) = 11,7 \text{ кА.}$$

Ударный ток КЗ в точке K_2

$$i_{ук2} = K_{ук2} \sqrt{2} I''_{к2}^{(3)} = 1,005 \cdot \sqrt{2} \cdot 11,7 = 16,6 \text{ кА,}$$

где

$$K_{ук2} = 1 + e^{-0,01/T_{ак2}} = 1 + e^{-0,01/0,0032} \approx 1,05,$$

причем

$$T_{ак2} = 13,9 / (314 \cdot 14) = 0,0032 \text{ с.}$$

10.4. Короткие замыкания в питающих сетях

При КЗ в сетях напряжением 330 кВ и выше, кроме периодической и аperiodической составляющих, можно выделить также 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. Расчеты составляющих тока КЗ с учетом емкостей ЛЭП при КЗ в различных точках сети легко выполняются с помощью цифровых ЭВМ.

Расчетная схема для одного из условий, показанная на рис. 10.7, позволяет установить общие зависимости для расчета токов КЗ в таких 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 периодиче-

скую (промышленной частоты) и аperiodическую составляющие. Эти составляющие также, 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 сопротивлением $x_k = -1/(\omega C_k)$, где C_k - продольная емкость; ω - промышленная частота.

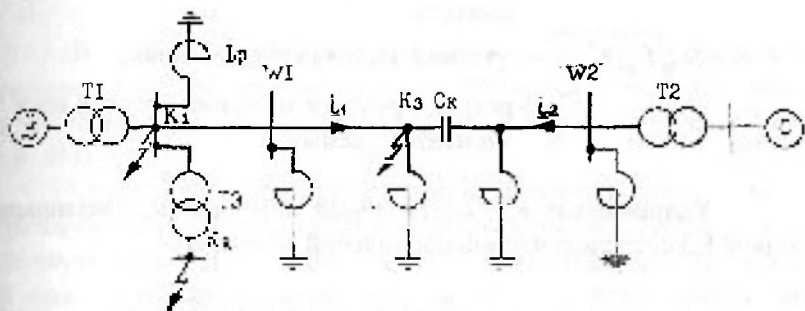


Рис. 10.7. Расчетная схема для одного из рассматриваемых условий.

При трехфазном КЗ в любой точке ЛЭП полный ток КЗ состоит из суммы токов i_1 и i_2 , создаваемых источниками, расположенными 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

$$I_{c \max} = (\sqrt{2}E / (\sqrt{3}x_{p22})) e^{-\alpha t} \cos \omega_c t, \quad (10.30)$$

где $x_{p22} = (\omega_c L_{p22} - 1/\omega_c C_k)$ - результирующее реактивное сопротивление

ление;

$T_c = 2L_{рез}/r_{рез}$ - постоянная времени затухания тока субгармоники;

$L_{рез}, r_{рез}$ - результирующие значения индуктивности и активного сопротивления всех элементов схемы, расположенных по отношению к точке КЗ с той стороны, что и продольная емкость;

$\omega_c = 1/\sqrt{L_{рез}C_{рез}}$ - угловая частота субгармоники;

$C_{рез}$ - результирующее значение емкости всех элементов схемы.

Ударный ток КЗ, создаваемый источником, связанным с точкой КЗ сосредоточенной продольной емкостью

$$i_{y\max} = \sqrt{2}E''(1 + e^{-t_y/T_c}) / (\sqrt{3}x_{рез}), \quad (10.31)$$

где $t_y = \pi(\omega - \omega_c)$ - момент появления ударного тока (из-за наличия про-

дольной емкости $t_y > 0, 01c$).

Таким образом, полный ток трехфазного КЗ для рассматриваемых условий приближенно определяется выражением

$$I_{\max} = (I_{n1\max} + I_{n2\max} + I_{c0\max} e^{-t/T_c}) \sin[(\omega - \omega_c)t / 2] + I_{a0} e^{-t/T_c}, \quad (10.32)$$

где $I_{n1\max}, I_{n2\max}$ - соответственно амплитуды периодической составляющей тока промышленной частоты генераторов станции и системы, причем

$I_{n1\max} = \sqrt{2}E'' / (\sqrt{3}x_{1рез}); I_{n2\max} = I_{c0\max} = \sqrt{2}E'' / (\sqrt{3}x_{2рез})$ - начальное значение амплитуды тока субгармоники;

$I_{a0} = \sqrt{2}E'' / (\sqrt{3}x_{1рез})$ - начальное значение аperiodической составляющей тока генератора;

$x_{1рез}, x_{2рез}$ - результирующие сопротивления всех элементов схемы до точки КЗ для соответствующих источников;

$$T_c = 2L_{2pez}/r_{2pez}; \quad T_{\omega} = L_{1pez}/r_{1pez}; \quad \omega_c = 1/\sqrt{L_{2pez}C_c}.$$

Ударный ток рассчитывают по формуле

$$i_{y, \max} = \sqrt{2}E''(1 + e^{-t/\tau})/(\sqrt{3}x_{1pez}) + \sqrt{2}E''(1 + e^{-t/\tau})/(\sqrt{3}x_{2pez}). \quad (10.33)$$

В ЛЭП напряжением 330 кВ и выше по мере удаления от источника питания периодическая составляющая тока КЗ убывает. Свободные аperiodические 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 о.е. 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 0,5с, а турбогенератора - не более 1с с момента возникновения аварийного режима;

оснащении отключаемых генераторов вентильной системой возбуждения, если пауза АПВ не превышает 0,7с с момента отключения турбогенератора и 1с 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 Х.Х. Поэтому при длительности аварийного режима более 1 с, удаленности КЗ в 0,6-0,7 о.е. 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.

10.5. Короткие замыкания в сетях повышенной частоты

Электромагнитные процессы в сетях повышенной частоты (до 10000 Гц) при аварийных режимах рассчитываются по тем же условиям и формулам, что в сети промышленной частоты (50 Гц). При работе на повышенных частотах проявляется 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 сопротивление проводника при этом возрастает, что вызывает уменьшение допустимого длительного тока нагрузки и увеличение потерь напряжения. В проводниках сечением 10 мм² и менее коэффициент поверхностного эффекта незначителен и при расчетах сетей повышенной частоты 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. Элек-

трические 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, снижениях напряжения или при их кратковременном отключении. Электрические сети повышенной частоты выполняются в виде шинопроводов и кабелей, а также изолированных проводов, проложенных открыто или в стальных трубах. Проводники для них обычно выбираются по допустимому нагреву и потере напряжения, затем проверяются по токам КЗ.

В [3] помещены данные о допустимых длительных токовых нагрузках на кабели и провода с медными и алюминиевыми жилами сечением 16 мм^2 и более, а также при кратковременных нагрузках, обусловленных КЗ, в случае протекания по ним трех- либо 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.

10.6. Учет качаний при анализе электромагнитного переходного процесса

В соответствии с принятыми допущениями до сих пор предполагалось, что возникший в ЭЭС переходный процесс не сопровождается качаниями синхронных генераторов этой системы. В действительности в зависимости от величины толчка, испыты-

ваемого синхронным генератором при КЗ, возникают качания, которые могут быть затухающими или, напротив непрерывно возрастающими, при которых генератор выпадает из синхронизма. Точный анализ поведения синхронного генератора в этих условиях связан с необходимостью одновременного рассмотрения электромагнитных и электромеханических изменений и является задачей исследования динамической устойчивости.

Здесь остановимся, главным образом, на качественной стороне влияния качания синхронных генераторов на величину токов и напряжений в системе при внезапном КЗ. При этом будем считать, что известен закон изменения углового сдвига между ЭДС источников питания во времени. Для упрощения теоретических выкладок рассмотрим такую систему, в которой один генератор (или станция, заменяется эквивалентным генератором) связан с системой бесконечной мощности по сети, обладающей чисто индуктивным сопротивлением.

На схеме рис. 10.8 вся мощность передается в систему, т.е. в промежуточных узлах: M , K и N отсутствуют потребители.

Проследим, как изменяются ток генератора и напряжения в указанных узлах с увеличением угла δ между ЭДС E_r и напряжением U_c . На рис. 10.8 сплошными линиями показана исходная схема замещения. Напряжение узла K , очевидно, такое же, как и узла F , который получается после преобразования треугольника в звезду (пунктирные линии на рис. 10.8).

На рис. 10.9 приведена векторная диаграмма для данной схемы. С увеличением угла δ разность $(E_r - U_c)$ возрастает, и пропорционально ей возрастает ток генератора. Соответственно увеличивается падение напряжения на участках сети, что приводит к снижению напряжений во всех точках.

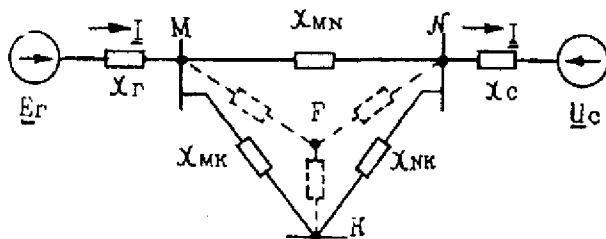


Рис. 10.8. Исходная схема замещения с двумя источниками.

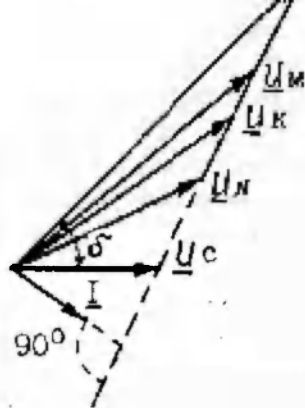


Рис. 10.9. Векторная диаграмма напряжений и токов для схемы рис. 10.8 при изменениях угла δ .

Наибольший ток и соответственно наименьшее напряжение наступает при $\delta = \pi$, т.е. когда E_r и U_c находятся в противофазе. На рис. 10.10 приведена эюра тока и напряжений в о.е. в зависимости от угла δ , где за единицу тока и напряжений каждого узла приняты их величины при $\delta = 0$. Это сделано для более наглядного сравнения кривых изменения напряжений в разных точках и возможности относительной оценки влияния качаний на отдельные величины по сравнению с их значениями по приближенным расчетам, проводимым без учета углового сдвига между векторами ЭДС источников питания.

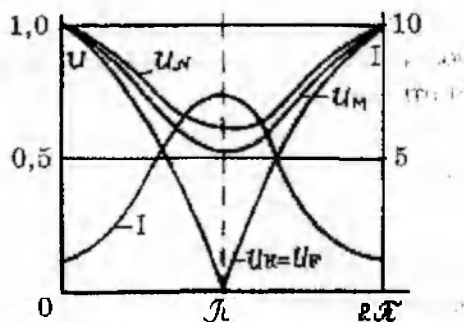


Рис. 10.10 Изменение тока и напряжений в зависимости от угла δ .

Из характера кривых рис. 10.10 следует, что изменение угла δ сказывается весьма существенно. Особенно резко оно отражается на изменении напряжения узла K , где последнее падает до нуля. Однако нужно заметить, что это явилось следствием заданных исходных условий. Достаточно изменить соотношения между реактивностями схемы или только между величинами E_r и U_c , чтобы напряжение в этом узле не снижалось до нуля.

Точку системы, где напряжение имеет наименьшую величину при рассматриваемом исходном режиме, называют электрическим центром качаний. Его положение в системе меняется по мере изменения ее режима работы.

Сейчас представим себе, что именно в точке K схемы рис. 10.8 произошло трехфазное КЗ. В этом случае характер изменения тока в месте КЗ от угла δ , очевидно, аналогичен характеру кривой изменения напряжения \underline{U}_K .

Изложенное дополнительно иллюстрируем векторной диаграммой на рис. 10.11. Ток в месте КЗ определяется суммой взаимных токов от системы \underline{I}_c и генератора \underline{I}_r , сдвинутых друг относительно друга на угол δ . Модуль тока в месте КЗ можно определить по выражению

$$I_K = \sqrt{I_r^2 + I_c^2 + 2I_r I_c \cos \delta}. \quad (10.34)$$

Максимальное значение тока КЗ имеет место, когда $I_r = I_c = I$, в этом случае выражение (10.32) приобретает вид:

$$I_K = I \sqrt{2(1 + \cos \delta)}, \quad (10.35)$$

а, следовательно, наибольшее снижение тока I_K при заданном угле δ характеризует отношение

$$I_K / I_{K(\delta=0)} = I_K / 2I = \sqrt{(1 + \cos \delta) / 2}, \quad (10.36)$$

которое не выйдет за пределы 0,95, если согласно (10.36) $\delta \leq 37^\circ$.

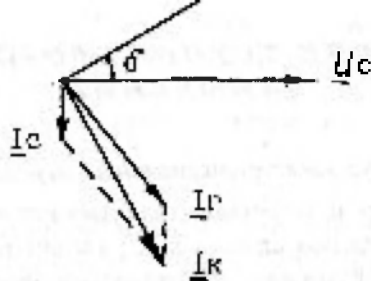


Рис. 10.11. Векторная диаграмма токов и напряжения в месте КЗ.

Таким образом, когда сдвиг между векторами ЭДС источников питания не превышает примерно 40° , пренебрежение качанием генераторов приводит к превышению тока в месте КЗ не более чем на 5%, что находится в рамках точности практических расчетов.

Контрольные вопросы

1. Чем характеризуются замыкания на землю в сетях напряжением 6-35 кВ?
2. К каким последствиям приводят однофазные замыкания на землю в сетях с незаземленной нейтралью?
3. Каково назначение дугогасящих катушек и когда они устанавливаются?
4. Что такое тепловой спад тока и в каких случаях его следует учитывать?
5. Каковы особенности расчета тока КЗ в установках до 1000 В?
6. Как определяется активное сопротивление при КЗ на различных ступенях распределения электрической энергии в сети напряжением до 1 кВ?
7. В чем заключаются особенности КЗ в питающих сетях напряжением 330 кВ и выше?
8. Каковы общие зависимости, используемые при расчетах токов КЗ в питающих сетях?
9. Каковы особенности расчета КЗ в сетях повышенной частоты?
10. Как приближенно учитываются качания генераторов в расчетах КЗ?
11. Что такое электрический центр качаний?

УРОВНИ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

11.1. 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, увеличение 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 предъявления повышенных требований в отношении функционирования коммутационной аппаратуры, релейной защиты, системной автоматики, а также электродинамической и термической стойкости элементов ЭЭС.

При создании ЭЭС 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 ЭЭС.

Качество переходных процессов с точки зрения согласования с требованиями, предъявляемыми к энергетическим системам и их элементам, характеризуют качественными и количественными показателями. Последние обычно являются функциями зависимостей параметров режима от времени или их предельными значениями и содержат определенную информацию. Показателям 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 течении которого СЭС переходит из одного устойчивого состояния работы в другое установившееся состояние.

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 $t_{р.з.}$ и собственного времени отключения коммутационной аппаратуры $t_{с.откл.}$:

$$\tau = t_{р.з.} + t_{с.откл.} \quad (11.1)$$

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.

Количественными оценками характера переходного процесса являются коэффициент затухания периодической составляющей тока КЗ

$$\gamma_{n\tau} = I_{n\tau} / I'' \quad (11.2)$$

и коэффициент затухания апериодической составляющей тока КЗ

$$\gamma_{a\tau} = i_{a\tau} / i_{a\tau=0}. \quad (11.3)$$

3. По опасности последствий для оборудования ЭЭС, которая оценивается соответственно следующими показателями переходного процесса изменения тока КЗ: электродинамической

стойкостью элементов ЭЭС (проверяется по ударному току при трехфазном КЗ); термической стойкостью (оценивается по наибольшему тепловому импульсу тока при трехфазном или двухфазном КЗ)

$$B_k = \int_0^t i_k(t) dt \quad (11.4)$$

4. По существенности влияния параметров аварийного переходного процесса на нормальные режимы работы ЭЭС и ее элементов. Для СЭС предприятий оценки этого влияния отражаются в зависимостях показателей качества электрической энергии (ГОСТ 13109-67) у электроприемников со сложным режимом потребления энергии от уровня мощности КЗ:

коэффициентом несинусоидальности

$$K_{нс} = S_{н.а} / S_{кз} \leq 0,05, \quad (11.5)$$

который пропорционален суммарной мощности преобразовательных агрегатов $S_{н.а}$ и обратно пропорционален мощности КЗ;

коэффициентом несимметрии

$$P_{н} = S_{н.о} / S_{кз} \leq 0,02, \quad (11.6)$$

который пропорционален мощности однофазной нагрузки $S_{н.о}$ и обратно пропорционален мощности КЗ;

колебаниями напряжения

$$\delta U = (\Delta P r_{рез} / x_{рез} + \Delta Q) / S_{кз} \quad (11.7)$$

которые пропорциональны набросу мощности реактивной нагрузки ΔQ и обратно пропорциональны мощности КЗ;

колебаниями частоты

$$\Delta f = (\Delta P / \Delta t) / (2 \pi S_{кз}), \quad (11.8)$$

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.

11.2. Способы ограничения токов короткого замыкания

Уровни токов и мощностей КЗ характеризуют ожидаемые условия работы электрооборудования ЭЭС в аварийных режимах. Они определяют выбор сечения шин, токопроводов, проводов и кабелей, отключающую и коммутационную способность 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 ЭЭС решается технико-экономическая задача ограничения уровней токов и мощностей КЗ до значений, допустимых параметрами электрооборудования, которые экономически целесообразно применять. В процессе эксплуатации ЭЭС, сопровождающейся их развитием с включением новых источников 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 направляемые 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 относится; выбор структуры и схемы электрических соединений элементов ЭЭС; стационарное и авто-

матическое 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.

Структура и схемы электрических соединений элементов ЭЭС выбираются на стадии ее проектирования и реконструкции. В основу принимаемых решений при этом должны быть положены следующие принципы [4].

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 пунктов трансформации 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 большого 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

3. Построение и выбор конфигурации электрической сети (радиальной, магистральной, радиально-магистральной) должны обосновываться (наряду с такими основными факторами, как надежность, 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.

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. 11.1,а) выполняют в нормальном режиме таким образом, чтобы максимальный уровень тока КЗ в конкретном узле нагрузки не превышал допустимый по параметрам установленного электрооборудования (рис. 11.1,б,в).

Автоматическое деление сети осуществляют в аварийных режимах последовательной локализацией места КЗ (рис. 11.1,г). При КЗ на присоединении А производится отключение части источников питания места повреждения (выключателем QS2 и 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.

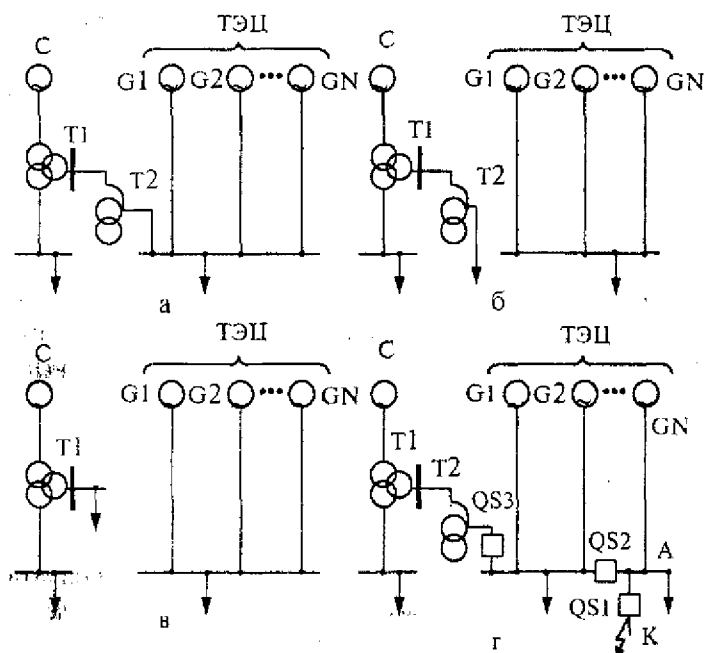


Рис. 11.1. Деление исходной схемы сети (а) на стационарное (б,в) и автоматическое (г).

Совместно с раздельной работой источников электрической энергии разукрупнение подстанции 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 с использованием АВР.

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. 11.2 показаны варианты схем электрических соединений, которые рекомендуется использовать в связи с повышением единичной установленной мощности трансформаторов.

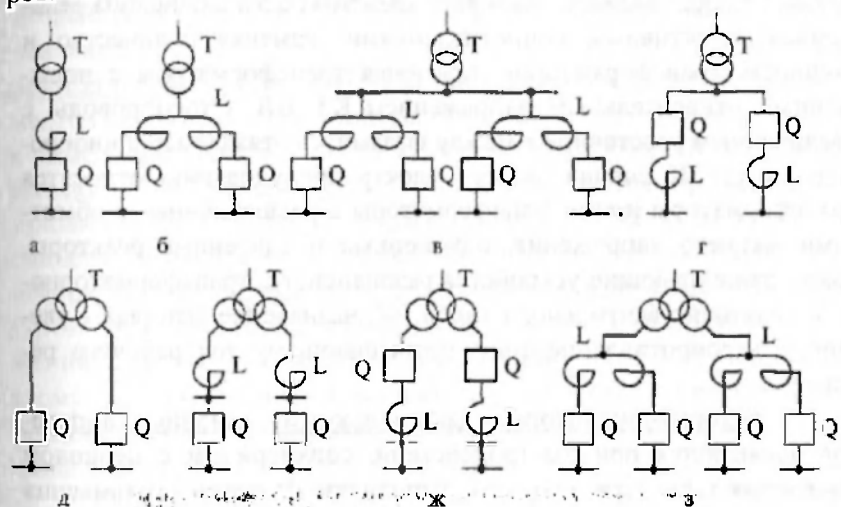


Рис. 11.2. Варианты схем электрических соединений ГПП с ограничением токов КЗ на шинах вторичного напряжения при единичной мощности трансформаторов: а - 25-40 МВ·А; б - 32-63 МВ·А; в - 63-80 МВ·А; г - 63-100 МВ·А; д - 25-80 МВ·А; е - 40-80 МВ·А; ж - 63-80 МВ·А; з - 100 МВ·А.

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. Сек-

ционирование на всех ступенях распределения электрической энергии 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 низшего 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 трансформаторов, 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 низшего напряжения, одноцепные и сдвоенные реакторы, токоограничивающие устройства резонансного, трансформаторного и реактивно-вентильного типов [4], 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. 11.3). 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.

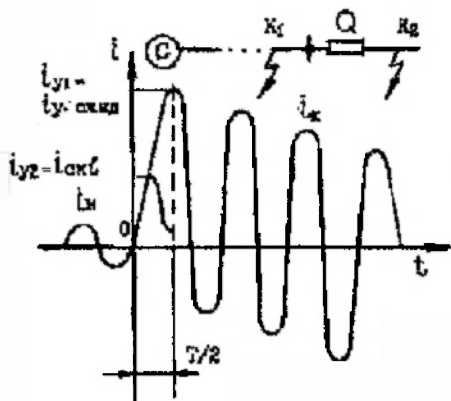


Рис. 11.3. Ограничение коммутационным аппаратом Q электродинамического воздействия тока КЗ со значения i_{y1} до значения i_{y2} .

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.

Таким образом, ограничение мощностей токов КЗ в ЭЭС производится правильным проектированием схем их подстанций и электрических сетей. Выбор способа ограничения мощностей и токов КЗ неоднозначен и представляет собой совокупность мер, комплексно решающих целый ряд вопросов выбора параметров электрооборудования и режимов его работы на основе технико-экономических расчетов.

При продолжительности КЗ более 5 мс проявляется тепловое действие тока, которое может быть уменьшено ускорением отключения поврежденной цепи.

Весьма существенным фактором изменения значений токов КЗ, которые протекают в контурах проводники - земля, является изменение

11.3. 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 ЭЭС, предусматривает применение 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 соединения 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 (рис. 11.1,г), 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.

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 концентрированном размещении обмоток у двухобмоточных трансформаторов обмотка низшего напряжения располагается внутри, а высшего напряжения - снаружи; у трехобмоточных трансформаторов обмотка среднего напряжения помещается между обмотками низшего напряжения и высшего напряжения.

Снижение уровня мощности КЗ на выводах понижающих трансформаторов (рис. 11.4) определяется выражениями:

$$\text{для двухобмоточных трансформаторов} \\ S_{с.з.}/S_{с.л} = 1/(1+U_{к}S''_{к1}/(100S_{гр.ном})); \quad (11.9)$$

$$\text{для трехобмоточных трансформаторов} \\ \left. \begin{aligned} S''_{к2} / S''_{к1} &= 1 / \left(1 + 2U_{кв-н} S''_{к1} / (100S_{гр.ном}) \right); \\ S''_{к3} / S''_{к1} &= 1 / \left(1 + 2U_{кв-с} S''_{к1} / (100S_{гр.ном}) \right). \end{aligned} \right\} \quad (11.10)$$

Из (11.9) и (11.10) следует что снижение мощности КЗ зависит от напряжения КЗ между соответствующими обмотками трансформатора, 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 220/6-10 кВ и мощность 31,5-125 МВ·А - в пределах 10,6-14%. Поэтому для ограничения уровня токов КЗ на шинах вторичного напряжения, согласно (11.9) и (11.10), следует выбирать трансформаторы с повышенным для соответствующих обмоток напряжением КЗ, разукрупнять по мощности понижающие подстанции на связях с мощной ЭЭС, использовать раздельную работу трансформаторов.

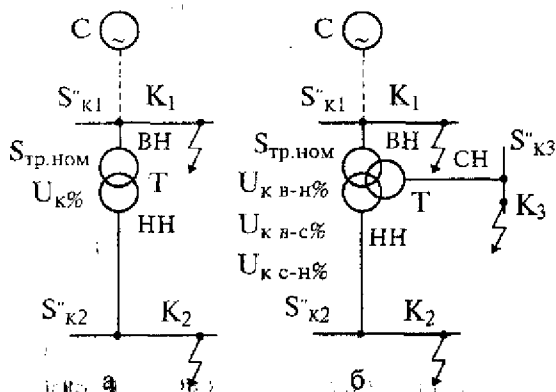


Рис. 11.4. К ограничению уровня мощности КЗ выбором параметров двухобмоточных (а) и трехобмоточных (б) трансформаторов.

Трансформаторы и автотрансформаторы могут выполняться с расщепленными обмотками низшего напряжения. Части расщепленной обмотки размещаются симметрично относительно обмотки высшего напряжения, имеют самостоятельные выводы и допускают произвольное распределение нагрузки между обмотками. Ограничение токов 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. 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. 11.5,а), вводов (рис. 11.2 и 11.5,б), секции (рис. 11.5,в) и их сочетания (рис. 11.5,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. Токоограничивающее 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.

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.

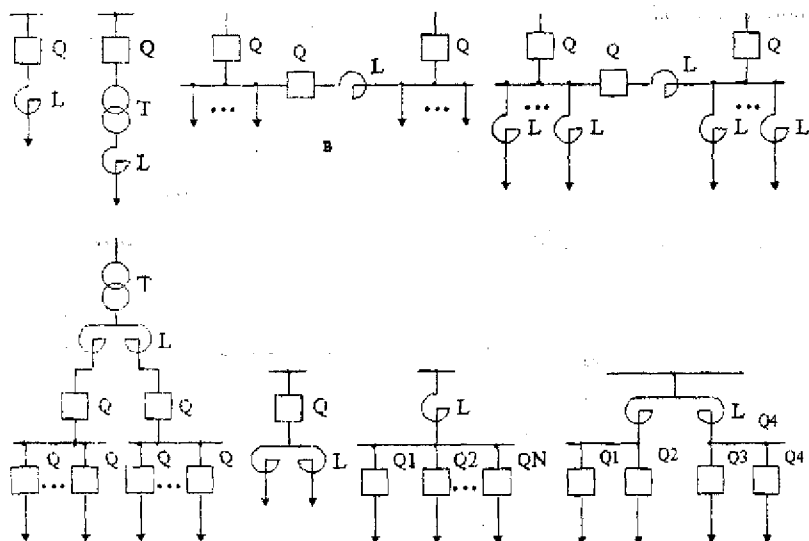
Первоначальным действием при выборе реактора является определение его индуктивного сопротивления. Исходя из необходимого уровня мощности КЗ за реактором $S_{кз} = S_{норм}$, требуемое сопротивление в процентах или в омах рассчитывают соответственно по формулам

$$x_p \% = ((S_{\delta}/S_{кз}) - x_{*c,\delta}) \cdot 100 \cdot I \cdot U_{\delta} / (I_{\delta} U_{\delta}); \quad (11.11)$$

$$x_p = (x_p \% / 100) U_c / (\sqrt{3} I), \quad (11.12)$$

где $x_{*c,\delta}$ - сопротивление связи данного узла сети с источником электрической энергии, приведенное к базисным условиям;

I, U_c - рабочий ток и напряжение сети, соответствующее длительному режиму работы реактора.



а.б.

Рис. 11.5. Схемы реактирования присоединений (а), вводов (б), секций (в) и их сочетаний (г).

По току, напряжению сети индуктивному сопротивлению выбирают реактор с ближайшим большим стандартным значением x_p , который проверяют (при необходимости) по значению остаточного напряжения

$$U_{ост} \geq 0,6U_c. \quad (11.13)$$

Секционные реакторы ограничивают ток КЗ на сборных шинах и присоединениях. По сравнению с линейными реакторами они оказывают меньшее токоограничивающее действие, так как рассчитываются на большие 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 в начале задаются и путем поперечных расчетов изменяют его до значения, допустимого параметрами устанавливаемого электрооборудования. По

значению остаточного напряжения, электродинамической и термической стойкости секционные реакторы не проверяют.

Сдвоенные реакторы конструктивно подобны обычным реакторам, но от средней точки обмотки имеется дополнительный вывод. В случае применения сдвоенных реакторов источник может быть присоединен к средней точке, а потребители - к крайним, или наоборот.

Преимуществом сдвоенного реактора является то, что в зависимости от схемы включения и направления токов в обмотках индуктивное сопротивление его может увеличиваться или уменьшаться. Это свойство сдвоенного реактора обычно используется для уменьшения падения напряжения в нормальном режиме и ограничения токов при КЗ.

Ветви реактора выполняют на одинаковый номинальный ток $I_{ном}$, а средний вывод - на удвоенный номинальный ток ветви $2I_{ном}$. За номинальное сопротивление сдвоенного реактора принимают относительное сопротивление ветви обмотки при отсутствии тока в другой ветви

$$x_p = x_c = \omega L,$$

или

(11.14)

$$x_p \% = x_c \% = (x_c \sqrt{3} I_{ном} \cdot 100) / U_{ном},$$

где L - индуктивность ветви реактора (индуктивности ветвей в реакторе обычно равны между собой).

Выбор сдвоенного реактора аналогичен выбору одноцепного реактора. Значение тока каждой ветви сдвоенного реактора должно быть не менее 0,675 номинального тока обмотки трансформатора либо суммарного тока нагрузки. При этом предполагается равномерное распределение нагрузки между ветвями реактора.

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 [4].

В управляемых реакторах сопротивление изменяется подмагничиванием магнитопровода потоком дополнительных управляющих обмоток. Результирующим сопротивлением реактора можно управлять также путем использования вентиля тиристорных выключателей.

В насыщающихся реакторах сопротивление возрастает в результате изменения степени насыщения магнитопровода при увеличении тока КЗ, проходящего 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 электроустановки 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

$$i_{y,скв} < i_{y,ожд} \quad (11.15)$$

где $i_{y,ожд}$ - ожидаемый ток, который возник бы в сети при отсутствии в ней предохранителя.

Токоограничивающие предохранители применяются в сетях напряжением до 35 кВ. Они характеризуются следующими по-

казателями: 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 $t_{пл}$, времени отключения $t_{откл}$ и тока ограничения $i_{у.скв}$ от периодической составляющей $I_{п.к}$ ожидаемого тока КЗ.

Токоограничивающее действие предохранителей определяется номинальным током плавкой вставки $I_{ном.пл}$, а также значениями периодической составляющей и ударного тока КЗ при отсутствии в сети предохранителя. Если степень токоограничения оценивать по коэффициенту ограничения

$$K_{огр} = i_{у.скв} / i_{у.ожид}, \quad (11.16)$$

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.

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, контролирующих ток КЗ и его первую производную. Ток КЗ ограничивается за время около 0,5 мс при полном отключении сети за 5 мс.

Недостатком 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 быстродействующих электромагнитных элементов. В ограничителях сопротивлением дуги уровень тока КЗ снижается до такого значения, при котором электрическую цепь может разомкнуть выключатель, работающий совместно с ограничителем.

Устройства, включаемые в цепь заземления нейтрали силовых элементов, могут иметь различное целевое назначение, так как режим нейтрали сети влияет на решение многих вопросов электроснабжения: обеспечение 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. По данным исследований [4], ток однофазных КЗ может превышать ток трехфазного КЗ на 25%; поэтому их необходимо рассчитывать с целью принятия мер для ограничения однофазного КЗ.

Режим работы нейтралей сетей в СЭС зависит от уровня напряжения, значения емкостных токов КЗ на землю, требований безопасности и рабочей среды предприятий. С глухозаземленной нейтралью работают сети напряжением до 1 кВ. В условиях рабочей среды, где определяющим фактором являются требование электро- и взрывобезопасности, сети напряжением до 1 кВ выполняют с изолированной нейтралью. С изолированной или заземленной через дугогасящие реакторы нейтралью работают сети напряжением 6-35 кВ. С эффективно-заземленной нейтралью эксплуатируются сети напряжением 110 кВ и выше с большими токами КЗ на землю, когда коэффициент замыкания на землю

$$K_3 = U_{ф.з} / U_{ф.ном} \leq 1,4, \quad (11.17)$$

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 (11.17) выполняется при соотношении параметров сети

$$Z_{0рез}/Z_{1рез} \leq 3 \div 4 \text{ или } X_{0рез}/X_{1рез} \leq 5, \quad (11.18)$$

где $Z_{1рез}$, $X_{1рез}$ - результирующее полное и реактивное сопротивление прямой последовательности;

$Z_{0рез}$, $X_{0рез}$ - то же нулевой последовательности.

Для ограничения токов КЗ на землю разземляют нейтраль части силовых трансформаторов (рис. 11.6,а), включают в цепь нейтрали элементов сети реакторы с линейной характеристикой (рис.11.6,б), насыщающиеся реакторы (рис. 11.6,в), дугогасящие реакторы и резисторы (11.6,г), нелинейные сопротивления (11.6,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. 11.6,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).

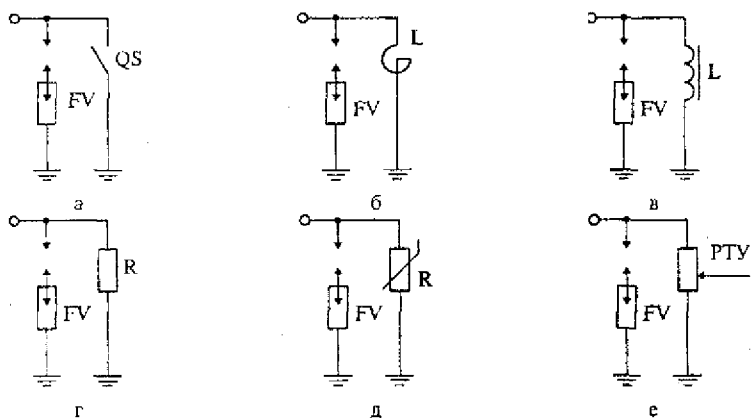


Рис. 11.6. Схемы, поясняющие выполнение рабочего заземления нейтрали.

Нейтрали заземляются через дугогасящие реакторы для компенсации емкостного тока сети при замыканиях на землю. Дугогасящий 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 значении 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 напряжении 3-6 кВ, более 20 А - при напряжении 10 кВ и более 15 А - при напряжении 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 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.

11.4. Оптимизация уровней токов короткого замыкания

Система электроснабжения является небольшой частью ЭЭС, где происходит формирование исходного при проектировании уровня токов КЗ. Если собственных источников электрической энергии СЭС 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 токов КЗ в узлах нагрузки зависят от структуры СЭС, параметров ее сетей и состава электроприемников. При проектировании установление оптимального уровня токов КЗ в каждом узле СЭС предусматривает анализ более широкого ряда показателей, 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, потеря мощности и энергии в сетях, ущерб от перерывов в электроснабжении.

Учет действия факторов, определяющих оптимальный уровень токов 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 системой автоматики АВР, АПВ и уменьшить ущерб от 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.

Таким образом, при проектировании СЭС может ставиться технико-экономическая задача снижения уровней токов КЗ в конкретных узлах до оптимальных. Ее целевой функцией являются приведенные затраты

$$Z(S_k) = \sum_{i=1}^n (K_i P_i + K_{\Delta i} P_{\Delta i}) + C_{\Sigma} + \bar{I}_{\Sigma}, \quad (11.19)$$

где K_i - основные капитальные вложения в электрооборудование СЭС (трансформаторы, РУ, электрические аппараты, ЛЭП); $K_{\Delta i}$ - дополнительные вложения в специальное оборудование (надбавки за специальное использование 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 освоенному и специальному электрооборудованию и стоимость потерь электрической энергии; \bar{I}_{Σ} -

суммарный ущерб при снижении уровней мощностей КЗ от пере-рывов в электроснабжении, нарушений устойчивости двигатель-ной нагрузки, снижения надежности электроснабжения и от ухуд-шения качества электрической энергии у потребителей.

Критерием оптимальных уровней мощности КЗ является минимум приведенных затрат (11.19). Для минимизации целевой функции приведенных затрат целесообразно использовать метод дискретной оптимизации [4]. Последний позволяет перейти от оп-тимизации функции многих дискретно изменяющихся переменных (11.19) к исследованию на экстремум функции $Z = f(S_k)$ при учете множества ограничений по различным параметрам дискретной шкалы мощностей электрооборудования, шкале номинальных на-пряжений, нормируемым показателям качества электрической энергии, допустимым потерям мощности и энергии, уровню пере-напряжений, максимальной мощности КЗ и т.д.

Существование большого количества переменных и мно-жества ограничений значительно сужает возможности поиска гло-бального минимума функции (11.19). Поэтому практически более приемлемы частные математические модели оптимизации уровней мощности КЗ. Они могут быть разработаны для конкретных узлов СЭС с выделением наиболее существенных переменных, завися-щих от параметров режима КЗ.

Оптимальное значение расчетного тока КЗ в сетях про-мышленных предприятий должно определяться в основном с уче-том двух факторов:

- 1) обеспечения возможности применения электрических аппаратов с более легкими параметрами и проводников возможно меньших сечений;
- 2) сохранения значений показателей качества электриче-ской энергии в нормируемых пределах.

Для учета других факторов должны быть установлены функциональные зависимости между их количественными показа-телями и параметрами режима КЗ.

11.5. Координация уровней токов короткого замыкания

Координация уровней токов КЗ - это согласование их зна-чений в различных узлах СЭС. По своей постановке она представ-ляет 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, даваемых 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 подстанции глубокого ввода, выбор рабочих напряжений и количества ступеней распределения энергии.

На этапе эксплуатации СЭС необходимость решения вопросов координации токов КЗ возникает при изменениях схемы

электроснабжения, повышения мощности генерирующих источников, мощности или пропускной способности основных элементов, при введении ограничений на режимы работы основного электрооборудования, увеличения 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 СЭС согласованием токов КЗ преследуют такие же цели, как при эксплуатации СЭС. Дополнительной рациональной мерой здесь является строительство новых приемных пунктов связи с ЭЭС и подстанций глубокого ввода для покрытия увеличения электрических нагрузок с использованием разделения 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.

11.6. Примеры расчетов

Пример 11.1. Сравнить режимы параллельной и раздельной работ трансформаторов ГПП (рис. 11.7,а) по значениям начального и ударного токов трехфазного КЗ на шинах низшего напряжения в точке К.

Решение. Принимаем за базисные следующие условия:

$$S_G - S_K = 2000 \text{ МВ}\cdot\text{А}, U_G = 10,5 \text{ кВ. Тогда } I_G = 2000 / (\sqrt{3} \cdot 10,5) = 110 \text{ кА.}$$

Сопrotивления схем замещения (рис. 11.7,б,в) в о.е.:

$$x_1 = S_G / S_K = 2000 / 2000 = 1;$$

$$x_2 = x_3 = x_4 = U_K S_G / (100 S_{\text{тр.ном}}) = 11 \cdot 2000 / (100 \cdot 125) = 1,76.$$

Токи КЗ:

при параллельной работе трансформаторов (рис. 11.7,б)

$$I''_n = I_G / \epsilon = 110 / 31 = 3,5 \text{ кА};$$

$$I_{y.n} = 1 \text{ кА};$$

при раздельной работе трансформаторов (рис. 11.7,в)

$$I''_p = I_G = 110 \text{ кА};$$

i

Переход с раздельной работы трансформаторов ГПП вызовет увеличение тока КЗ на шинках низшего напряжения на

$$(I''_n / I''_p) = 3,5 / 110 = 3,2\%.$$

Пример 11.2. Рассчитать сопротивление реактора напряжением 10 кВ (рис. 11.8,а) для ограничения мощности КЗ на шинках до 200 МВ·А. Мощность КЗ, поступающая от энергетической системы, составляет 3000 МВ·А.

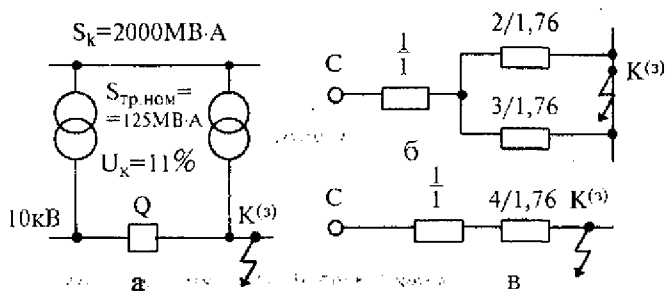


Рис. 11.7. К примеру 11.1

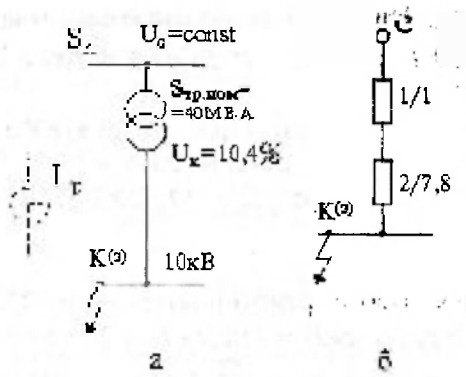


Рис. 11.8. К примеру 11.2.

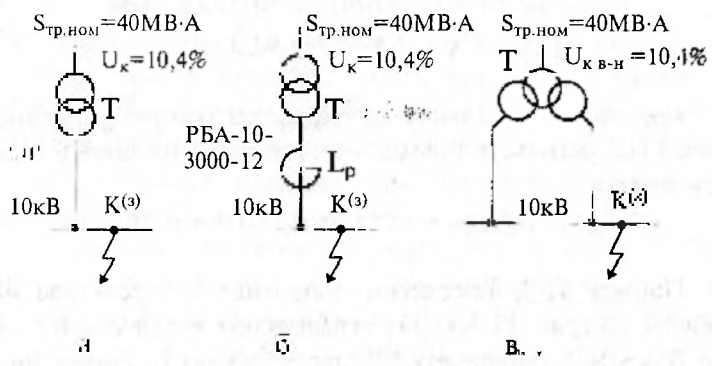


Рис. 11.9. К примеру 11.3.

Решение. Принимаем за базисные условия:

$$S_6 = 3000 \text{ МВ} \cdot \text{А}, U_6 = 10,5 \text{ кВ}. \text{ Тогда } I_6 = 3000 / (\sqrt{3} \cdot 10,5) = 165 \text{ кА}.$$

Сопротивления схемы замещения (рис. 11.8,б) в о.е.:

$$x_1 = S_6 / S_k = 3000 / 3000 = 1;$$

трансформатора

$$x_2 = U_i S_n / (100 S_{тр.ном}) = 10,4 \cdot 3000 / (100 \cdot 40) = 7,8.$$

При номинальных параметрах сети в месте включения реактора

$[U_{ном} = 10 \text{ кВ}; \tilde{I}_{ном} = 40/(\sqrt{3} \cdot 10) = 2,31 \text{ кА}]$ его сопротивление должно быть (11.11)

$$x_{p\%} = [\tilde{S}_\sigma / \tilde{S}_{\kappa 2} - (x_1 + x_2)] I_{ном} U_\delta 100 / (I_\delta U) = \\ = [3000/200 - (1+7,8)] \cdot 2,31 \cdot 10,5 \cdot 100 / (165 \cdot 10) = 9,11,$$

или (11.12)

$$x_p = 9,11 \cdot 10 / (100 \sqrt{3} \cdot 2,31) = 0,227 \text{ Ом}.$$

Этим данным соответствует РБА 10-3000-12 с параметрами $U_{ном} = 10 \text{ кВ}; I_{ном} = 3000 \text{ А}; x_p\% = 12$ ($x_p = 0,23 \text{ Ом}$).

Фактическая мощность КЗ за реактором с сопротивлением, приведенным к базисным условиям,

$$x_{p\delta} = x_p\% \cdot I_\delta \cdot U_\delta / (100 I_{ном} U_\delta) = 12 \cdot 165 \cdot 10 / (100 \cdot 3 \cdot 10,5) = 6,29,$$

составляет

$$S_{\kappa} = S_\delta / x_{p\delta} = 3000 / (1 + 7,8 + 6,29) = 199 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Пример 11.3. При реконструкции подстанции глубокого ввода (рис. 11.9,а) предполагается снизить мощность КЗ на шинах напряжением 10 кВ. Установить степень снижения мощности КЗ для вариантов ее ограничения, показанных на рис. 11.9,б и в. Мощность КЗ на стороне высшего напряжения равна 3000 МВ·А.

Решение. Принимаем за базисные следующие условия: $S_\delta = 3000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$,

$$U_\delta = 10,5 \text{ кВ}. \text{ Тогда } I_\delta = 3000 / (\sqrt{3} \cdot 10,5) = 165 \text{ кА}.$$

Используя результаты вычислений, полученные в предыдущем примере, находим:

для исходного варианта (рис. 11.9,а)

$$S_{\kappa a} = S_\delta / x_{p\delta} = 3000 / (1 + 7,8) = 341 \text{ МВ} \cdot \text{А},$$

для варианта, показанного на рис. 11.9,б,

$$S_{\kappa б} = 3000 / (1 + 7,8 + 6,29) = 199 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Сопротивления обмоток трансформатора для варианта, соответствующего рис. 11.9,в, при отсутствии данных $U_{кн1-н2} \%$ следующие:

$$\dot{x}_B = 0,125 U_{кв-н} S_{\theta} / (100 S_{тр,ном}) = 0,125 \cdot 10,4 \cdot 3000 / (100 \cdot 40) = 0,975;$$

$$x_{нл} = x_{нз} = 1,75 U_{кв-н} S_{\theta} / (100 S_{тр,ном}) = 1,75 \cdot 10,4 \cdot 3000 / (100 \cdot 40) = 13,65.$$

Мощность КЗ на одной из секций шин напряжением 10 кВ

$$S_{кз} = 3000 / (1 + 0,975 + 13,65) = 192 \text{ МВ}\cdot\text{А}.$$

Ограничение мощности КЗ в обоих вариантах реконструкции подстанции глубокого ввода практически одинаковое, поскольку при использовании реактора она уменьшается на 41,6%, а при установке трансформатора с расщепленной обмоткой - на 43,7%.

Контрольные вопросы:

1. Какими факторами и условиями предопределяются уровни мощностей и токов КЗ в ЭЭС?
2. Какие способы ограничения мощностей и токов КЗ можно использовать при проектировании ЭЭС?
3. Какие технические средства применяются для ограничения токов КЗ?
4. Как включаются токоограничивающие реакторы (одноцепные и сдвоенные) в СЭС?
5. В чем суть постановки задачи оптимизации уровня токов 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?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авербух А.М. Примеры расчетов неполнофазных режимов и коротких замыканий. - Л.: Энергия, 1979. - 184 с.
2. Булат В.А. и др. Методическое пособие по дисциплине «Переходные процессы в электрических системах» для студентов специальностей 0301, 0302, 0303, 0305. - ч.1. Мн.: БПИ, 1986. - 74 с.
3. Львов А.П. Электрические сети повышенной частоты. - М.: Энергоиздат, 1981. - 104 с.
4. Некленаев Б.Н. Координация и оптимизация уровней токов короткого замыкания в электрических системах. - М.: Энергия, 1978. - 152 с.
5. Руководящие указания по расчету коротких замыканий, выбору и проверке аппаратов и проводников по условиям короткого замыкания. - М.: МЭИ, 1980. - 321 с.
6. Рюденберг Р.И. Эксплуатационные режимы электроэнергетических систем и установок. - Л.: Энергия, 1981. - 578 с.
7. Свита Л.Н., Силюк С.М. Тексты лекций по курсу «Переходные процессы в электрических системах» для студентов электротехнических специальностей, ч.1. Мн.: БПИ, 1989. - 65 с.
8. Справочник по проектированию электроснабжения /Под ред. В.И.Крупновича и др. - М.: Энергия, 1980 - 456 с.
9. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. - М.: Энергия, 1970. - 520 с.
10. Ульянов С.А. Сборник задач по электромагнитным переходным процессам в электрических системах. - М.: Энергия, 1968. - 456 с.

Оглавление

Предисловие	3
Глава 1	
<i>ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ</i>	5
1.1 Краткая историческая справка	5
1.2. Режимы электрической системы	7
1.3. Причины возникновения переходных процессов	9
1.4. Значимость исследований и расчетов переходных процессов	11
Глава 2	
<i>КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ</i>	14
2.1. Виды, причины и последствия коротких замыканий	14
2.2. Назначение расчетов коротких замыканий	18
2.3. Допущения при расчетах токов короткого замыкания	19
2.4. Расчетные схемы и условия	21
2.5. Составление схемы замещения	22
2.6. Определение параметров короткозамкнутой цепи в относительных единицах, приведенных к базисным условиям	28
2.7. Преобразование схем замещения	31
Глава 3	
<i>ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОСТЕЙШИХ ТРЕХФАЗНЫХ И НЕПОДВИЖНЫХ МАГНИТОСВЯЗАННЫХ ЦЕПЯХ</i>	42
3.1. Переходный процесс в простейших трехфазных цепях	42
3.2. Внезапное короткое замыкание цепи с трансформатором	49
3.3. Включение силового трансформатора на холостой ход	50
Глава 4	
<i>ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПОДВИЖНЫХ МАГНИТОСВЯЗАННЫХ ЦЕПЯХ</i>	54
4.1. Начальный момент внезапного нарушения режима синхронной машины без демпферных обмоток	54
4.2. Начальный момент внезапного нарушения режима синхронной машины с демпферными обмотками	59
4.3. Упрощенные векторные диаграммы синхронной машины	62
4.4. Переходный процесс в синхронной машине без демпферных обмоток	63
4.5. Переходный процесс в синхронной машине с демпферными обмотками	65
4.6. Учет и влияние нагрузки в начальный момент	

переходного процесса	67
Глава 5	
<i>ТОКИ ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ</i>	71
5.1. Короткое замыкание в цепи, питающейся от генератора без автоматического регулирования возбуждения	71
5.2. Короткое замыкание в цепи, питающейся от генератора с автоматическим регулированием возбуждения	73
5.3. Короткие замыкания в удаленных точках системы электроснабжения	76
5.4. Начальный ток короткого замыкания	79
5.5. Установившийся режим короткого замыкания	84
Глава 6	
<i>ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТОКОВ ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ</i>	97
6.1. Определение тока короткого замыкания в произвольный момент времени по расчетным и типовым кривым	97
6.2. Расчет тока короткого замыкания по его общему или индивидуальному изменениям	104
6.3. Учет токов короткого замыкания, создаваемых электродвигателями в установках собственных нужд тепловых электростанций	112
Глава 7	
<i>ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТА НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ</i>	117
7.1. Метод симметричных составляющих	117
7.2. Основные соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений	120
7.3. Схемы замещения отдельных последовательностей	122
7.4. Результирующие ЭДС и сопротивления отдельных последовательностей	129
Глава 8	
<i>ПОПЕРЕЧНАЯ НЕСИММЕТРИЯ</i>	133
8.1. Общие сведения	133
8.2. Однофазное короткое замыкание	136
8.3. Двухфазное короткое замыкание	137
8.4. Двухфазное короткое замыкание на землю	138
8.5. Учет переходного сопротивления в месте короткого замыкания	140
8.6. Правило эквивалентности прямой последовательности	142
8.7. Комплексные схемы замещения	146

8.8. Сравнение токов при различных видах несимметричного короткого замыкания	148
8.9. Векторные диаграммы токов и напряжений	151
8.10. Расчет несимметричных коротких замыканий	156
8.11. Примеры расчетов	160
Глава 9	
<i>ПРОДОЛЬНАЯ НЕСИММЕТРИЯ И СЛОЖНЫЕ ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ</i>	172
9.1. Общие сведения	172
9.2. Разрыв одной фазы трехфазной цепи	174
9.3. Разрыв двух фаз трехфазной цепи	177
9.4. Включение в фазы неодинаковых сопротивлений	179
9.5. Однофазное короткое замыкание с разрывом фазы	183
9.6. Примеры расчетов	189
Глава 10	
<i>ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ОСОБЫХ УСЛОВИЯХ</i>	195
10.1. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью	196
10.2. Увеличение активного сопротивления проводников от их нагрева током короткого замыкания	201
10.3. Расчет токов короткого замыкания в электроустановках напряжением до 1000 В	206
10.4. Короткие замыкания в питающих сетях	218
10.5. Короткие замыкания в сетях повышенной частоты	222
10.6. Учет качаний при анализе электромагнитного переходного процесса	223
Глава 11	
<i>УРОВНИ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ</i>	228
11.1. Качество электромагнитных переходных процессов	228
11.2. Способы ограничения токов короткого замыкания	231
11.3. Применение технических средств ограничения токов короткого замыкания	238
11.4. Оптимизация уровней токов короткого замыкания	250
11.5. Координация уровней токов короткого замыкания	252
11.6. Примеры расчетов	254
Список использованной литературы	259

Учебное издание

Силюк С.М., Свита Л.Н.

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ
ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ**

Подписано в печать 23.04.2000.

Формат 60x84/16, бумага офсетная, усл.п.л. 15,2,

Тираж 100 экз. Зак 168.

Издано на предприятии "Технопринт"

Лицензия ЛВ № 380

Отпечатано на предприятии "Технопринт"

Лицензия ЛП № 203

220027, г. Минск, пр. Ф. Скорины, 65, корп. 14, оф. 209

тел. 239-91-57