

И. Ф. Маруда

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Часть 2.

ТОКОВЫЕ ЗАЩИТЫ

НУЛЕВОЙ

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

ПРИЛОЖЕНИЕ К ЖУРНАЛУ

ЭНЕРГЕТИК

Вниманию специалистов

Вышли в свет следующие выпуски

«Библиотечки электротехника»:

Вуколов В. Ю., Куликов А. Л., Папков Б. В. **Повышение эффективности передачи электроэнергии в распределительных сетях (части 1 и 2)**

Беляев А. В. **Автоматика и защита на подстанциях с синхронными и частотно-регулируемыми электродвигателями большой мощности (части 1 и 2)**

Быстрицкий Г. Ф., Бородич Е. А. **Автономные и когенерационные установки энергоснабжения (справочные материалы)**

Вантеев А. И. **Вопросы безопасной организации работ на воздушных линиях электропередачи**

Языков А. Е., Вайнштейн А. Г. **Подшипники и элементы систем маслоснабжения паровых турбин (части 1 и 2)**

Дьяков А. Ф., Платонов В. В. **Проблемы инженерного образования в электроэнергетике и электротехнике**

Куликов А. Л., Папков Б. В., Шарыгин М. В. **Анализ и оценка последствий отключения потребителей электроэнергии**

Гондуров С. А., Михалев С. В., Пирогов М. Г., Соловьев А. Л. **Релейная защита электродвигателей напряжением 6 – 10 кВ терминалами БМРЗ: Методика расчета**

Гондуров С. А., Илюхин Е. В., Пирогов М. Г., Соловьев А. Л. **Ступенчатые дистанционные защиты линий электропередачи 35 – 220 кВ: Методика расчета**

Хромченко Ф. А., Калугин Р. Н. **Увеличение ресурса сварных соединений трубопроводов ТЭС: справочные материалы**

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении связи по объединенному каталогу «ПРЕССА РОССИИ». Том 1. Российские и зарубежные газеты и журналы, а также в РЕДАКЦИИ.

Подписной индекс «Библиотечки электротехника» – приложения к журналу «Энергетик»

88983

**Адрес редакции
журнала «Энергетик»:**

115280, Москва, ул. Автозаводская, д. 14.

Телефон (495) 675-19-06.

E-mail: energetick@mail.ru

Библиотечка электротехника

Приложение к журналу «Энергетик»

Основана в июне 1998 г.

Выпуск 3 (195)

И. Ф. Маруда

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Часть 2.

ТОКОВЫЕ ЗАЩИТЫ

НУЛЕВОЙ

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Москва

НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик»

2015

УДК 621.316.925
ББК 31.27-05
М 25

Главный редактор журнала «Энергетик» А. Ф. ДЬЯКОВ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

«Библиотечки электротехника»

И. И. Батюк (*зам. председателя*), К. М. Антипов, Г. А. Безчастнов,
А. Н. Жулев, В. А. Забегалов, Ф. Л. Коган, В. И. Кочкарев,
Н. В. Лисицын, В. И. Пуляев, А. И. Таджикибаев

Маруда И. Ф.

М 25 Релейная защита электрических объектов. Часть 2. Токовые защиты нулевой последовательности. — М.: НТФ «Энергопрогресс», 2015. — 64 с.: ил. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик»; Вып. 3 (195)].

Приведены разработки по совершенствованию, повышению эффективности защит сосредоточенных электрических объектов: генераторов, трансформаторов, блоков электростанций, автотрансформаторов, трансформаторов узловых, проходных, ответвительных, тупиковых подстанций.

Определены области применения токовых защит нулевой последовательности воздушных линий электропередачи, автотрансформаторов с традиционными и нетрадиционными алгоритмами функционирования с повышенным техническим совершенством.

Книга выпускается в двух частях.

Для инженерно-технических работников электростанций и энергосистем, проектных и проектно-производственных организаций и производств, научно-исследовательских институтов, может быть использована студентами и аспирантами вузов.

Предисловие

Общепринятым является положение о выполнении резервных защит сосредоточенных электрических объектов токовыми защитами.

Генераторы, трансформаторы, блоки электростанций, трансформаторы проходных, ответвительных, тупиковых подстанций распределительных сетей энергосистем и других объектов имеют в качестве резервных максимальные токовые защиты с дополнительным пуском напряжения или без него. Иключение составляют современные терминалы микропроцессорных защит автотрансформаторов 220 кВ, в которых в качестве резервных защит автотрансформаторов используются дистанционные защиты.

Однако возможности дистанционных защит в них реализованы не в полной мере. Рекомендуемые производителями уставки срабатывания защит не осуществляют резервирование основной дифференциальной защиты автотрансформатора, их защищаемые зоны ограничены.

Брошюра выпускается в двух частях.

В ч. I приводятся анализ этих защит и рекомендации по их использованию и расчету в целях обеспечения резервирования автотрансформаторов.

Резервные защиты защищают объекты с выдержками времени. Их селективность обеспечивается ступенчатым принципом выбора выдержек времени срабатывания, нарастающими от потребителя к источнику питания и поэтому защиты конечных элементов электрической сети могут иметь большие выдержки времени. Например, выдержки времени максимальных токовых защит генераторов на отдельных электростанциях достигают 8 – 9 с, что может приводить к негативным последствиям.

Длительное протекание токов коротких замыканий может вызывать значительные повреждения оборудования, длительное

снижение питающего напряжения во время короткого замыкания — к нарушению надежности и бесперебойности электроснабжения потребителей. Этими и рядом других причин снижается эффективность защит.

Поэтому остаются актуальными вопросы совершенствования резервных защит, повышения их эффективности.

Часть I посвящена совершенствованию резервных защит на основе логических защит объектов путем образования и использования на объектах защит двойной селективности.

Такая защита, образованная на основе резервной защиты объекта, например максимальной токовой защиты, обладает быстрым действием при коротких замыканиях на защищаемом объекте и с выдержкой времени осуществляет резервирование защит и отключающих аппаратов элементов смежной сети. Защита обладает абсолютной селективностью в пределах защищаемого объекта и относительной селективностью при повреждениях на объектах смежной сети.

Для укрупненных блоков ГЭС рекомендуются к использованию резервные защиты с двумя зонами защиты.

Использование их повышает эффективность защиты блоков.

Защиты линий с двусторонним питанием от коротких замыканий на землю используют органы направления мощности короткого замыкания, обеспечивающие их селективность. Органы направления мощности для работы используют напряжение сети в качестве поляризующего вектора.

Цепи напряжения, являясь недостаточно надежным элементом в построении устройств защиты и самих защит, снижают эффективность защит.

В ряде случаев имеется возможность применения способа (альтернативного фазовому) относительного замера токов с использованием селективного органа, сравнивающего по абсолютному значению токи нулевой последовательности короткого замыкания присоединений между собой в органе сравнения и выявлять поврежденное присоединение по наибольшему току.

Часть 2 посвящена совершенствованию токовой направленной защиты нулевой последовательности на основе селективного органа, не требующего цепей напряжения при построении релейной защиты, оценки области его применения в защитах от однофазных коротких замыканий на землю.

В брошюре приводятся в основном результаты разработок, выполненных автором при содействии во внедрении результатов технического руководства энергосистемы ОАО «Волгоградэнерго».

Автор признателен ведущим специалистам по релейной защите доктору техн. наук, проф. А. С. Засыпкину, доктору техн. наук, проф. В. И. Нагаю [ЮРГТУ (НПИ)] — руководителям диссертации автора, материалы которой использованы при написании данной брошюры.

**Замечания и пожелания по брошюре
просим направлять по адресу:
115280, Москва, ул. Автозаводская, 14.
Редакция журнала «Энергетик».**

Автор

Список принятых сокращений

- АПВ — автоматическое повторное включение
- БНТ — бросок тока намагничивания
- ВЛ — воздушная линия
- ВН — высшее напряжение
- ДЗ — дистанционная защита
- КЗ — короткое замыкание
- МТЗ — максимальная токовая защита
- НН — низшее напряжение
- ПС — подстанция
- РЗ — релейная защита
- РЗА — релейная защита и автоматика
- РНМ — реле направления мощности
- СО — селективный орган
- ТКЗ — ток короткого замыкания
- ТН — измерительный трансформатор напряжения
- ТСН — трансформатор собственного расхода
- ТТ — измерительный трансформатор тока
- ЭДС — электродвижущая сила

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

Токовые защиты нулевой последовательности от коротких замыканий

3.1. Общие положения

Традиционно в отечественной практике релейной защиты электрических сетей с эффективно заземленной нейтралью ликвидацию несимметричных повреждений, сопровождающихся протеканием токов нулевой последовательности (НП), осуществляют токовые защиты нулевой последовательности (ТЗНП). Наиболее простым является способ, реализующий токовый принцип, согласно которому защиты участков сети выполняются с выдержками времени, нарастающими от конечного элемента сети к источнику питания [2]. Выдержки времени в защитах могут создаваться с помощью реле с независимыми характеристиками срабатывания — реле времени, и в этом случае нарастание выдержек времени происходит дискретно по ступенчатому принципу или с использованием реагирующих органов с зависимыми характеристиками, время срабатывания которых зависит от кратности тока, протекающего через реле. На рис. 3.1 приведен пример выполнения защиты при ступенчатом принципе нарастания выдержек времени защит t_1, t_2, t_3 в радиальной сети. Область использования этого способа ограничена — он применим лишь в сетях с односторонним питанием.

Подобное построение токовой защиты в кольцевой сети или на транзитной линии практически невозможно из-за возникающих противоречий в выборе выдержек времени для селективного выбора поврежденного участка. Для исключения данных противоречий токовые защиты выполняются направленными.

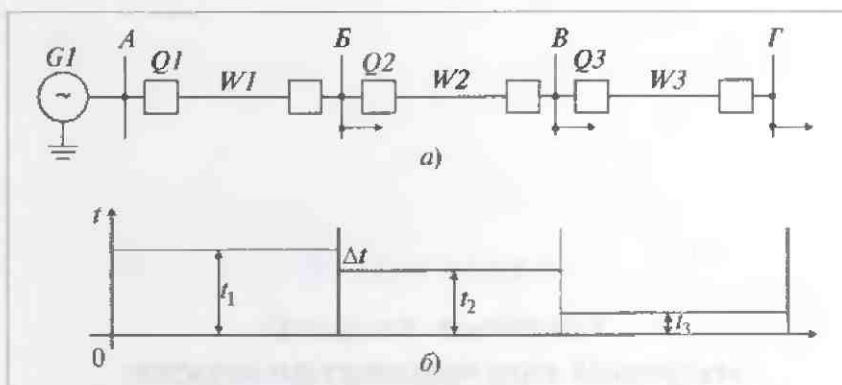


Рис. 3.1. Реализация токовой защиты радиальной сети (а) с нарастающими выдержками времени (б)

3.2. Токвые направленные защиты нулевой последовательности

Способ поляризации по напряжению. В кольцевых сетях, сетях с двусторонним питанием широкое распространение получил способ обеспечения селективности, основанный на сравнении сдвига фазы тока присоединения относительно напряжения сети U_c [1, 2]. В измерительных органах направления мощности или тока напряжение сети является поляризующим, что и обусловило его название.

На рис. 3.2 приведен пример обеспечения селективности при использовании измерительного направленного органа и ступенчатом выборе выдержек времени защит в сети с двусторонним питанием.

Данный способ используется в рассматриваемых защитах объектов всех уровней напряжений 110 – 1150 кВ. Однако органы направления мощности работоспособны не во всех случаях, так как их чувствительность имеет ограничения. Недостаточными для срабатывания направленных органов могут быть напряжения в токовых защитах нулевой последовательности линий вблизи мощных источников питания и, особенно, на протяженных линиях. Недостаточную чувствительность направленные органы могут иметь также в режимах несимметрии при разрывах одной или двух фаз линии.

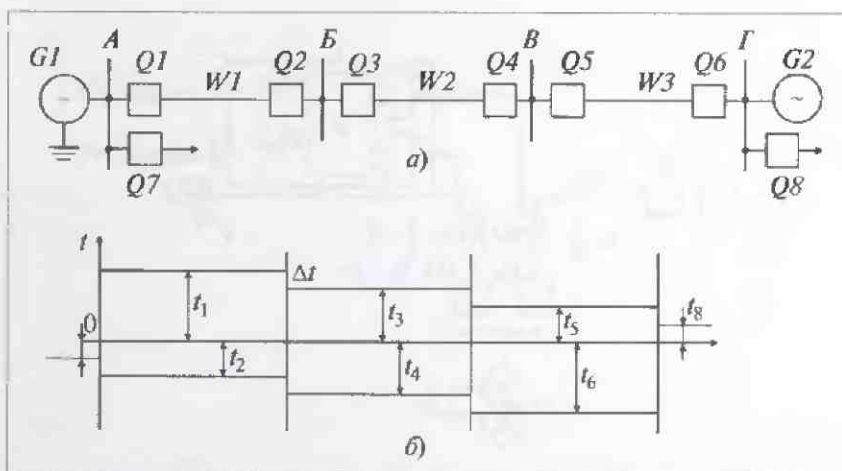


Рис. 3.2. Формирование выдержек времени токовых направленных защит в сети с транзитными линиями

Способ относительного замера токов. Данный способ является альтернативой фазовому способу, основанному на контроле фазовых соотношений напряжений и токов, подводимых к реле. Сущность этого способа заключается в использовании в защитах токового избирателя поврежденного присоединения – селективного органа [30], сравнивающего по абсолютному значению токи нулевой последовательности короткого замыкания присоединений между собой в органе сравнения, и выявления поврежденного присоединения по наибольшему току. Способ основан на использовании в устройстве многоплечевой схемы сравнения на равновесие (баланс) напряжений, для которой токи присоединений преобразуются в напряжения, выпрямляются и затем сравниваются по абсолютному значению. Каждое плечо устройства имеет исполнительный орган в виде направленного органа: поляризованного реле или нуль-индикатора (подробнее см. § 3.3).

При коротком замыкании на землю ток в поврежденном присоединении наибольший, и в схеме сравнения от него протекает ток, замыкаясь через остальные плечи. В плече с наибольшим током он протекает в положительном (полярном) направлении исполнительного органа, что обеспечивает срабатывание, а в остальных — в отрицательном (неполярном) направлении, и их исполнительные органы не срабатывают. Таким образом, выявляется присоединение с коротким замыканием.

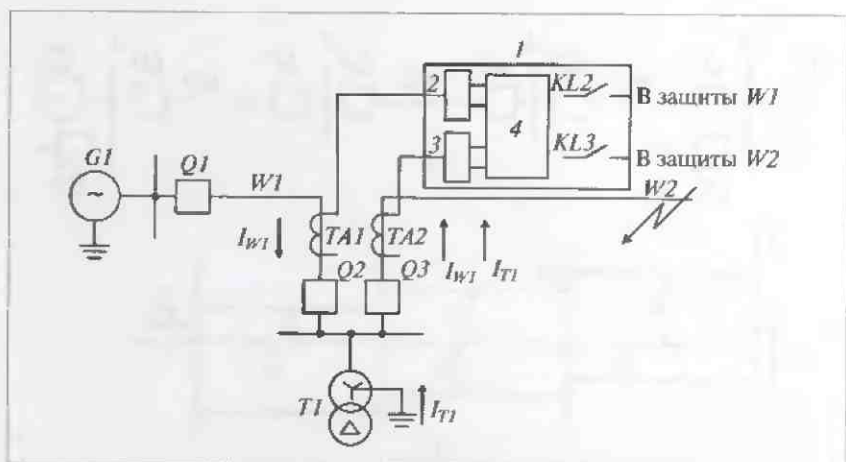


Рис. 3.3. Схема включения токового избирателя поврежденного присоединения на токи нулевой последовательности подстанции с двумя линиями и трансформатором с заземленной нейтралью:

1 — поврежденное присоединение; 2, 3 — преобразователи тока в напряжение (в виде трансреакторов); 4 — орган сравнения на баланс напряжений; KL1, KL2 — контакты выходных реле

На рис. 3.3 приведена схема включения токового избирателя поврежденного присоединения на токи нулевой последовательности подстанции с двумя линиями и трансформатором с заземленной нейтралью. При КЗ на землю на линии W2 токи в линиях W1, W2 отличаются на значение тока нейтрали трансформатора T1, и для токового избирателя поврежденного присоединения созданы условия для выявления поврежденного присоединения:

$$|I_{W2}| > |I_{W1}|,$$

где $I_{W2} = I_{W1} + I_{T1}$.

Реализация данного способа не предполагает использования напряжения сети, что позволяет исключить установку на подстанции трансформатора напряжения и наличие его вторичных цепей в защите. Вместе с тем, так как устройство токового избирателя поврежденного присоединения включается на токи нулевой последовательности присоединений, его токовые цепи аналогичны токовым цепям дифференциальной защиты шин и их разветв-

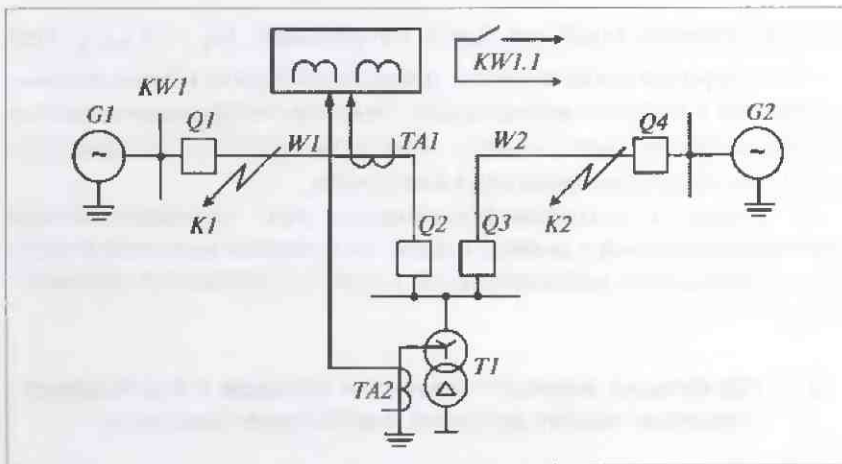


Рис. 3.4. Схема включения токового избирателя с подключением к ГТ линии и нейтрали трансформатора

ленность является ограничивающим фактором использования подобного технического решения. Его целесообразно использовать на объектах с числом присоединений, не превышающим 3 – 4 на секцию.

Способ токовой поляризации. На проходных подстанциях при отсутствии трансформаторов напряжения 110 – 220 кВ и выше возникает необходимость применения токовой поляризации в реле направления мощности защит от замыканий на землю линий и трансформаторов [31]. В этом случае для поляризующей обмотки направленного измерительного органа $KW1$ используют ток нулевой последовательности нейтрали трансформатора (рис. 3.4).

Поляризующая обмотка реле может включаться на трансформатор тока, устанавливаемый в нейтрали трансформатора, или на встроенный трансформатор тока вывода нейтрали трансформатора, если он имеется, или на встроенные трансформаторы тока на сторонах высшего или среднего напряжений, соединяемые в фильтр токов нулевой последовательности. Подобное включение направленного органа обеспечивает его правильное функционирование в схемах подстанций с двухобмоточными трансформаторами. В этом случае при КЗ на землю на линиях $W1$ или $W2$ фаза тока нулевой последовательности $3\dot{I}_0$ в цепи нейтрали трансфор-

матора остается такой же, как и напряжения $3\dot{U}_0 = -3\dot{I}_0 Z_{0T}$ (где Z_{0T} — сопротивление нулевой последовательности трансформатора), что позволяет использовать токовую поляризацию вместо поляризации по напряжению. При этом требуется специальное исполнение реле направления мощности.

В случаях с автотрансформаторами или трехобмоточными трансформаторами с заземленными нейтральными высшего и среднего напряжений данный способ имеет ограниченное применение.

3.3. Проблемы чувствительности органов направления токовых защит нулевой последовательности

Общие положения. Как отмечено в § 3.2, проблемы чувствительности токовых направленных защит в основном сводятся к проблемам чувствительности органов направления мощности. Измерительные направленные органы используют две электрические входные величины: напряжение и ток. Широкое распространение получили системы, использующие индукционный и время-импульсный принципы, заключающиеся в сравнении по фазе двух синусоидальных величин, сформированных из напряжения и тока.

Чаще всего недостаточную чувствительность по напряжению имеют направленные органы защит линий подстанций, содержащих мощные автотрансформаторы, трансформаторы, когда сопротивление нулевой последовательности, приведенное к шинам подстанции с защищаемой линией, мало и напряжение нулевой последовательности на шинах подстанции при КЗ в конце линии или в зоне дальнего резервирования недостаточно для срабатывания направленного органа.

Работоспособность защит в таких случаях обеспечивается двумя путями: использованием в защите дополнительного направленного органа, включаемого по схеме с блокирующим сигналом, и использованием органов направления с повышенной чувствительностью, так называемой компенсацией по току. В первом случае разрешающий направленный орган, срабатывающий при направлении мощности (тока) КЗ от шин в линию, разрешает (закрывающим контактом) работу защиты при КЗ на линии в зоне действия, а блокирующий, имеющий обратную направлен-

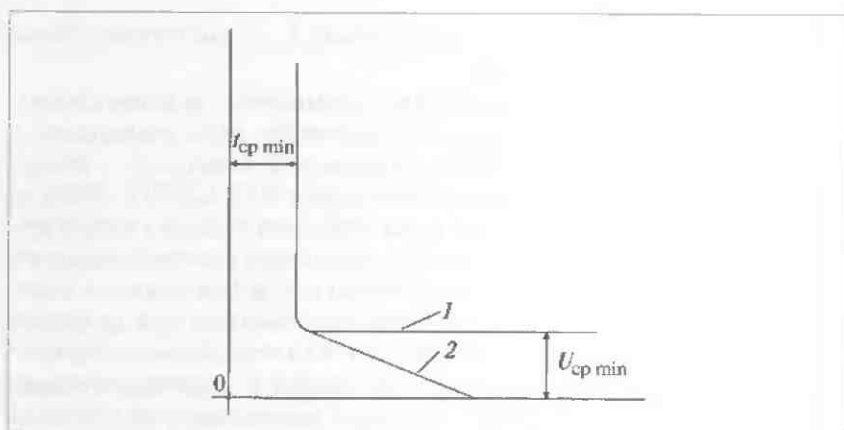


Рис. 3.5. Вольт-амперная характеристика органа направления мощности со «смещением по току»

ность (из линии к шинам), разрешает (размыкающим контактом) работу защиты вне зоны своего действия. Для исключения излишнего действия направленной защиты из-за недостаточной чувствительности блокирующего органа по напряжению необходимо увеличение тока срабатывания органа тока. Таким образом, вся линия и зона резервирования смежной сети охватываются направленными органами защиты.

Примером органа направления мощности повышенной чувствительности является измерительный орган, используемый в шкафах защиты ШДЭ-2801 (-2802). Его вольт-амперная характеристика имеет вид прямого угла (рис. 3.5), прямые линии которого отражают граничные значения срабатывания по току $I_{cp\ min}$ и напряжению $U_{cp\ min}$. Она используется в разрешающем органе направления защит. Орган имеет возможность «смещения по току» вольт-амперной характеристики реле, показанной на рис. 3.5 прямой линией 2. «Смещение по току» может быть представлено как виртуальное вынесение трансформатора напряжения в линию и позволяет повысить чувствительность направленного органа к удаленным КЗ при малых значениях напряжений нулевой последовательности. При токе нулевой последовательности в защите $3I_0 \geq I_{cm}$ (где I_{cm} — ток смещения характеристики) срабатывание реле может происходить и при отсутствии напряжения U_0 , но это не приводит к неправильному срабатыванию реле при КЗ «за спи-

ной» из-за правильно выбранного уровня $I_{\text{см}}$ и достаточно большого уровня U_0 в этом случае.

Вышеприведенными примерами повышения чувствительности защит с использованием блокирующих реле направления мощности, разрешающего реле направления мощности с повышенной чувствительностью в шкафах защит ШДЭ-2801 (-2802) не исключаются случаи неселективных действий токовых защит нулевой последовательности из-за недостаточной чувствительности направленного органа. Они имеют место при КЗ на линиях с взаимоиндукцией в режимах продольной несимметрии при разрывах фаз на линии. Ниже рассматриваются эти случаи более подробно.

Короткие замыкания на землю на линиях с взаимоиндукцией. Влияние взаимоиндукции при коротких замыканиях на землю на радиальной линии или параллельной линии после отключения выключателя у места КЗ характеризуется возрастанием тока нулевой последовательности в другой линии, связанной с ней взаимоиндукцией, снижением тока нулевой последовательности в элементах, подключенных к шинам подстанции, и снижением на них напряжения нулевой последовательности. Для блокирующего направленного органа защиты неповрежденной линии это приводит к повышению чувствительности по току и снижению по напряжению срабатывания. Если чувствительность по напряжению окажется недостаточной, блокирующий орган не выводит защиту из действия при внешних для нее КЗ, защита срабатывает неселективно и неповрежденная линия отключается одновременно с поврежденной [32]. На параллельных линиях, имеющих многоступенчатые защиты нулевой последовательности, такие условия могут создаваться для чувствительных ступеней при коротких замыканиях через большие переходные сопротивления.

На рис. 3.6, а приведен пример длинных радиальных линий 110 кВ с взаимоиндукцией, по которым осуществляется электроснабжение подстанций с крупными синхронными двигателями. Такие подстанции встречаются для электроснабжения газокompрессорных станций, расположенных вдали от источников питания. На рис. 3.6, б, приведена схема замещения при КЗ на землю у шин приемной подстанции.

На рис. 3.7 приведены зависимости напряжения нулевой последовательности на шинах питающей подстанции от параметров радиальных линий с взаимоиндукцией

$$U_{0*} = f(Z_{0M}, Z_{0W} / Z_{0T}),$$

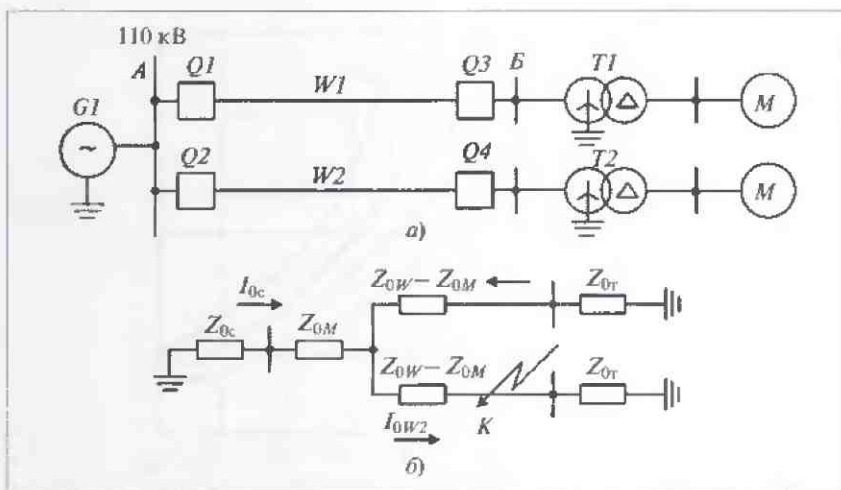


Рис. 3.6. Схема сети «линия – трансформатор» при наличии взаимодукции между цепями (а) и ее схема замещения (б)

где $U_{0*} = U_0 / U_{cp \min}$; U_0 — напряжение на шинах подстанции; $U_{cp \min}$ — минимальное первичное напряжение срабатывания органа направления мощности (например, для защиты с реле РМ-12 $U_{cp \min} = 1,0K_U U_0$, здесь K_U — коэффициент трансформации трансформатора напряжения); Z_{0M} — сопротивление взаимодукции; Z_{0W} — сопротивление нулевой последовательности линии; Z_{0T} — сопротивление нулевой последовательности трансформатора приемной подстанции.

На рис 3.7 двухцепной линии соответствует зависимость I , а одноцепным линиям, расположенным на расстоянии 70 м, — зависимости 2 – 5 при мощности трансформатора: 2 — $S_T = 80$ МВ·А; 3 — $S_T = 40$ МВ·А; 4 — $S_T = 25$ МВ·А; 5 — $S_T = 10$ МВ·А.

При расстояниях между линиями до 70 м кривые напряжений нулевой последовательности располагаются между линиями 1 и 2.

На рис. 3.7 отмечено приведенное первичное минимальное напряжение срабатывания реле направления мощности (РМ-12) U_{cp} . Зона, расположенная ниже U_{cp} , является зоной нечувствительности реле.

Анализ приведенных зависимостей показывает, что границы, при которых наступает нечувствительность реле направления мощности, определяются параметрами схемы замещения: длиной линий, их взаимодукцией и мощностями (сопротивлениями

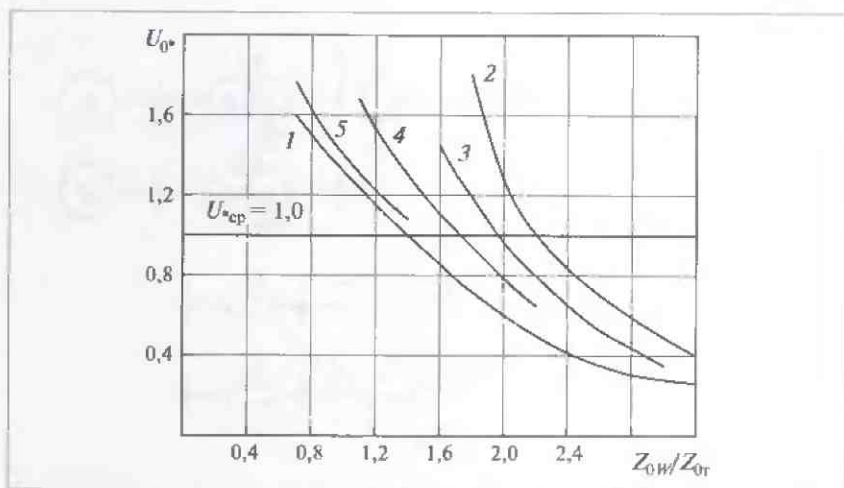


Рис. 3.7. Определение чувствительности по напряжению направленных органов нулевой последовательности на радиальных линиях при наличии взаимной индукции

нулевой последовательности) трансформаторов приемной подстанции.

Зона нечувствительности с увеличением взаимной индукции увеличивается, и наибольшей она является у двухцепных линий и сокращается с уменьшением мощности трансформаторов. Органы направления мощности линий, питающих трансформаторы мощностью $S_T \leq 10$ МВ·А, не имеют зоны нечувствительности (линия 5).

Режимы продольной несимметрии при разрывах фаз на линиях. Несимметричные режимы работы линий могут возникать как в результате действия релейной защиты и работе линии двумя фазами в цикле однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ), так и самопроизвольно при недовключении фазы выключателя, нарушении целостности шлейфов линий при протекании токов КЗ и др. Разрывы фаз, представляющие собой продольную несимметрию, являются источниками напряжений и токов отдельных последовательностей, которые оказывают значительное влияние на поведение релейной защиты, вызывая ее срабатывание, например срабатывание токовых защит нулевой последовательности. Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) такие повреждения, как разрывы фаз на линиях, не рассматриваются и селективная релейная защита для них не преду-

сматривается [18]. Поэтому к защитам линий предъявляются требования, чтобы они были отстроены по принципам действия или параметрам срабатывания от неполнофазного нагрузочного режима [33].

Однако по условиям обеспечения дальнего резервирования в сетях во многих местах появляются очень чувствительные ступени токовых защит нулевой последовательности, которые оказываются чувствительными к токам нулевой последовательности при разрывах фаз на линиях в нагрузочных режимах. Обеспечить отстройку защит повышением уставки тока срабатывания часто не представляется возможным, так как отстраивать приходится от токов с учетом утяжеленных или послеаварийных режимов, когда нагрузки или перетоки мощности по линиям возрастают, что приводит к завышению уставок срабатывания, а это, в свою очередь, приводит к потере чувствительности защиты при коротких замыканиях.

Имеются случаи, когда селективность токовых защит нулевой последовательности линий не обеспечивается органами направления мощности из-за их нечувствительности в режимах при разрывах фаз. Значения напряжения нулевой последовательности могут оказываться недостаточными для срабатывания блокирующих органов направления защит линий на подстанциях сети с мощными источниками и малыми сопротивлениями нулевой последовательности на шинах подстанции. В этих случаях нарушается селективность защит, и неселективно могут срабатывать защиты линий, имеющие более чувствительные уставки по току срабатывания или защиты с меньшей уставкой времени срабатывания.

Ниже рассматривается пример неселективной работы токовых защит нулевой последовательности при разрывах фаз на линиях.

При работе параллельных линий пятью фазами (одна из фаз одной линии отсутствует) характер изменения токов нулевой последовательности данных линий и смежной сети в соответствии с [33] имеют следующие особенности:

- ток на участках, смежных с участком, работающим пятью фазами, уменьшается;
- токи в линии, работающей тремя фазами и параллельной линии с разрывом, увеличиваются;

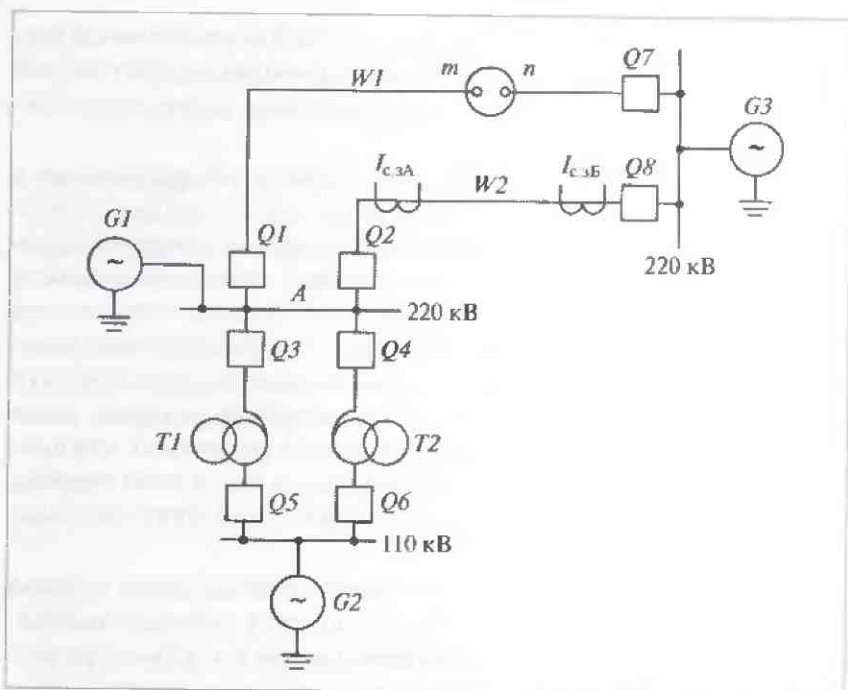


Рис. 3.8. Схема сети с параллельными воздушными линиями и разрывом фаз на одной из них

- токи в линии, работающей двумя фазами, практически остаются неизменными.

Уменьшение токов на смежных участках приводит к снижению напряжения нулевой последовательности на шинах подстанции и в результате — к снижению чувствительности реле направления мощности токовых защит нулевой последовательности линий. При напряжениях нулевой последовательности, недостаточных для срабатывания направленного органа, на неповрежденной линии не срабатывает блокирующий орган направления и не выводит чувствительную ступень защиты из действия. Поэтому она излишне срабатывает на внешнее для нее повреждение и отключает неповрежденную линию одновременно с линией с разрывом фаз.

На рис. 3.8 показана поясняющая схема сети с параллельными линиями 220 кВ с разрывом фаз, а на рис. 3.9 приведены зависимости напряжений нулевой последовательности на шинах 220 кВ

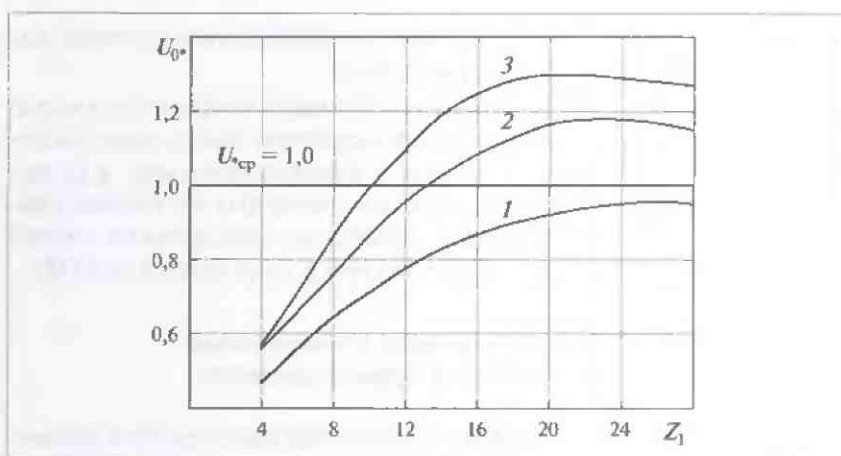


Рис. 3.9. Зависимости напряжения на зажимах реле при разрыве фаз на одной из параллельных линий:

1 — при включенных в работу двух автотрансформаторов $AT1$ (125 МВ·А) и $AT2$ (250 МВ·А); 2 — при включенном в работу автотрансформаторе $AT2$ (250 МВ·А); 3 — при включенном в работу автотрансформаторе $AT1$ (125 МВ·А).

подстанции A от параметров параллельных линий и автотрансформаторов подстанции:

$$U_{0*} = f(Z_1, Z_{0\Sigma}),$$

где $U_{0*} = U_0 / U_{\text{ср min}}$; U_0 — напряжение на шинах подстанции; $U_{\text{ср min}}$ — минимальное первичное напряжение срабатывания органа направления мощности (для реле РМ-12 $U_{\text{ср min}} = 1,0 K_U$, здесь K_U — коэффициент трансформации трансформатора напряжения); Z_1 — сопротивление прямой последовательности параллельных линий в зависимости от их длины; $Z_{0\Sigma}$ — суммарное сопротивление нулевой последовательности на шинах подстанции A в зависимости от числа и мощности включенных в работу автотрансформаторов.

На рис. 3.9 также отмечено первичное минимальное напряжение срабатывания реле направления мощности РМ-12 $U_{* \text{ср}}$ (зона, расположенная ниже прямой $U_{* \text{ср}}$ — зона нечувствительности реле).

Анализ результатов показывает, что границы, при которых наступает нечувствительность направленного органа, определяются параметрами схемы замещения сети: длиной линий, числом и мощностью включенных в работу автотрансформаторов, которые

приводят к изменению суммарного сопротивления нулевой последовательности на шинах подстанции.

Приведенные примеры с недостаточной чувствительностью органов направления мощности при коротких замыканиях на параллельных и радиальных линиях с взаимоиндукцией, в режимах продольной несимметрии при разрывах фаз на линиях свидетельствуют об актуальности проблемы обеспечения линий 110–220 кВ селективными защитами при КЗ и разрывах фаз [34].

3.4. Способ токовых избирателей повреждённого присоединения

Работа селективного органа. Наибольшие перспективы применения способ токовых избирателей поврежденного присоединения может найти для токовых направленных защит нулевой последовательности электрических распределительных сетей 110 – 220 кВ, имеющих в своем составе промежуточные (проходные) подстанции с двумя-четырьмя присоединениями, включая силовые трансформаторы. Реализация способа предполагает использование токов присоединений и их сравнение по абсолютному значению путем преобразования в напряжения и выпрямления, а затем и определение поврежденного присоединения по наибольшему току. При этом не требуется использования информации о напряжении сети. Сигнал отключения i -го присоединения из k присоединений можно представить в виде:

$$F_i = \begin{cases} 1, & |\dot{U}_i(\dot{I}_i)| = \max |\dot{U}_k(\dot{I}_k)|; \\ 0, & |\dot{U}_i(\dot{I}_i)| \leq \max |\dot{U}_k(\dot{I}_k)|, \end{cases}$$

где \dot{I}_i и \dot{I}_k — токи сравниваемых присоединений.

Измерительный орган — селективный орган (токовый селективный орган), реализующий рассматриваемый способ, содержит плечи, которые включаются на токи присоединений через измерительные трансформаторы тока (ТТ), и в которые включены реагирующие, исполнительные органы в виде поляризованных реле или нуль-индикаторов, обладающие направленностью, т. е. способностью срабатывания только при протекании тока в одном направлении. При использовании в качестве реагирующих органов

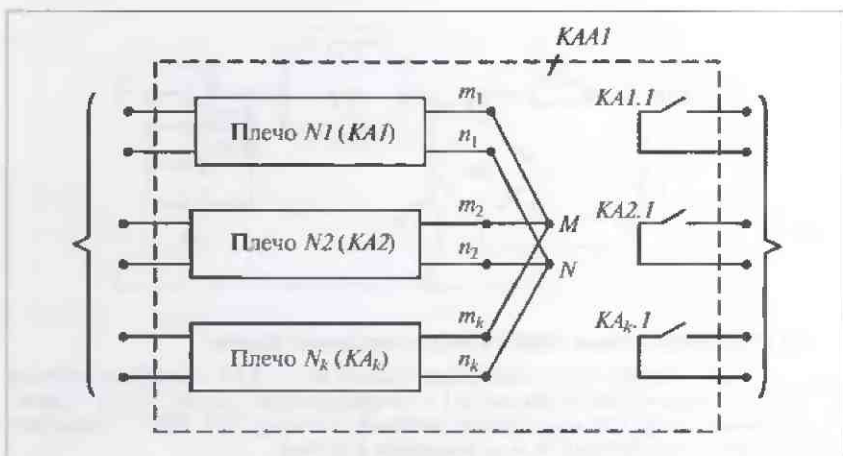


Рис. 3.10. Структурная схема многоплечевого селективного органа

нуль-индикаторов выходными органами плеч являются управляемые ими промежуточные реле.

Исполнительные органы плеч вводят или блокируют токовые защиты нулевой последовательности присоединений.

По исполнению селективные органы могут иметь два плеча [35] или быть многоплечевыми [36]. В многоплечевом селективном органе плечи соединены в звезду.

На рис. 3.10 приведена структурная схема многоплечевого селективного органа: точки M , N — точки соединения плеч в звезду при числе их в селективном органе больше двух.

На рис. 3.11 показан вариант схемы одного плеча селективного органа, формирующего на выходе трансреактора $TAVI$ напряжение, пропорциональное входному току.

Селективный орган работает следующим образом. При большом значении напряжения, например i -го плеча, протекающий от него ток замыкается через балластные резисторы R_n остальных $i \dots k$ плеч.

Для реагирующего органа KA_i i -го плеча протекающий ток является рабочим, и от него срабатывает исполнительный орган i -го плеча, для реагирующих органов $i \dots k$ плеч этот ток — тормозной, не вызывающий срабатывания их реагирующих органов. Сработавший реагирующий орган KA_i вводит и разрешает работу токовых защит нулевой последовательности этого присоединения, а

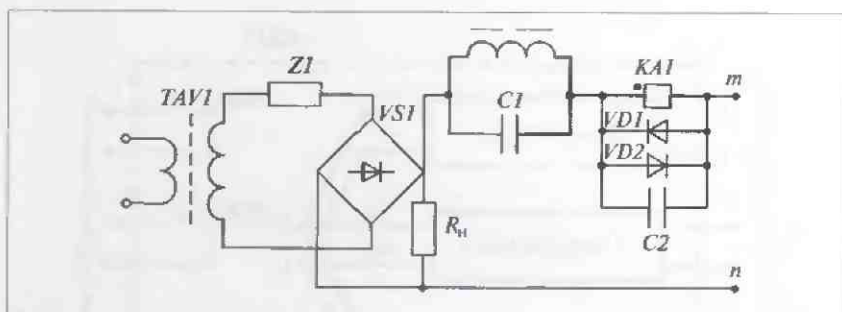


Рис. 3.11. Вариант схемы одного плеча селективного органа:

TAV1 — трансреактор; *VSI* — выпрямительный мост; *KAI* — исполнительный орган; *R_н* — балластный резистор; *Z1* — сопротивление плеча; *L1, C1* — дроссель и конденсатор фильтра-пробки двойной частоты; *VD1, VD2* — защитные диоды; *C2* — конденсатор; *m, n* — выходные клеммы

защиты остальных присоединений блокируются селективным органом и остаются в неработавшем состоянии.

На рис. 3.12 приведена схема замещения многоплечевого селективного органа.

Алгоритм функционирования селективного органа T_1 , отражающий срабатывание одного, например первого, плеча CO_1 при несрабатывании остальных i -х плеч CO_i , при числе плеч, равном k , может быть представлен в виде

$$T_1 = CO_1 \cdot \prod_{i=1}^k \overline{CO_i}. \quad (3.1)$$

Ниже рассмотрена работа селективного органа на основе схемы сравнения (см. рис. 3.10) на примере электрической сети, показанной по рис. 3.13.

При КЗ (точка *K*) на линии *WI* будет открыт выпрямительный мост ее плеча и в схеме сравнения селективного органа будет протекать его ток, как плеча с наибольшим током, остальные плечи будут с открытыми или закрытыми выпрямительными мостами.

На рис. 3.14 приведена схема замещения селективного органа, соответствующая условиям его функционирования при КЗ на линии *WI*. Символами E_1, E_i, E_k обозначены ЭДС соответствующего плеча после выпрямления. Плечи с ЭДС E_1, E_i имеют открытые выпрямительные мосты, а плечо с ЭДС E_k — закрытый выпрями-

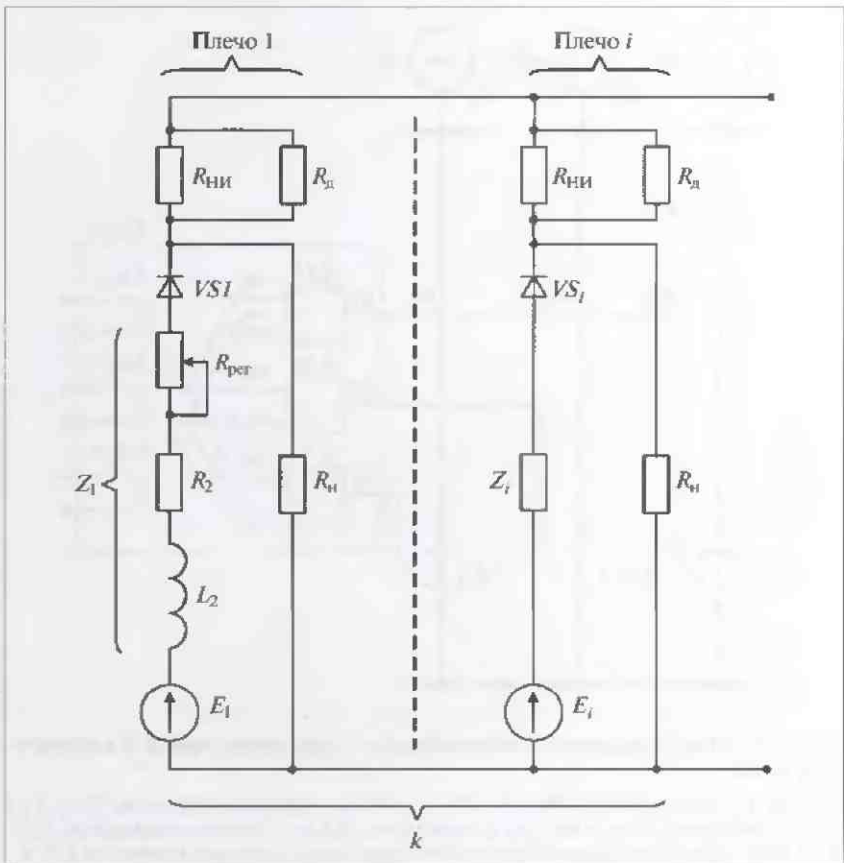


Рис. 3.12. Схема замещения многоплечевого селективного органа:

$Z_1 = R_{\text{пер}} + R_2 + jX_2$ — сопротивление плеча; X_2, R_2 — индуктивное и активное сопротивления вторичной обмотки трансреактора; $R_{\text{пер}}$ — регулируемое сопротивление, служащее для выравнивания контуров плеч селективного органа; $R_{\text{НИ}}$ — входное сопротивление нуля-индикатора; $R_{\text{Д}}$ — сопротивление защитного диода; $R_{\text{и}}$ — балластный резистор, E_1, E_i — ЭДС трансреакторов плеч селективного органа; VS_1, VS_i — выпрямительные мосты; k — число плеч

тельный мост (на рис. 3.14 контакт KL разомкнут). Сопротивления схемы замещения с выпрямленным током $R_1 \approx |Z_1|$; $R_i \approx |Z_i|$.

Упрощая схему замещения селективного органа, приведем ее к одноконтурной, для этого:

- рассматривая ветвь плеча и ветвь его сопротивления нагрузки $R_{\text{и}}$ как параллельные, приведем их к ветви с эквивалентными параметрами;

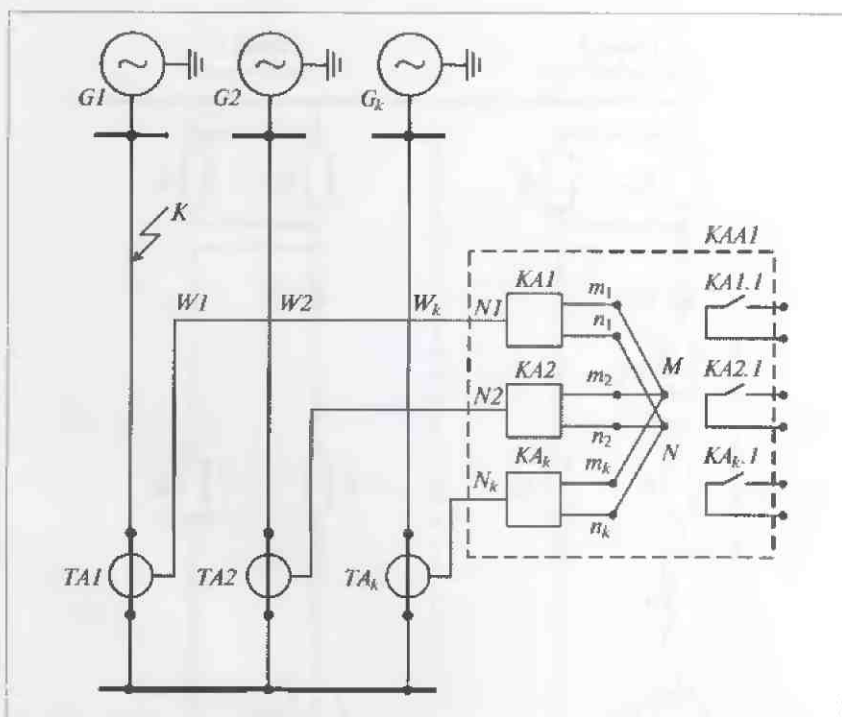


Рис. 3.13. Пример включения многоплечевого селективного органа в электрической сети:

G_1, G_2, G_k — источники; W_1, W_2, W_k — линии электрической сети; TA_1, TA_2, TA_k — измерительные трансформаторы тока; KAA — селективный орган; KA_1, KA_2, KA_k — исполнительные органы плеч селективного органа с номерами 1, 2, k .

• рассматривая затем ветви плеч с эквивалентными параметрами как параллельные, кроме первого, приведем их к ветви с суммарной эквивалентной ЭДС $E_{(2+k)}$ и суммарным общим сопротивлением $R_{(2+k)}$:

$$E_{(2+k)} = \sum_2^k \frac{E_i}{R_i} / \sum_2^k \frac{1}{R_i} \text{ — эквивалентная ЭДС остальных плеч}$$

селективного органа;

$$R_{(2+k)} = 1 / \sum_2^k \frac{1}{R_i} \text{ — эквивалентное сопротивление остальных}$$

плеч.

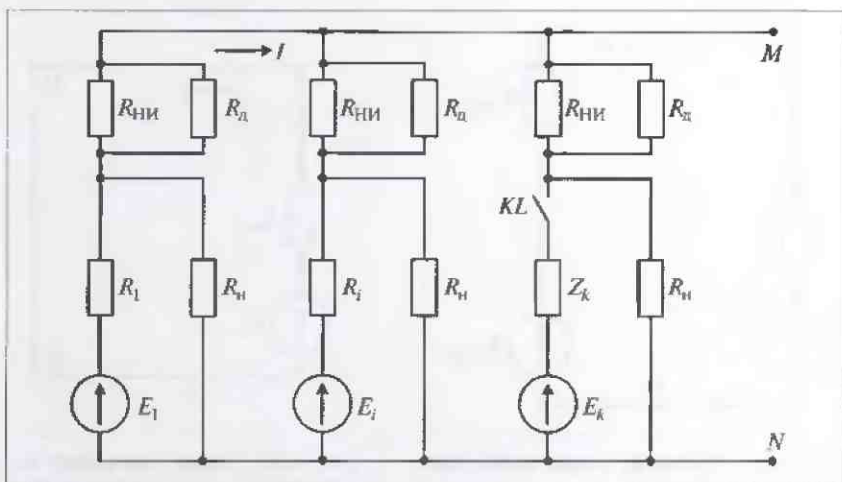


Рис. 3.14. Схема замещения селективного органа для режима КЗ на линии WI

Эквивалентная ЭДС первого плеча селективного органа — E_{13} ; эквивалентное сопротивление первого плеча — R_{13} .

Сопротивление параллельного соединения $R_{НИ}$ и $R_{д}$ при сопротивлении диода в установившемся режиме, близком к нулю, в плечах селективного органа принимается равным нулю.

На рис. 3.15 приведена одноконтурная схема замещения с эквивалентными ЭДС и сопротивлениями первого и остальных плеч.

Ток в ней можно определить следующим образом:

$$I = (E_{13} - E_{(2-k)3}) / (R_{13} + R_{(2-k)3}). \quad (3.2)$$

Выражение (3.2) используется при расчете селективного органа. Оно позволяет определить максимальное значение тока I для выбора параметров элементов селективного органа и расчета их на термическую стойкость.

При неограниченном числе плеч селективного органа (в предельном случае $k \rightarrow \infty$) в выражении (3.2) общее сопротивление плеч $k - 1$ стремится к нулю, т. е. $R_{(2-k)3} \rightarrow 0$. Расчет селективного органа в случае с неограниченным числом плеч следует проводить при значении этого сопротивления равном нулю, т. е. когда точки соединения плеч в звезду M и N в схеме замещения объединены.

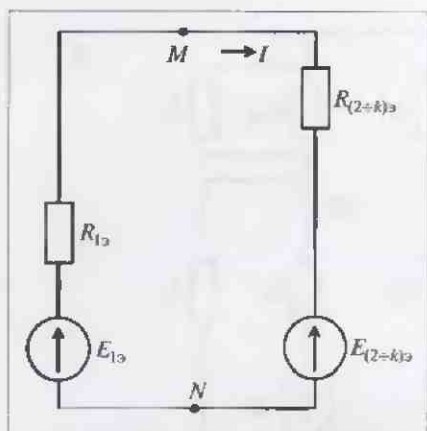


Рис. 3.15. Расчетная схема замещения селективного органа

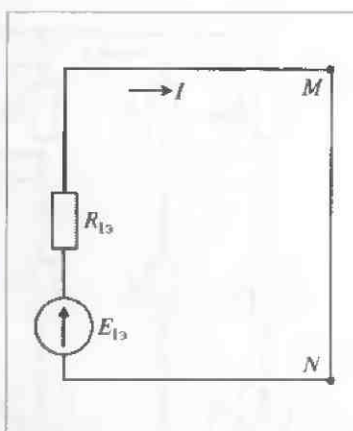


Рис. 3.16. Схема замещения селективного органа с неограниченным числом плеч

На рис. 3.16 приведена схема замещения селективного органа с неограниченным числом плеч.

Эквивалентное сопротивление $k - 1$ плеч принято равным нулю и максимальное значение тока в плече NI в нем

$$I_{\max} = \frac{E_{1\alpha}}{R_{1\alpha}} \quad (3.3)$$

Токи срабатывания селективного органа. По принципу действия селективный орган реагирует на разность сравниваемых токов. Поэтому параметры, характеризующие его срабатывание, относятся к разности токов в плечах. В многоплечевом селективном органе измеряются сочетания разности токов для всех плеч. Это позволяет при равных значениях судить об их идентичности. Конструктивно выполнить плечи селективного органа строго идентичными практически невозможно из-за несовпадения характеристик трансреакторов, диодов выпрямительных мостов, резисторов и др.

Абсолютное значение разности токов при срабатывании представляет собой разность токов в плечах, при которой срабатывает исполнительный орган плеча с большим током:

$$\Delta I_{\text{ср}} = I_{\max} - I_i, \quad (3.4)$$

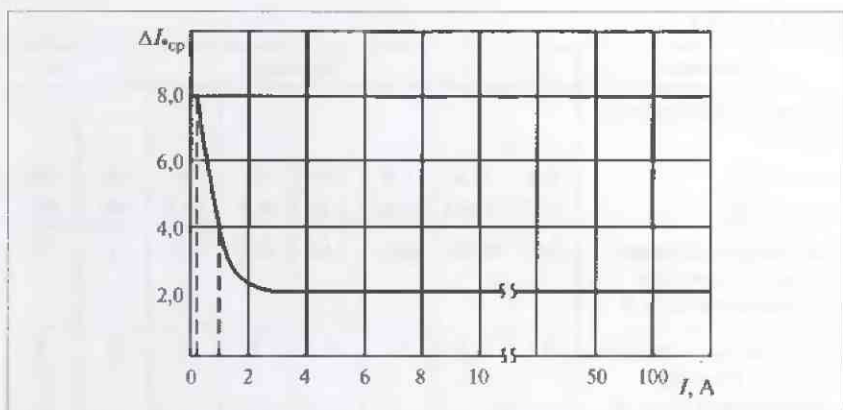


Рис. 3.17. Зависимость относительной разности токов при срабатывании от токов в плече селективного органа

где I_{\max} , I_i — сравниваемые токи плеча поврежденного присоединения и плеч неповрежденных присоединений соответственно.

Абсолютное значение разности токов при срабатывании в селективном органе изменяется с изменением токов в плечах.

Относительное значение разности токов при срабатывании представляет собой отношение абсолютного значения разности токов при срабатывании к большему току плеча:

$$\Delta I_{*cp} = \frac{\Delta I_{cp}}{I_{\max}}, \quad (3.5)$$

где ΔI_{cp} — абсолютное значение разности токов при срабатывании; ΔI_{*cp} — относительное значение токов при срабатывании.

В табл. 3.1 приведены значения токов при срабатывании исполнительного органа плеча (ИО) селективного органа, выполненного на полупроводниковой элементной базе.

Минимальный ток срабатывания $\Delta I_{cp\min}$ представляет собой ток, при котором срабатывает исполнительный орган плеча при отсутствии тока в других плечах. Из табл. 3.1 видно, что относительное значение разности токов при срабатывании во всем диапазоне изменения токов в плечах является неизменным за исключением начальной зоны. В начальной зоне относительное значение разности токов при срабатывании может достигать 7 – 8 %. Увеличение разности токов при срабатывании в начальной зоне

Таблица 3.1

Показатель	Значение							
Ток при срабатывании ИО, А:								
плеча N1	0,4	0,6	1,0	2,0	10	20	50	100
плеча N2	0,37	0,565	0,96	1,96	9,8	19,6	49	98
Абсолютное значение разности токов при срабатывании $\Delta I_{\text{ср}}$, А	0,03	0,035	0,04	0,04	0,2	0,4	1	2
Относительное значение разности токов при срабатывании $\Delta I_{\text{ср}}$, %	7,5	5,5	4	2	2	2	2	2

объясняется неидентичностью характеристик диодов выпрямительных мостов плеч, которая проявляется при токах, близких к минимальному току срабатывания.

На рис. 3.17 приведена зависимость относительной разности токов при срабатывании от токов в плече, построенная по данным табл. 3.1.

Анализ работоспособности селективного органа. При включении селективного органа с защитами на токи присоединений на работоспособность селективного органа влияют погрешности трансформаторов тока и его измерительного органа. Максимальная погрешность сравниваемых токов будет при их сложении в одном плече. Как уменьшающие, например в плече с большим током, они могут снизить ток до значения, при котором разность токов плеч не обеспечит срабатывание селективного органа. Поэтому с учетом этих погрешностей проводится расчет разности токов, обеспечивающей надежную работу селективного органа.

Разность токов, обеспечивающая надежную работу селективного органа, определяется по выражению

$$\Delta I_{\text{н.р}} = (K_{\text{н1}} f_i + K_{\text{н2}} \Delta I_{\text{ср}}) I_{\text{макс}}, \quad (3.6)$$

где $\Delta I_{\text{н.р}}$ — абсолютное значение разности токов при надежной работе; $I_{\text{макс}}$ — наибольший ток в плече при КЗ; $k_{\text{н1}}$ — коэффициент надежности, с учетом которого производится отстройка от погрешностей трансформаторов тока, может быть принят равным 1,2; f_i — относительная погрешность трансформаторов тока, исходя из допу-

стимой 10 %-ной погрешности принимается равной 0,1 (в распределительной сети 110 кВ при небольших кратностях токов КЗ может быть принята 0,05) [37]; $k_{н2}$ — коэффициент, учитывающий отклонения в относительной разности при срабатывании селективного органа из-за неидентичности плеч (погрешности селективного органа), может быть принят равным 2,0; ΔI_{*cp} — относительное значение разности токов при срабатывании селективного органа, может быть принято равным 0,02 (2 %) для селективного органа на полупроводниковой элементной базе и 0,04 (4 %) — на микроэлектронной (для последнего она приведена ниже).

Относительная разность токов при надежной работе определяется по выражению

$$\Delta I_{*н.р} = \frac{\Delta I_{н.р}}{I_{max}} = \frac{(k_{н1}f_i + k_{н2}\Delta I_{*cp}) \cdot I_{max}}{I_{max}},$$

или

$$\Delta I_{*н.р} = k_{н1}f_i + k_{н2}\Delta I_{*cp}, \quad (3.7)$$

При погрешностях трансформаторов тока $f_i = 0,1$ и селективного органа $\Delta I_{*cp} = 0,04$, коэффициентах $k_{н1} = 1,2$ и $k_{н2} = 2$ максимальное значение относительной разности токов $\Delta I_{*н.р} = k_{н1}f_i + k_{н2}\Delta I_{*cp} = 1,2 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,04 = 0,2$, или $\Delta I_{*н.р} = 20 \%$.

Расчетная разность токов при надежной работе может приниматься, исходя из назначения защит, в которых используется селективный орган и его исполнения. Например, при использовании в защитах при разрывах фаз, где токи нагрузок не превышают номинальных токов трансформаторов тока, их погрешность в расчете может приниматься до 5 %, при использовании в защитах от КЗ — до 10 %. Исполнение селективного органа может учитываться значением относительной разности токов при срабатывании $\Delta I_{*cp} = 0,02$ для селективного органа на полупроводниковой элементной базе и 0,04 — на микроэлектронной.

Подставив эти значения в выражение (3.7), получим расчетное значение относительной разности токов при надежной работе для использования селективного органа в данной защите.

Для селективного органа на полупроводниковой элементной базе при использовании его в защитах при разрывах фаз $\Delta I_{*н.р} = k_{н1}f_i + k_{н2}\Delta I_{*cp} = 1,2 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,02 = 0,1$, а при использовании в защитах от КЗ $\Delta I_{*н.р} = 1,2 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,02 = 0,16$.

Работоспособность селективного органа можно оценивать также по отношению токов присоединений. Сравнивая его с отношением, рассчитанным для условий при надежной работе селективного органа, можно сделать заключение о его работоспособности. Отношение токов при надежной работе определяется по выражению

$$n_{н.р} = \frac{I_{\max}}{(1 - \Delta I_{*н.р}) I_{\max}}, \quad (3.8)$$

или

$$n_{н.р} = \frac{1}{1 - \Delta I_{*н.р}}, \quad (3.9)$$

где $(1 - \Delta I_{*ср}) I_{\max}$ — сравниваемый ток в плече, рассчитанный по относительной разности токов при надежной работе $\Delta I_{*н.р}$ селективного органа.

Работоспособность селективного органа обеспечивается при выполнении соотношения $n \geq n_{н.р}$, где n — отношение сравниваемых токов.

В табл. 3.2 приведены технические данные селективных органов на полупроводниковой и микроэлектронной элементных базах.

Область применения селективного органа. Селективный орган может использоваться в качестве органа, обеспечивающего селективность токовых защит нулевой последовательности линий 110 — 220 кВ как в аварийных режимах при КЗ на землю, так и в утяжеленных режимах, создающихся, например, при разрывах

Таблица 3.2.

Показатель	Реле	
	полупроводниковое	микроэлектронное
Номинальный ток $I_{ном}$, А	5	5
Минимальный ток срабатывания $I_{ср\ min}$, А	0,2	0,1
Диапазон токов, отн. ед.	$(0,04 \div 20) I_{ном}$	$(0,02 \div 20) I_{ном}$
Число плеч	2 и 4	5
Относительное значение разности токов при срабатывании $\Delta I_{*ср}$, %	2 — 8	≤ 4

фаз линий. Не во всех случаях реле направления мощности обладают достаточной чувствительностью из-за низких уровней напряжений нулевой последовательности, не обеспечивающих его срабатывание: например, на радиальных и параллельных линиях с взаимоиндукцией, на параллельных линиях при разрывах фаз, на линиях подстанций с мощными источниками и малыми сопротивлениями нулевой последовательности на шинах подстанции.

Селективный орган может использоваться в токовых защитах нулевой последовательности линий с двусторонним питанием проходных ПС распределительной сети 110 кВ без трансформаторов напряжения высшей стороны, в защитах высшей и средней сторон автотрансформаторов.

Учитывая, что селективный орган плечами включается на токи присоединений, то из условий их минимизации, меньшей разветвленности его целесообразно использовать в защитах объектов с тремя-четырьмя присоединениями на секцию.

Ниже рассматриваются объекты распределительной сети, у которых селективность токовых защит нулевой последовательности обеспечивается способом токовых избирателей повреждённого присоединения и обеспечивается требуемая чувствительность.

3.5. Релейная защита радиальных линий с взаимоиндукцией

Радиальные линии, в том числе и при наличии взаимоиндукции между цепями, относятся к линиям с односторонним питанием и поэтому имеют упрощенные защиты. Согласно руководящим указаниям по релейной защите и типовым решениям института «Энергосетьпроект» на данных линиях предусматриваются одно- или двухступенчатые токовые защиты нулевой последовательности от коротких замыканий на землю [38, 31]. В одноступенчатых защитах вся линия защищается этой ступенью. В двухступенчатых первая ступень выполнена ненаправленной, без выдержки времени и, как правило, ее защищаемая зона не охватывает всю длину линии. Вся линия защищается чувствительной второй ступенью. Для повышения быстродействия вторая ступень выполняется направленной.

На длинных линиях направленный орган с разрешающим сигналом может оказаться нечувствительным к коротким замыканиям в конце линии. В этом случае вторая ступень защиты дополня-

ется органом направления мощности, включаемым с блокирующим сигналом, т. е. имеющим направление мощности (ИОНМ) или тока (ИОНТ) КЗ из линии к шинам. Блокирующий орган обеспечивает работу защиты при КЗ на линии в зоне, где разрешающий орган направления не обладает достаточной чувствительностью, и селективное действие второй ступени при КЗ за «спиной» в смежной сети. Своим замыкающим контактом он выводит вторую ступень из действия.

Однако использование блокирующего органа не всегда обеспечивает селективное действие защиты. В § 3.3 и на рис. 3.7 показано, что на подстанциях, имеющих мощные автотрансформаторы с малыми значениями сопротивлений нулевой последовательности на шинах с защищаемыми линиями, напряжение нулевой последовательности при КЗ в конце длинных радиальных линий может иметь значения, меньше минимального напряжения срабатывания блокирующего органа. В этих случаях при КЗ на одной линии в защите неповрежденной линии он не выводит чувствительную ступень из действия и неповрежденная линия отключается одновременно с поврежденной. Имеет место неселективное действие защиты.

На таких линиях способ токовых избирателей поврежденного присоединения обеспечивает селективность действия защит [32]. Чувствительность селективного органа обеспечивается разными значениями токов в линиях: ток короткого замыкания в линии с КЗ больше тока, наводимого через взаимную индукцию в неповрежденной линии. По принципу действия селективного органа он вводит в действие защиты линии с КЗ, а на неповрежденной линии с меньшим током защиты будут выведены из действия и излишне сработать не могут.

Для оценки области использования селективного органа на рис. 3.18 приведены зависимости отношений сравниваемых токов короткого замыкания и наведенного через взаимную индукцию в радиальных линиях, характеризующие работоспособность селективного органа: n_1 — отношения токов в двухцепных линиях; n_2 — отношения токов в линиях, расположенных на расстоянии 70 м. При других расстояниях между линиями отношения токов будут находиться между этими кривыми.

Там же, на рис. 3.18, приведено значение отношения токов при надежной работе селективного органа, рассчитанного по выраже-

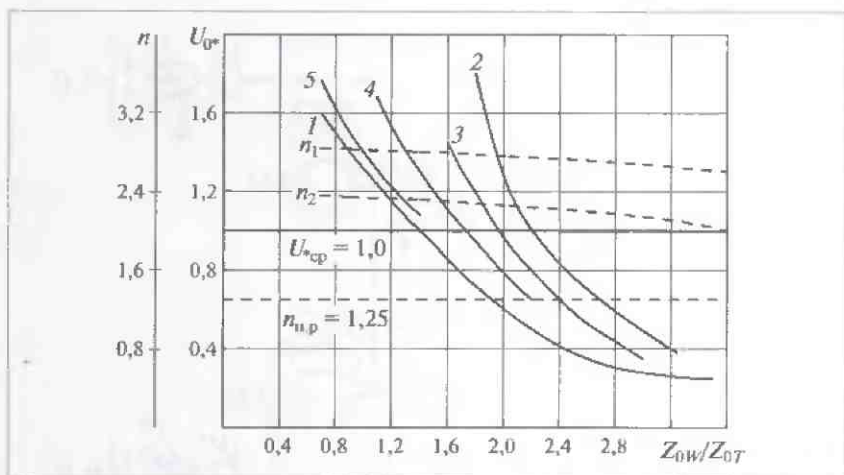


Рис. 3.18. Определение зоны действия токового селективного органа и органа направления мощности на радиальных линиях с взаимной индукцией

ниям (3.7) и (3.9) для значений погрешностей трансформаторов тока при КЗ $f_i = 10\%$, селективного органа с относительной разностью токов при срабатывании $\Delta I_* = 0,04$, коэффициентов $K_{I1} = 1,2$; $K_{I2} = 2$:

$$\Delta I_{*н.р} = K_{I1}f_i + K_{I2}\Delta I_*$$

$$\Delta I_{*н.р} = 1,2 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,04 = 0,2;$$

$$n_{н.р} = \frac{1}{1 - \Delta I_{*н.р}} = \frac{1}{1 - 0,2} = 1,25.$$

Выполнение условий $n_1 > n_{н.р}$ и $n_2 > n_{н.р}$ свидетельствуют, что работоспособность токового селективного органа обеспечивается при КЗ на всей длине линий. Соответственно обеспечивается и селективность защит.

На рис. 3.19 показано включение защит с селективным органом.

Селективное поведение защит может достигаться также включением токовых защит нулевой последовательности (НП) с селективным органом на приемной подстанции радиальных линий. На

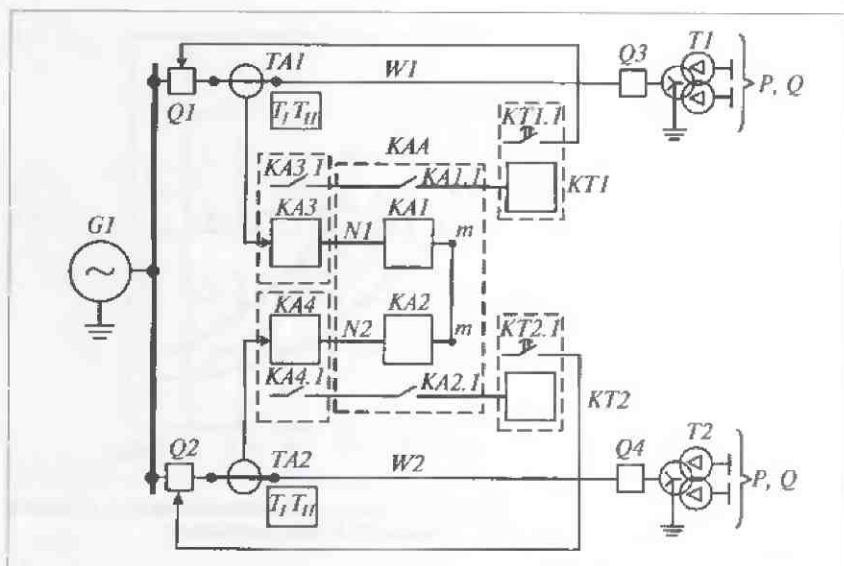


Рис. 3.19. Токовые защиты нулевой последовательности с токовым селективным органом радиальных линий с взаимной индукцией:

$W1, W2$ — радиальные линии с взаимной индукцией Z_M ; $TA1, TA2$ — трансформаторы тока защит линий; KAA — токовый селективный орган с измерительными органами тока $KA1, KA2$; T_I, T_{II} — две ступени токовых защит НП линий; $KA3, KA4$ — вторые ступени защит, включаемые с токовым селективным органом; KT_{II} — органы выдержек времени вторых ступеней защиты

приемной подстанции достаточно включения одной ступени защиты.

На рис. 3.20 приведены токовые защиты с селективным органом на приемной подстанции.

Ликвидация КЗ в этом случае происходит следующим образом: первой работает защита с селективным органом на приемной ПС, создавая каскадное отключение линии, а затем, вследствие увеличения тока КЗ в линии при каскадном отключении, на питающей ПС приходит в действие первая ступень защиты без выдержки времени. На питающей подстанции вторая ступень неповрежденной линии не успевает сработать.

Выдержка времени одноступенчатой токовой защиты на приемной подстанции согласуется с временем отключения КЗ первыми ступенями линий смежной сети, отходящих от шин питающей подстанции и выдержкой времени устройства резервирования отказа выключателей (УРОВ). Наличие защит на приемной под-

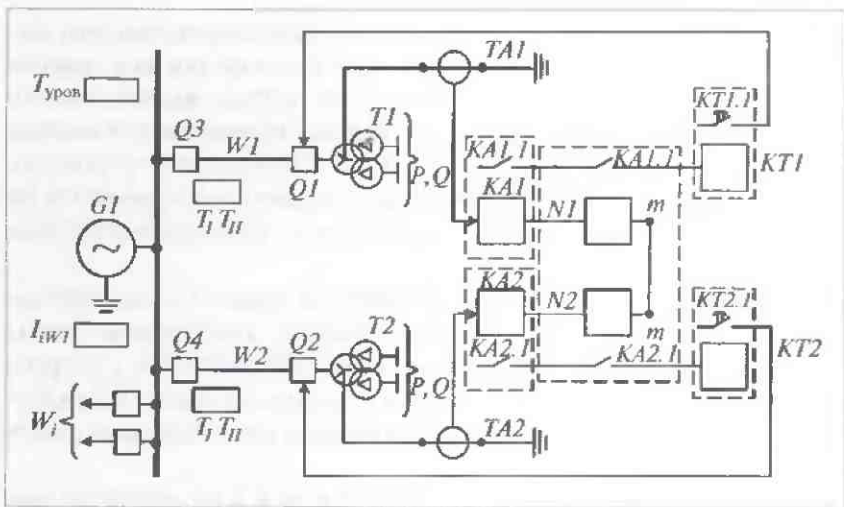


Рис. 3.20. Токовые защиты нулевой последовательности с селективным органом радиальных линий с взаимной индукцией на приемной подстанции:

$T1, T2$ — трансформаторы с трансформаторами тока в нейтралях $TA1$ и $TA2$, в которые включены одноступенчатые защиты $KA3$ и $KA4$; $KAА$ — селективный орган с измерительными органами $KA1, KA2$. Остальные обозначения соответствуют рис. 3.19

станции несколько усложняет защиты линий, но повышается быстрое действие защит в ликвидации коротких замыканий.

3.6. Релейная защита линий проходных подстанций распределительной сети 110 кВ

В распределительной сети 110 кВ широкое распространение получили проходные подстанции, включаемые в расщепки линий с двусторонним питанием. Они выполняются по упрощенным схемам с переменным оперативным током в защитах трансформаторов и выпрямленным (от блоков питания и выпрямительных устройств) в защитах линий 110 кВ.

В качестве защит линий используются дистанционные от междофазных коротких замыканий и направленные от замыканий на землю токовые защиты нулевой последовательности. Их селективность обеспечивается органами направления мощности, использующими напряжение нулевой последовательности. Поэтому на подстанциях устанавливаются трансформаторы напряжения 110 кВ. Учитывая небольшое число присоединений (обычно

две линии), в токовых защитах нулевой последовательности линий могут использоваться токовые селективные органы, вместо реле направления мощности, которые не требуют использования информации о напряжении сети и поэтому позволяют отказаться от трансформаторов напряжения 110 кВ, что позволяет упростить схему подстанции. Трансформаторы напряжения сохраняются на подстанциях, линии 110 кВ которых имеют расчетные счетчики электроэнергии.

Ниже приводятся примеры включения защит с селективным органом в мостиковых схемах подстанций. Мостиковые схемы подстанций являются типовой разработкой института «Энергосетьпроект» и широко применяются в энергосистемах. Для включения защит линий с селективным органом потребовалось решение следующих задач:

1) на подстанции с двумя линиями при КЗ на одной из них токи в линиях равны и условие $I_{W1} > I_{W2}$ не обеспечивается для селективного органа, реагирующего на разность токов, т. е. отсутствуют условия для выявления поврежденной линии;

2) трансформаторы подстанций малой мощности, работающие с эффективно заземленной нейтралью могут не создавать отношение токов в линиях, обеспечивающее надежную работу селективного органа $n > n_{н.р}$ из-за малых значений токов нулевой последовательности, ответвляющихся в их нейтрали;

3) обеспечение селективности защит линий при коротких замыканиях на элементах схемы подстанции, внешних для защит линий.

Первая задача — обеспечить работоспособность селективного органа при равных токах в линиях, решается путем заземления нейтрали трансформатора (трансформаторов) [39]. На рис. 3.21 приведена поясняющая схема.

$$\dot{I}_{WT} = \dot{I}_{W2} + \dot{I}_T; |\dot{I}_{WT}| > |\dot{I}_{W2}|.$$

В этом случае токи в линиях отличаются на ток нулевой последовательности нейтрали трансформатора.

При КЗ на линии и при разности токов в линиях, обеспечивающей срабатывание селективного органа, он выявляет линию с повреждением.

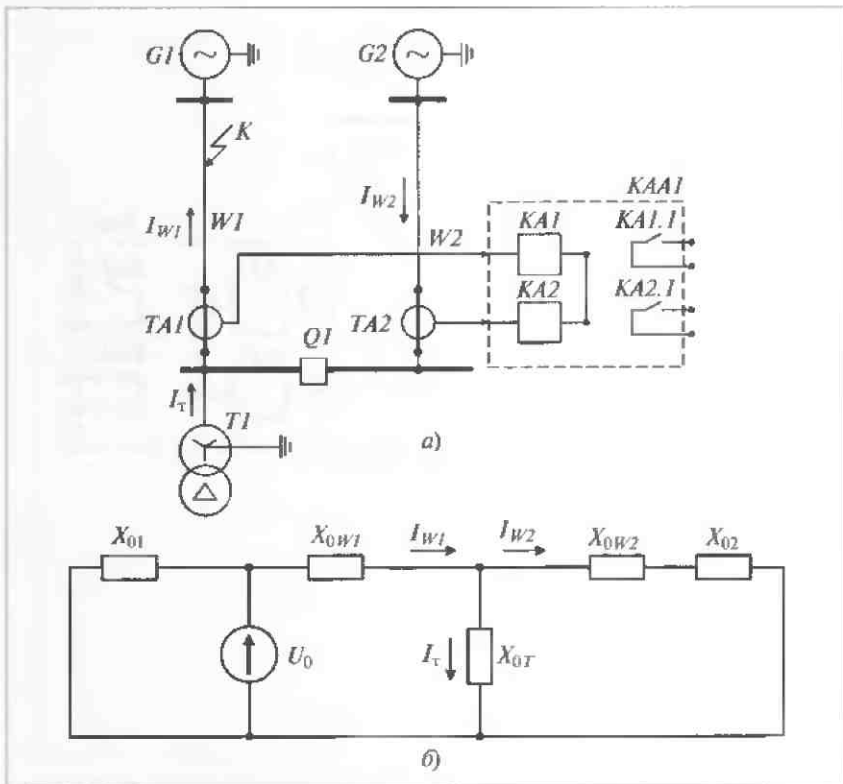


Рис. 3.21. Подстанция с трансформатором с заземленной нейтралью (а) и схема замещения нулевой последовательности (б):

$KAA1$ — селективный орган и его плечи $KA1$, $KA2$; X_{01} , X_{0W1} , X_{0T} , X_{0W2} , X_{02} — сопротивления (приняты их реактивные составляющие) нулевой последовательности схемы замещения — систем $G1$ и $G2$, линий $W1$ и $W2$ и трансформатора $T1$

Вторая задача — обеспечить работоспособность селективного органа, когда трансформаторы малой мощности не создают разности токов в линиях, необходимой для срабатывания селективного органа, решается включением токов нейтралей трансформаторов в плечи токов линий и ток нейтрали трансформатора искусственным образом увеличивают до значений, при которых обеспечивается срабатывание селективного органа.

На рис. 3.22 приведена схема включения тока нейтрали трансформатора в плечо тока линии в селективном органе. Ток в плече линии становится равным сумме тока секционной перемычки и

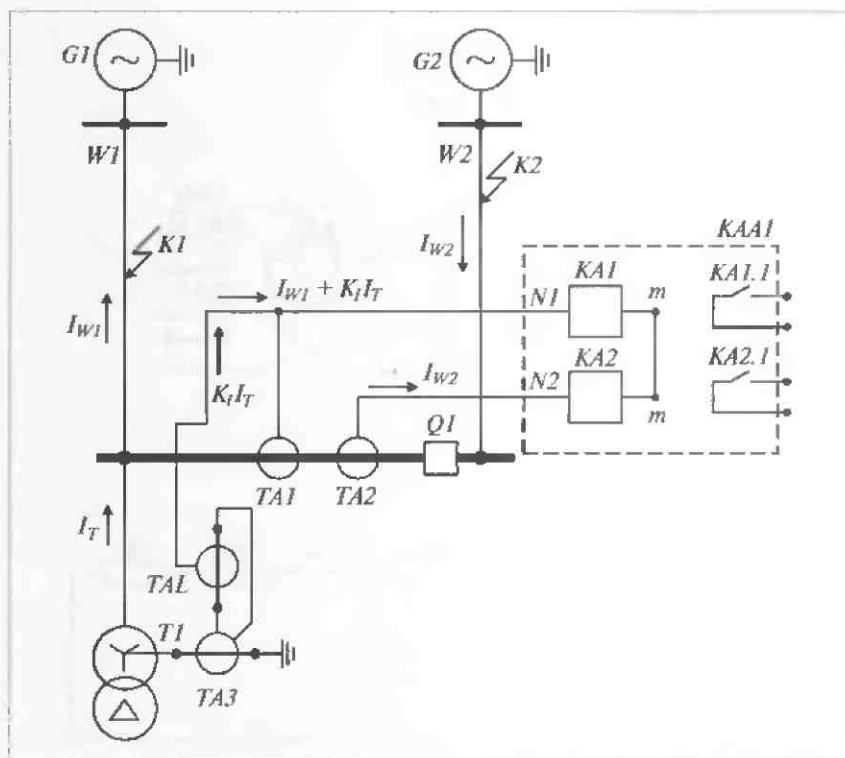


Рис. 3.22. Схема включения тока нейтрали трансформатора в плечо тока линии в селективном органе:

$G1, G2$ — питающие системы; $W1, W2$ — линии проходной подстанции; $T1$ — трансформатор; $TA1, TA2$ — трансформаторы тока секционной перемычки; $TA3$ и TAL — трансформатор тока и промежуточный трансформатор тока нейтрали трансформатора

нейтрали трансформатора. Промежуточный трансформатор тока TAL служит для изменения (увеличения) тока нейтрали трансформатора.

При КЗ на линии $W1$ ток в линии $W1$ равен $\dot{I}_{W1} = \dot{I}_{W2} + \dot{I}_T$, ток в линии $W2$ равен \dot{I}_{W2} , а в плечах линий соответственно

$$\dot{I}_{N2} = \dot{I}_{W2}, \dot{I}_{N1} = \dot{I}_{W2} + K_T \dot{I}_T$$

и при этом справедливо соотношение $|\dot{I}_{N1}| > |\dot{I}_{N2}|$.

При КЗ на линии $W2$ ток в линии $W1$ равен \dot{I}_{W1} , ток в линии $W2$ равен $\dot{I}_{W2} = \dot{I}_{W1} + \dot{I}_T''$, а в плечах линий

$$\dot{I}_{N1} = -\dot{I}_{W1} + K_I \dot{I}_T''; \dot{I}_{N2} = \dot{I}_{W1} + \dot{I}_T''$$

и справедливо выражение $|\dot{I}_{N2}| > |\dot{I}_{N1}|$ и также справедливо соотношение, где K_I — коэффициент трансформации промежуточного трансформатора тока TAL ; I_T' и I_T'' — токи нейтрали трансформатора.

Оценить влияние тока нейтрали трансформатора можно по отношениям токов в плечах при надежной работе селективного органа:

- при КЗ на линии $W1$:

$$\left| \frac{\dot{I}_{W2} + K_I \dot{I}_T''}{\dot{I}_{W2}} \right| \geq n_{н.р} \text{ или } |1 + K_I \underline{\alpha}'| \geq n_{н.р};$$

- при КЗ на линии $W2$:

$$\left| \frac{\dot{I}_{W1} + \dot{I}_T''}{-\dot{I}_{W1} + K_I \dot{I}_T''} \right| \geq n_{н.р} \text{ или } \left| \frac{1 + \underline{\alpha}''}{-1 + K_I \underline{\alpha}''} \right| \geq n_{н.р},$$

где $\underline{\alpha}' = \frac{\dot{I}_T'}{\dot{I}_{W2}}$; $\underline{\alpha}'' = \frac{\dot{I}_T''}{\dot{I}_{W1}}$; $n_{н.р}$ — отношения токов линий при надежной работе селективного органа.

Значение коэффициента K_I можно определить из приведенных выше уравнений:

$$K_I \geq \left| \frac{n_{н.р} - 1}{\alpha'} \right| \text{ и } K_I \leq \left| \frac{1 + \underline{\alpha}'' + n_{н.р}}{\underline{\alpha}'' n_{н.р}} \right|.$$

Условия выбора значений K_I должны быть непротиворечивы, т. е.

$$\left| \frac{n_{н.р} - 1}{\alpha'} \right| \leq \left| \frac{1 - \underline{\alpha}'' + n_{н.р}}{\underline{\alpha}'' n_{н.р}} \right|,$$

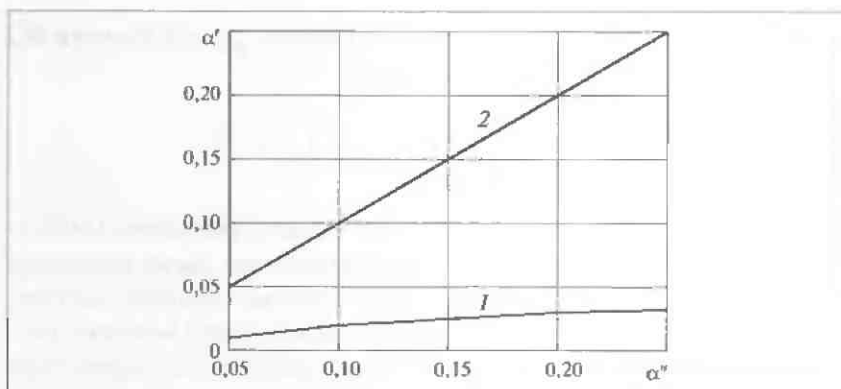


Рис. 3.23. Области надежной работы селективного органа при использовании (линия 1) и без использования (линия 2) тока нейтрали трансформатора

тогда должно быть справедливым соотношение

$$\alpha' \geq \left| \frac{\alpha'' n_{н.р.} (n_{н.р.} - 1)}{\alpha'' + 1 + n_{н.р.}} \right|.$$

Снижение допустимых значений токов нейтрали трансформатора (его мощности) при использовании тока нейтрали в плече линии WI , определяемое значениями α' , приведено на рис. 3.23 (линия 1).

Там же, линия 2 отражает зависимость этих токов без использования тока нейтрали. Сравнение областей 1 и 2 показывает, что использование тока нейтрали трансформатора с изменением его значений расширяет область применения селективного органа в защитах линий.

Решение двух вышеприведенных задач позволяет использовать селективный орган в защитах следующих подстанций.

Подстанция со схемой «Мостик с выключателем в перемычке и отделителями в цепях трансформаторов». На рис. 3.24 приведена схема включения токовых защит нулевой последовательности линий с селективным органом.

Защиты линий включены на сумму токов нулевой последовательности: тока секционной перемычки и трансформатора секции.

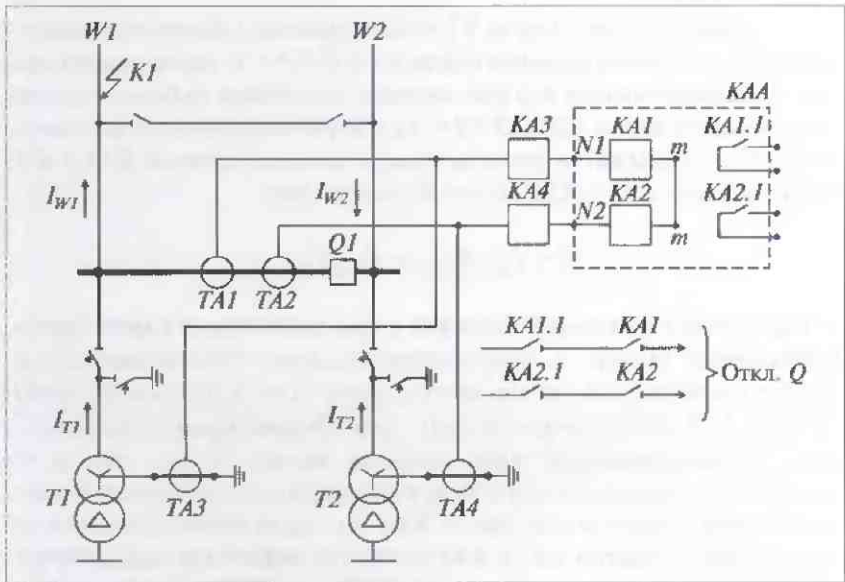


Рис. 3.24. Токowe защиты нулевой последовательности линий проходной подстанции 110 кВ, выполненной по схеме «Мостик с выключателем в перемычке»: $W1, W2$ — линии; $T1, T2$ — трансформаторы; Q — выключатель; $TA1-TA4$ — трансформаторы тока; $KA1, KA2$ — токовые защиты НП линий; KAA — селективный орган (промежуточные трансформаторы тока во вторичных токах нейтралей трансформаторов не показаны)

В защитах линий используется двухплечевой селективный орган. При КЗ на линии $W1$ в плечах селективного органа протекают токи:

$$\dot{I}_{N1} = \dot{I}_{W2} + \dot{I}_{T1} + \dot{I}_{T2};$$

$$\dot{I}_{N2} = \dot{I}_{W2};$$

$$|\dot{I}_{N1}| \geq |\dot{I}_{N2}|.$$

Работоспособность селективного органа обеспечивается.

Алгоритм функционирования селективного органа в защитах линий может быть представлен выражением:

$$T_1 = \begin{cases} 1, CO & N2=1; \\ 0, CO & N2=1, \end{cases}$$

где T_1 — срабатывание плеча $N1$ обеспечивается (обозначено значением 1) при несрабатывании плеча $N2$ ($\overline{CO N2} = 1$) селективного органа и несрабатывание его (обозначено значением 0) будет в случае срабатывания плеча $N2$ ($CO N2 = 1$). Сигнал отключения выключателя при срабатывании защиты измерительных органов $KA1$ и $KA3$ линии $W1$ или $KA2$ и $KA4$ линии $W2$ имеет вид

$$F = F_{KA1}F_{KA3} + F_{KA2}F_{KA4}$$

Подстанция со схемой «Мостик с выключателями в цепи трансформаторов». На рис. 3.25 приведена схема включения токовых защит нулевой последовательности линий с селективным органом. На рис. 3.25 обозначения линий, трансформаторов, выключателей, трансформаторов тока, защиты линий те же, что и на рис. 3.24. Отличие состоит в том, что в защитах используется многоплечевой селективный орган KAA по числу присоединений на подстанции. Защиты $KA3$ и $KA4$ являются защитами трансформаторов и могут выполняться в дополнение к дифференциальной защите.

При КЗ в точке $K1$ на линии $W1$ токи в плечах селективного органа составляют:

$$\dot{I}_{N1} = \dot{I}_{W2} + \dot{I}_{T1} + \dot{I}_{T2};$$

$$\dot{I}_{N2} = \dot{I}_{W2} - \dot{I}_{T2};$$

$$\dot{I}_{N3} = \dot{I}_{T1};$$

$$\dot{I}_{N4} = \dot{I}_{T2}.$$

Функционирование селективного органа обеспечивается при следующих условиях

$$|\dot{I}_{N1}| > |\dot{I}_{N2}|; |\dot{I}_{N1}| > |\dot{I}_{N3}|; |\dot{I}_{N1}| > |\dot{I}_{N4}|.$$

Алгоритм функционирования многоплечевого селективного органа может быть представлен выражением:

$$T_1 = \begin{cases} 1, (\overline{CO N2} \cdot \overline{CO N3} \cdot \overline{CO N4}) = 1; \\ 0, (CO N2 \cdot CO N3 \cdot CO N4) = 1, \end{cases}$$

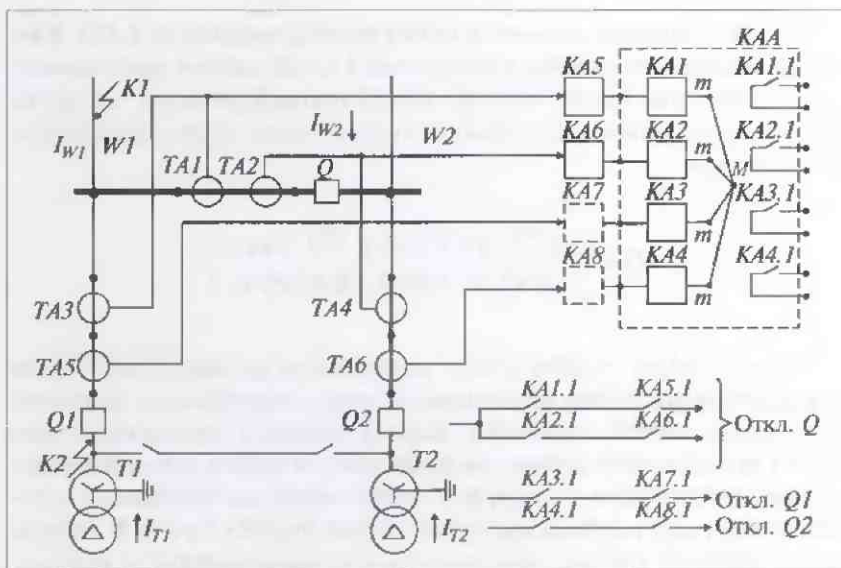


Рис. 3.25. Токовые защиты нулевой последовательности линий проходной подстанции 110 кВ «Мостик с выключателями в цепях трансформаторов»

где T_1 — срабатывание плеча $N1$ обеспечивается при несрабатывании плеч $N2, N3, N4$ ($\overline{CO N2} \cdot \overline{CO N3} \cdot \overline{CO N4} = 1$) и несрабатывание плеча $N1$ будет в случае срабатывания плеча $N2$, или $N3$, или $N4$ ($CO N2 \cdot CO N3 \cdot CO N4 = 1$).

Сигнал отключения выключателя в переключке защитами линий формируется так же, как и в схеме на рис. 3.24.

При КЗ в точке $K2$ в цепи трансформатора, внешнем для защит линий, токи в плечах селективного органа составляют:

$$\dot{I}_{N1} = \dot{I}_{W2} + \dot{I}_{T2} - \dot{I}_{T1}$$

$$\dot{I}_{N2} = \dot{I}_{W2} - \dot{I}_{T1}$$

$$\dot{I}_{N3} = \dot{I}_{W1} + \dot{I}_{W2} + \dot{I}_{T2}$$

$$\dot{I}_{N4} = \dot{I}_{T2}$$

Несрабатывание плеч линий селективного органа обеспечивается при условиях:

$$|\dot{I}_{N1}| < |\dot{I}_{N3}|; |\dot{I}_{N2}| < |\dot{I}_{N3}|.$$

При выполнении защиты в цепях трансформаторов *КАЗ* и *КА4*, осуществляющей защиту соединений 110 кВ вводов трансформаторов и обмоток высшего напряжения трансформатора, алгоритм функционирования селективного органа может быть представлен выражением:

$$T_3 = \begin{cases} 1, (\overline{CO} N1 \cdot \overline{CO} N2 \cdot \overline{CO} N4) = 1; \\ 0, (CO N1 \cdot CO N2 \cdot CO N4) = 1. \end{cases}$$

Третья задача — обеспечить селективность защит линий при коротких замыканиях на элементах схемы подстанции, внешних для защит линий, решается использованием дополнительных плеч в селективном органе, включаемых на сумму токов короткого замыкания присоединений. С их помощью в селективном органе осуществляется блокирование защит линий. При КЗ, например, на секции в плече, включаемом на суммарный ток присоединений секции, ток будет наибольшим. Этим током в селективном органе блокируются исполнительные органы плеч линий и их защиты оказываются выведенными.

Подстанция со схемой «Мостик с выключателями в цепях линий». В такой схеме работоспособность селективного органа и селективность защит линий обеспечивается при решении всех вышеприведенных задач.

На рис. 3.26 приведена схема включения токовых защит нулевой последовательности линий с селективным органом на этой подстанции. На схеме показано включение дополнительных плеч селективного органа на сумму токов короткого замыкания секции. Обозначения на схеме аналогичны обозначениям на рис. 3.24 с добавлением трансформаторов тока *ТАЗ* и *ТА4* и дополнительных плеч *НЗ* и *Н4* селективного органа.

При КЗ в точке *К1* на линии *W1* работоспособность селективного органа обеспечивается так же, как при использовании его в схеме защит на рис. 3.24, в плечах *НЗ* и *Н4* в этом случае токи равны нулю.

При КЗ в точке *К2* токи в плечах селективного органа составляют:

$$\dot{I}_{N1} = \dot{I}_{W1} - \dot{I}_{Tb}$$

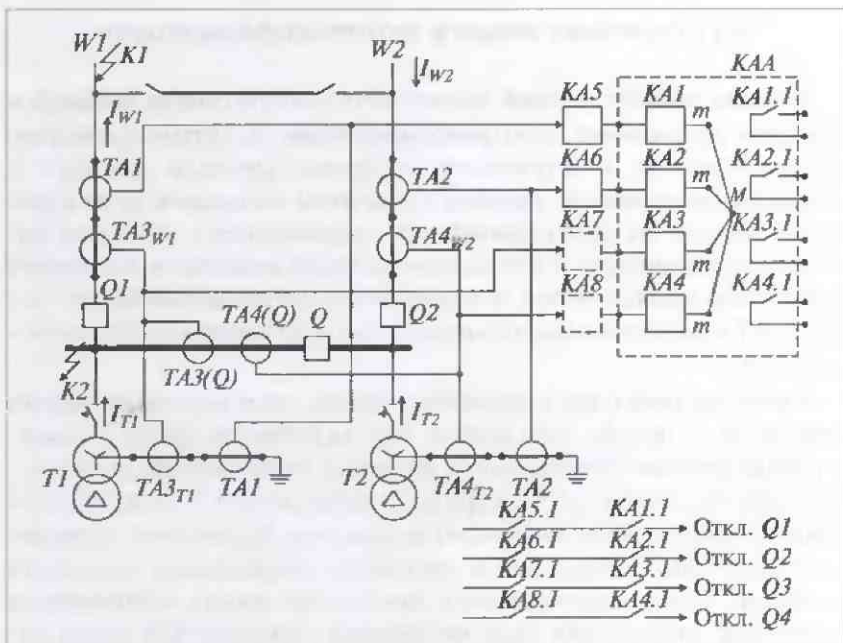


Рис. 3.26. Токовые защиты нулевой последовательности линий проходной подстанции 110 кВ «Мостик с выключателями в цепях линий»

$$\dot{I}_{N2} = \dot{I}_{W2} - \dot{I}_{T2};$$

$$\dot{I}_{N3} = \dot{I}_{W1} + \dot{I}_{W2} + \dot{I}_{T1} + \dot{I}_{T2};$$

$$\dot{I}_{N4} = \dot{I}_{W2} + \dot{I}_{T2} - (\dot{I}_{W2} + \dot{I}_{T2}) = 0.$$

Несрабатывание исполнительных органов плеч линий в селективном органе обеспечивается при условиях:

$$|\dot{I}_{N1}| < |\dot{I}_{N3}|; |\dot{I}_{N2}| < |\dot{I}_{N3}|.$$

В плечи $N3$ и $N4$ могут быть включены защиты секций, в зону которых будут входить секции, ошиновка ячейки трансформатора, высоковольтные вводы и обмотка высшего напряжения трансформатора. Алгоритм функционирования плеча $N3$ селективного органа при КЗ в точке $K2$ аналогичен алгоритму в схеме защиты по рис. 3.25.

3.7. Релейная защита автотрансформаторов

Токовая защита нулевой последовательности сторон высшего и среднего напряжений автотрансформаторов. Автотрансформатор своей обмоткой электрически соединяет системы высшего и среднего напряжений, являясь элементом кольцевой сети и поэтому защиты на этих сторонах АТ выполняются с органами направления мощности. Органы направления мощности, по одному в защите каждой стороны, обеспечивают срабатывание защит стороны АТ с коротким замыканием и несрабатывание защит стороны без КЗ.

Такой же результат в действиях защит, но с меньшим числом устройств — одним, достигается при включении защит с селективным органом. По принципу действия селективный орган вводит защиты стороны АТ с коротким замыканием и блокирует защиты стороны АТ без короткого замыкания. Кроме того схемы защит автотрансформаторов с органами направления мощности содержат цепи шунтирования контактов органа направления мощности контактами реле положения выключателя после отключения выключателя, чтобы при отключении выключателя и возврате органа направления мощности защита не выводилась и могла работать по току (как ненаправленная) при КЗ в соединениях автотрансформатора с шинами (токовые органы защиты включены во встроенные в автотрансформатор трансформаторы тока).

Использование селективного органа позволяет исключить указанные цепи шунтирования, так как селективный орган обеспечивает действие защит до отключения автотрансформатора независимо от места КЗ [20, 41]. Этим упрощаются схемы защит автотрансформаторов.

На рис. 3.27 показана схема токовых защит нулевой последовательности автотрансформатора с селективным органом.

Работоспособность селективного органа в защитах автотрансформатора обеспечивает заземленная нейтраль автотрансформатора [40, 41]. Токи сторон высшего и среднего напряжения АТ должны быть предварительно выровнены в соответствии с его коэффициентом трансформации. Тогда при КЗ на землю в сети высшего или среднего напряжений токи в плечах селективного органа будут отличаться на ток низшей стороны автотрансформатора, протекающий в плече стороны с коротким замыканием.

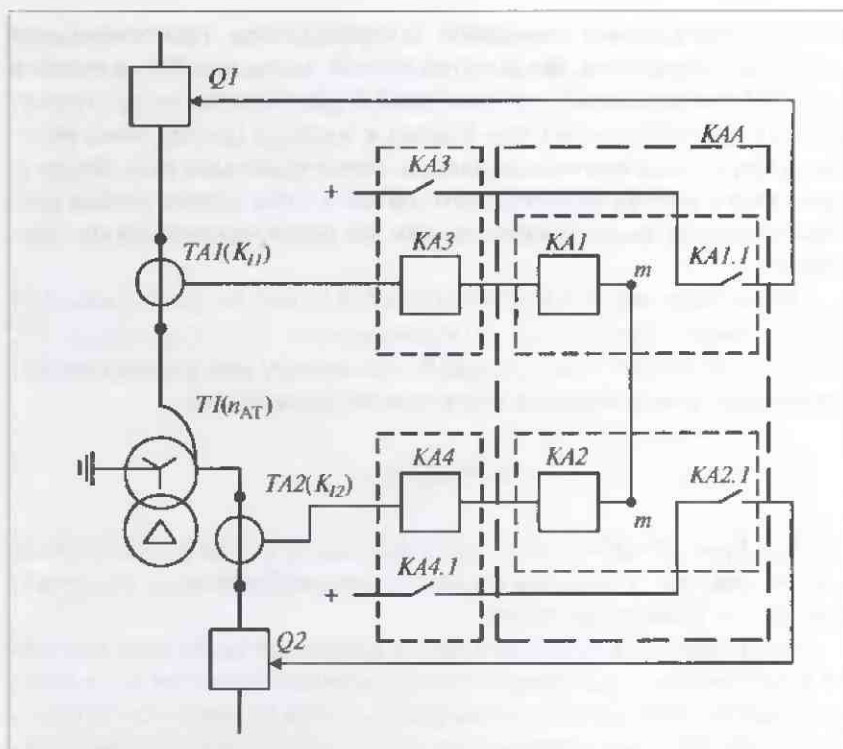


Рис. 3.27. Токовая защита нулевой последовательности автотрансформатора с селективным органом:

TII — автотрансформатор; $TA1$, $TA2$ — трансформаторы тока; $KA3$, $KA4$ — токовые защиты нулевой последовательности; KAA — селективный орган; $KA1$, $KA2$ — плечи селективного органа и их исполнительные органы $KA1.1$ и $KA2.1$

При КЗ на стороне ВН, например, токи в плечах селективного органа

$$\dot{I}_{N1} = \dot{I}_{ВН} = \dot{I}_{СН} + \dot{I}_{НН}; \dot{I}_{N2} = \dot{I}_{СН}; |\dot{I}_{N1}| > |\dot{I}_{N2}|,$$

где $I_{ВН}$, $I_{СН}$, $I_{НН}$ — токи нулевой последовательности сторон высшего, среднего и низшего напряжений.

Выравнивание вторичных токов можно выполнить с использованием промежуточных трансформаторов тока или коэффициентами трансформации трансформаторов тока защит на сторонах ВН и СН, принимая их отношение близким или равным обратно

пропорциональному значению коэффициента трансформации автотрансформатора. Но имеется случай, когда при КЗ на землю в сети ВН ток в обмотке, соединенной в треугольник не протекает, т. е. его значение равно или близко к нулю, и по сторонам автотрансформатора протекают равные первичные токи [42]. Вторичные токи в плечах селективного органа в этом случае имеют разные значения из-за выравнивания их приведенным выше способом.

Отношение тока в плече стороны ВН к току плеча стороны СН будет равно отношению коэффициентов трансформации ТТ среднего и высшего напряжений, принятому при выравнивании вторичных токов в плечах селективного органа, т. е.

$$n = K_{I2}/K_{I1},$$

где K_{I1} , K_{I2} — коэффициенты трансформации ТТ плеч селективного органа высшей и средней сторон автотрансформатора соответственно; n — отношение токов.

В процессе регулирования напряжения под нагрузкой меняется коэффициент трансформации автотрансформатора n_{AT} и соответственно его первичные и вторичные токи в плечах селективного органа. Выравнивание их для одного, например среднего, положения нарушается для других положений анцапфы АТ. Изменение коэффициента автотрансформатора n_{AT} при использовании трансформаторов тока с коэффициентами трансформации, не обеспечивающими выравнивание вторичных токов, может привести к тому, что селективный орган потеряет работоспособность.

Условия, при которых селективный орган теряет работоспособность, являются граничными. Для их определения в общем случае рассматриваются короткие замыкания на землю в сетях высшего и среднего напряжений автотрансформатора (рис. 3.28). Для удобства анализа на рис. 3.28 все сопротивления приведены к одному расчетному напряжению, например, напряжению высшей стороны автотрансформатора (сопротивления приняты равными их реактивной составляющей).

Для анализа условием потери работоспособности селективного органа принято условие равенства токов в плечах (погрешностями трансформаторов тока и плеч селективного органа пренебре-

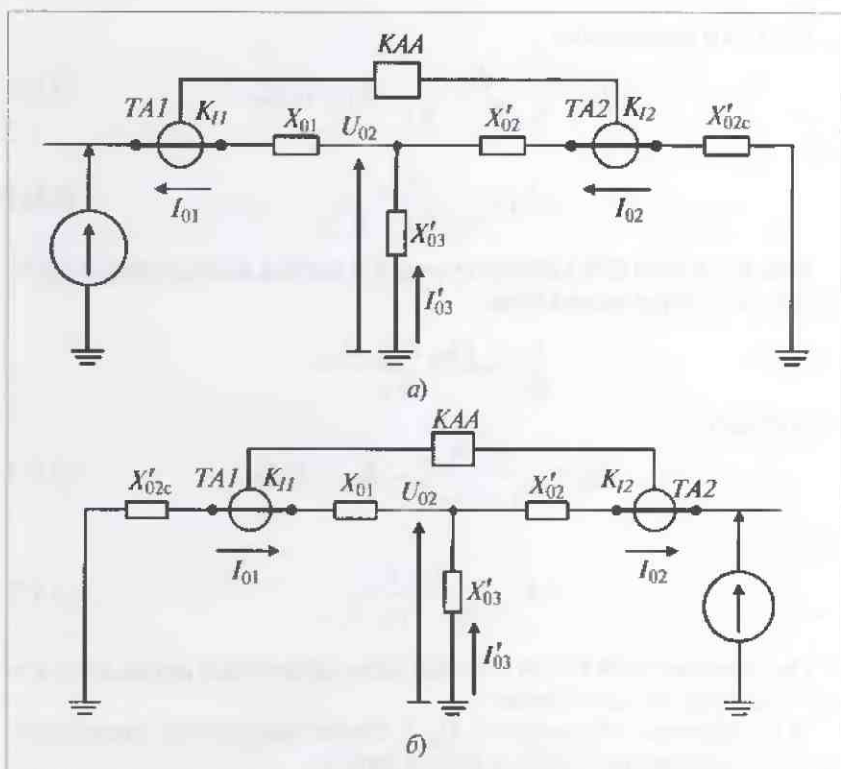


Рис. 3.28. Схема замещения нулевой последовательности автотрансформатора и сети при коротком замыкании в сети ВН (а), СН (б):

I_{01} , I_{02} — токи на сторонах ВН и СН автотрансформатора; I'_{03} — значение тока НН АТ, приведенное к напряжениям для схемы; по рис. 3.28, а — средней стороны, по рис. 3.28, б — высшей стороны автотрансформатора; $TA1$, $TA2$ — трансформаторы тока сторон ВН и СН с коэффициентами трансформации K_{I1} и K_{I2} соответственно; $КАА$ — селективный орган; X_{01} , X'_{02} , X'_{03} — сопротивления ВН, СН, НН автотрансформатора; X'_{01c} , X'_{02c} — сопротивления нулевой последовательности источников ВН и СН

гаем). Тогда при КЗ в сети ВН равенству токов в плечах селективного органа соответствует выражение

$$\frac{I_{02} + I'_{03}}{n_{AT} K_{I1}} = \frac{I_{02}}{K_{I2}},$$

где $n_{AT} = U_{ВН}/U_{СН}$ — коэффициент трансформации автотрансформатора.

Из этого выражения

$$I_{02} = \frac{K_{I2}}{n_{AT}K_{I1} - K_{I2}} I'_{03} = K_2 I'_{03}, \quad (3.10)$$

где

$$K_2 = \frac{K_{I2}}{n_{AT}K_{I1} - K_{I2}}. \quad (3.11)$$

При КЗ в сети СН равенству токов в плечах селективного органа соответствует выражение

$$\frac{I_{01}}{K_{I1}} = \frac{(I_{01} + I'_{03})n_{AT}}{K_{I2}},$$

из которого

$$I_{01} = \frac{n_{AT}K_{I1}}{K_{I2} - n_{AT}K_{I1}} I'_{03} = K_1 I'_{03}, \quad (3.12)$$

где

$$K_1 = \frac{n_{AT}K_{I1}}{K_{I2} - n_{AT}K_{I1}}. \quad (3.13)$$

От соотношений токов в ветвях схем замещения перейдем к соотношениям сопротивлений.

Из равенства напряжений U_{02} в схеме замещения, определяемых через сопротивления и токи в ветвях:

- по рис. 3.28, а для ветвей с токами I_{02} и I'_{03} получим

$$X'_{02c} + X'_{02} = \frac{X'_{03}}{K_2},$$

из которого

$$X'_{02c} = \frac{X'_{03}}{K_2} - X'_{02}; \quad (3.14)$$

- по рис. 3.28, б для ветвей с токами I_{01} и I'_{03} и с учетом (3.12) получим

$$X'_{01c} + X'_{01} = \frac{X'_{03}}{K_1},$$

из которого

$$X'_{01c} = \frac{X'_{03}}{K_1} - X'_{01}. \quad (3.15)$$

Выражения (3.14) и (3.15) позволяют определить расчетные граничные значения сопротивлений сети X_{01c} и X_{02c} , при которых селективный орган токовых защит теряет работоспособность и их зависимость от изменений коэффициента трансформации АТ n_{AT} при регулировании напряжения.

В расчетах коэффициенты K_1 и K_2 , зависящие от коэффициента трансформации АТ n_{AT} , могут принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Отрицательные значения коэффициентов свидетельствуют о «расхождении» токов, т. е. увеличении разности вторичных токов в плечах селективного органа, обеспечивающей его работоспособность. Граничные значения сопротивлений в этом случае отсутствуют.

Положительные значения коэффициентов свидетельствуют о «схождении», токов в плечах, т. е. об их выравнивании и уменьшении разности и наличии граничных значений сопротивлений сети, при которых селективный орган теряет работоспособность. Поэтому расчет производится для положительных значений коэффициентов K_1 и K_2 .

Для случая, когда

$$K_{I1} / K_{I2} = 1 / n_{AT}, \quad (3.16)$$

граничные значения сопротивления системы отсутствуют.

Для селективного органа это означает, что его работоспособность обеспечивается. Трансформаторы тока с таким отношением коэффициентов трансформации и коэффициента трансформации автотрансформатора рекомендуется использовать в токовых защитах НП автотрансформаторов с селективным органом.

В случае, когда не обеспечивается условие (3.16), определяются расчетные граничные значения сопротивлений $X_{0c,расч}$ из (3.14) и (3.15), которые сравниваются с реальными значениями сопротивлений сети X_{0c} и делается заключение о работоспособности селективного органа. Его работоспособность с принятыми коэффициентами трансформации ТТ обеспечивается для значений сопротивлений сети:

$$X_{0c} \geq X_{0c,расч}. \quad (3.17)$$

Методика расчета

1. На первом этапе по паспортным данным автотрансформатора рассчитываются, приводятся к одной стороне и строятся зависимости сопротивлений нулевой последовательности сторон ВН (X_{01}), СН (X_{02}) и НН (X_{03}) при изменении напряжения в диапазоне регулирования напряжения под нагрузкой в виде зависимости $X_0 = f(U_{\text{СН пер}})$.

2. На полученных кривых отмечается рабочий диапазон при регулировании напряжения автотрансформатора, определяются значения коэффициента трансформации автотрансформатора $n_{\text{АТ}}$ в крайних точках рабочего диапазона и средней точке внутри рабочего диапазона.

3. Принимаются коэффициенты трансформации трансформаторов тока сторон высшего и среднего напряжений АТ (при включении селективного органа без выравнивающих промежуточных трансформаторов тока трансформаторы тока должны иметь одно исполнение по вторичному номинальному току).

4. По (3.11) и (3.13) определяются коэффициенты K_2 и K_1 для значений рабочего диапазона из п.2.

5. По выражениям (3.14), (3.15) для положительных значений K_2 и K_1 определяются граничные значения сопротивлений сети, при которых обеспечивается работоспособность селективного органа.

6. Граничные значения сопротивлений сравниваются с реальными значениями сопротивлений сети и по (3.17) делается заключение о возможности использования селективного органа в токовых защитах нулевой последовательности автотрансформатора.

Пример. Расчет граничных условий для использования селективного органа в токовых защитах нулевой последовательности автотрансформатора.

Расчет выполняется для автотрансформатора АТДЦТН-63000/220/110 с $U_{\text{ВН}} = 230$ кВ, $U_{\text{СН}} = 121$ кВ (рис. 3.29), по изложенной выше методике.

1. По паспортным данным автотрансформатора построены кривые изменения сопротивлений нулевой последовательности сторон ВН (X_{01}), СН (X_{02}), НН (X_{03}) в зависимости от напряжения $U_{\text{СН}}$ в диапазоне его регулирования $X_0 = f(U_{\text{СН пер}})$ (рис. 3.30). Сопротивления приведены к расчетному напряжению $U_{\text{ВН}}$.

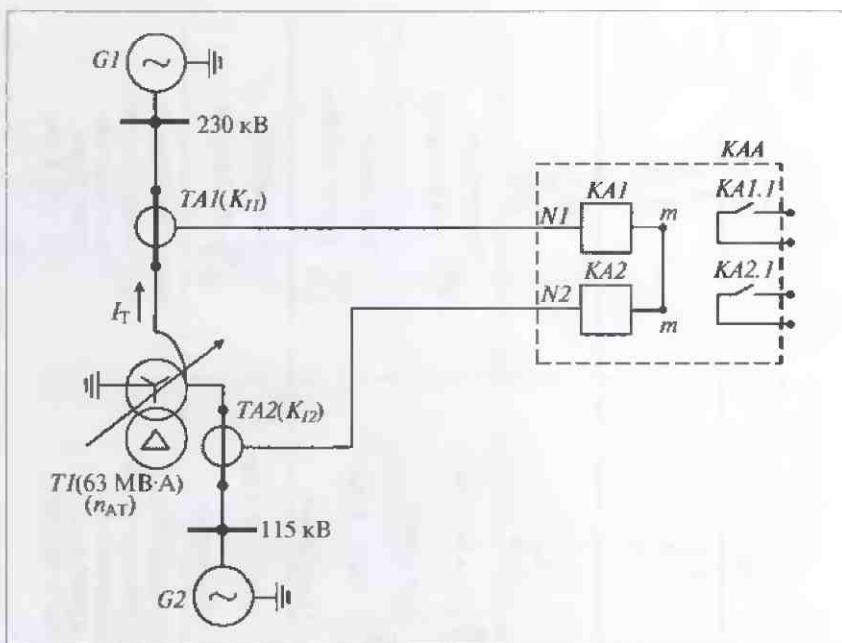


Рис. 3.29. Автотрансформатор и смежная сеть ВН и СН для расчета селективного органа

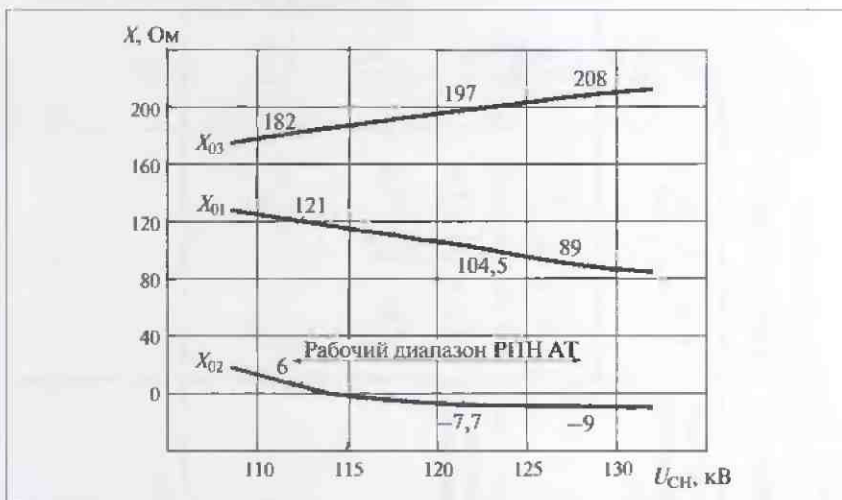


Рис. 3.30. Изменение сопротивления автотрансформатора АДЦТН-63000/220/110 сторон высшего, среднего и низшего напряжения при регулировании РПН

Таблица 3.3.

Пункт	Расчетное выражение	n_{AT}	K_1	
			200/5	400/5
4. Определение коэффициентов K_1 и K_2	$K_1 = \frac{n_{AT} K_{11}}{K_{12} - n_{AT} K_{11}}$	1,8	1,5	-6,0
		1,9	1,75	-4,75
		2,05	2,16	-3,72
	$K_2 = \frac{K_{12}}{n_{AT} K_{11} - K_{12}}$	1,8	-2,5	5,0
		1,9	-2,7	3,75
		2,05	-3,16	2,72
5. Граничные сопротивления сети	$X_{01c} = \frac{X_{03} - X_{01}}{K_1}$ $X_{02c} = \frac{X_{03} - X_{02}}{K_2}$	1,8	$208 - 89 = 49,7 \text{ Ом}$	Отсутствуют
			Отсутствуют	Отсутствуют
		1,9	$\frac{197}{1,75} - 104,5 = 8 \text{ Ом}$	Отсутствуют
		2,05	$\frac{182 - 121}{216} = -36,7 \text{ Ом}$	Отсутствуют
6. Вывод	—	—	Работоспособность селективного органа обеспечивается, кроме сети с $X_{01c} < 49,7 \text{ Ом}$	Работоспособность селективного органа обеспечивается, кроме сети с $X_{02c} < 60,9 \text{ Ом}$ $X_{02c} < 16,7 \text{ Ом}$

2. Принят рабочий диапазон регулируемых напряжений $U_{СН} = 112,3 \div 128,2$ кВ и определены соответствующие ему коэффициенты трансформации АТ ($n_{АТ} = 2,05 \div 1,8$) и значения сопро- тивлений:

- для $n_{АТ} = 1,8$ $X_{01} = 89$ Ом; $X'_{02} = -9$ Ом; $X'_{03} = 208$ Ом;
- для $n_{АТ} = 1,9$ $X_{01} = 104,5$ Ом; $X'_{02} = -7,7$ Ом; $X'_{03} = 197$ Ом;
- для $n_{АТ} = 2,05$ $X_{01} = 121$ Ом; $X'_{02} = 6$ Ом; $X'_{03} = 182$ Ом.

3. Коэффициенты трансформации ТТ.

Расчет выполняется для следующих вариантов использования трансформаторов тока: на стороне высшего напряжения $K_{I1} = 200/5$, $400/5$ и на стороне среднего напряжения $K_{I2} = 600/5$.

Дальнейший расчет по п. 4 и 5 и вывод по п. 6 сведены в табл. 3.3.

Токовая защита нулевой последовательности высшей стороны автотрансформатора с селективным органом. В электрической сети напряжением 220 кВ достаточно широкое применение находит кольцевая схема ПС в виде четырехугольника (квадрата) из-за ее экономичности (рис. 3.31), или один из ее вариантов (на этапе развития ПС) — схема с одной секцией, двумя линиями и одним автотрансформатором.

В случае отказа защиты линии, например $W1$, токовая защита нулевой последовательности на стороне 220 кВ автотрансформатора $T1$ действует на отключение выключателей $Q1$ и $Q3$, автотрансформатора $T2$ — на отключение выключателей $Q2$ и $Q4$. Происходит отключение обеих линий и обоих автотрансформаторов, в то время как для селективного отключения КЗ необходимо отключить только выключатели линии $W1$; $Q1$ — от защит автотрансформатора $T1$ и $Q2$ — от защит автотрансформатора $T2$.

Однако защиты автотрансформаторов не могут выявить линию с КЗ и отключить ее выключатель. Это недостаток резервных защит автотрансформаторов. Использование селективного органа в токовых защитах нулевой последовательности стороны высшего напряжения АТ устраняет указанный недостаток. Плечами селективного органа включается на токи нулевой последовательности линий.

На рис. 3.31 приведено включение защит и селективного органа для автотрансформатора $T1$ (для автотрансформатора $T2$ схема аналогична).

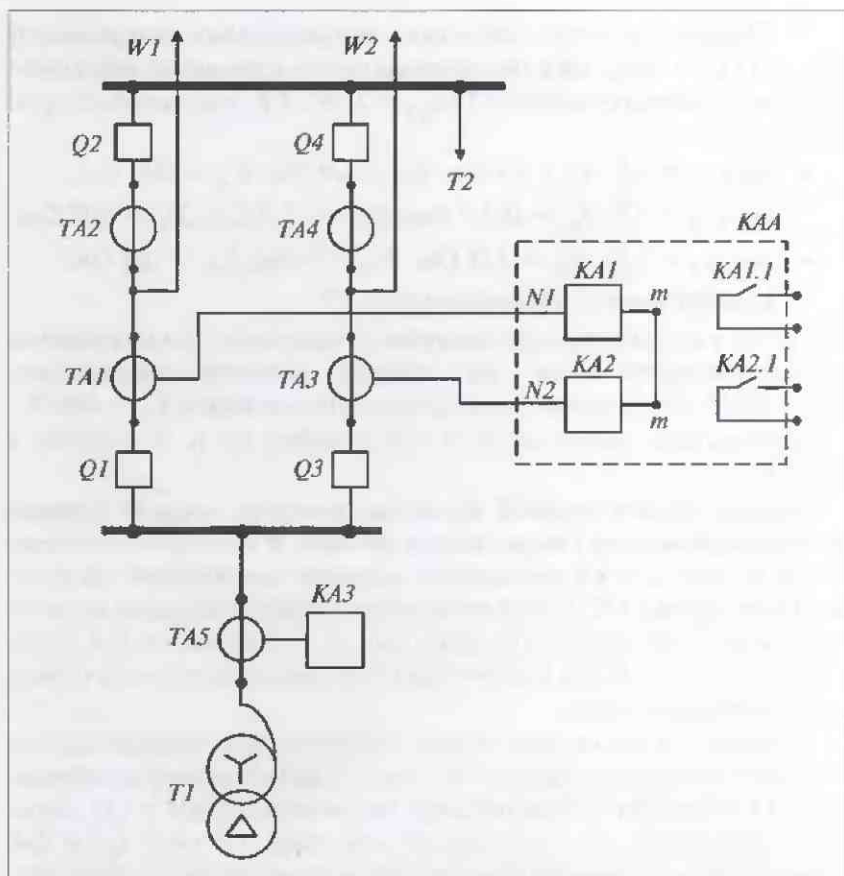


Рис. 3.31. Токвая защита нулевой последовательности с селективным органом стороны высшего напряжения автотрансформатора:

$W1, W2$ — линии; $T1, T2$ — автотрансформаторы; $Q1 - Q4$ — выключатели; $TA1 - TA5$ — трансформаторы тока защит линии и АТ; $KA3$ — защита АТ; $KAA, KA1, KA2$ — селективный орган и его плечи

Учитывая, что в сравниваемых токах ток поврежденной линии включает в себя ток нулевой последовательности автотрансформатора и больше тока неповрежденной линии, селективные органы выявляют поврежденную линию по большему току и разрешают отключение ее выключателей $Q1$ и $Q2$. Действие на отключение выключателей $Q3$ и $Q4$ неповрежденной линии будут блокированы несрабатыванием исполнительных органов плеч селективных органов, включенных на токи линии $W2$.

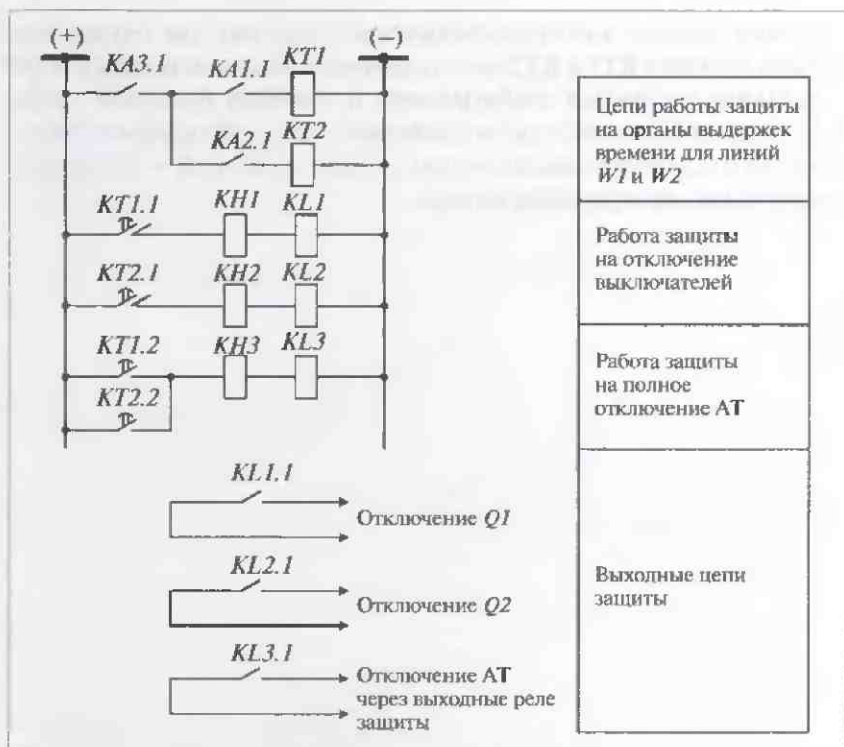


Рис. 3.32. Выходные цепи токовой защиты нулевой последовательности с селективным органом стороны высшего напряжения автотрансформатора

В результате на ПС сохраняются в работе линия W2 и оба автотрансформатора. Если на подстанции установлен один автотрансформатор и имеются две линии, то в работе сохраняется автотрансформатор и вторая линия. Этим повышается надежность работы электрической сети.

Одновременно селективный орган позволяет выполнить действие защиты на отключение выключателей линий с разными выдержками времени, согласованными для каждой с ее резервными защитами, вместо одной выдержки времени для обеих линий, принимаемой по согласованию с большей из них в защитах автотрансформатора без селективного органа. Это повышает быстродействие защиты при отключении КЗ на линии, имеющей меньшие выдержки времени.

На рис. 3.32 показаны выходные цепи защиты.

Схема защиты автотрансформатора содержит два органа выдержек времени $KT1$ и $KT2$ для отключения выключателей $Q1$ и $Q2$ с разными уставками срабатывания и токовый пусковой орган $KA3$. Защита выполняет два воздействия: с первой выдержкой времени на отключение выключателя линии, со второй — на полное отключение автотрансформатора.



Рис. 1.1. Схема защиты автотрансформатора

В схеме защиты автотрансформатора (рис. 1.1) показаны органы выдержек времени $KT1$ и $KT2$ для отключения выключателей $Q1$ и $Q2$ с разными уставками срабатывания и токовый пусковой орган $KA3$. Защита выполняет два воздействия: с первой выдержкой времени на отключение выключателя линии, со второй — на полное отключение автотрансформатора.

Схема защиты автотрансформатора (рис. 1.1) показаны органы выдержек времени $KT1$ и $KT2$ для отключения выключателей $Q1$ и $Q2$ с разными уставками срабатывания и токовый пусковой орган $KA3$. Защита выполняет два воздействия: с первой выдержкой времени на отключение выключателя линии, со второй — на полное отключение автотрансформатора.

Список литературы

1. Федосеев А. М. Релейная защита электрических систем: Учебник для вузов. М.: Энергия, 1976.
2. Федосеев А. М., Федосеев И. А. Релейная защита электрических систем: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1992.
3. Нагай В. И. Релейная защита ответственных подстанций электрических сетей; для ИТР энергосистем. М.: Энергоатомиздат, 2002.
4. Принципы информационного совершенства релейной защиты / Ю. Я. Лямец, Е. Б. Ефимов, Г. С. Нудельман, Я. Законьшек и др. // Электротехника. 2001. № 2. С. 30 – 34.
5. Дроздов А. Д. Электрические цепи с ферромагнитными сердечниками в релейной защите. М.-Л.: Энергия, 1965.
6. Дроздов А. Д. Несимметричные переходные режимы в электрических системах и цепях релейной защиты. Новочеркасск: Изд-во НПИ, 1977.
7. Электрические цепи с ферромагнитными элементами в релейной защите. / А. Д. Дроздов, А. С. Засыпкин, С. Л. Кужиков и др.; Под общ. ред. В. В. Платонова. М.: Энергоатомиздат, 1986.
8. Руководящие указания по релейной защите. Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110 – 500 кВ. Расчеты. Вып. 13Б. М.: Энергоатомиздат, 1985.
9. Информационные материалы по микропроцессорным защитам гидрогенераторов Волжской ГЭС (Волгоградская обл.), ОАО «ЭКРА», г. Чебоксары.
10. Рекомендации по применению и выбору уставок функции дифференциальной защиты трансформаторов устройства RET 670. Методическое пособие АББ4.650031.002. Чебоксары: Фирма Силовые и автоматизированные системы.
11. Засыпкин А. С. Релейная защита трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1989.

12. **Теоретические основы** построения логической части релейной защиты и автоматики / В. Е. Поляков, С. Ф. Жуков, С. М. Проскурин и др. Под ред. В. Е. Полякова. М.: Энергия, 1979.
13. **Поляков В. Е., Клецель М. Я.** Алгоритмы централизованных защит подстанций и свойства функций, их описывающих // Изв. вузов: Энергетика. 1979. С. 90 – 93.
14. **Свидетельство РФ № 105784 на полезную модель.** Устройство релейной защиты сосредоточенного объекта от коротких замыканий / И. Ф. Маруда. Опубл. 20.05.11. № 17.
15. **Рожкова Л. Д., Козулин В. С.** Электрооборудование станций и подстанций. М.: Энергоатомиздат, 1987.
16. **Кучеров Ю. И., Таубес И. Р., Удрис А. П.** Региональный семинар по релейной защите трансформаторов // Энергетик. 1994. № 3. С. 24 – 25.
17. **Гринев Н.** Алгоритм встречно-направленной логической защиты шин // Новости электротехники. 2010. № 4(40).
18. **Правила устройства электроустановок.** 6-е изд. перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1987.
19. **Маруда И. Ф.** Релейная защита двойной селективности. Логические защиты электрических объектов. // Электричество. 2011. № 1. С. 17 – 25.
20. **Руководящие указания по релейной защите.** Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110 – 500 кВ. Схемы. Вып. 13А. М.: Энергоатомиздат, 1985.
21. **Общие требования к системам противоаварийной и режимной автоматики, телеметрической информации, технологической связи в ЕЭС России.** Приказ ОАО «ЕЭС России», 11.02.08. № 57 (Приложение № 1).
22. **Руководство по эксплуатации ОАО «ЭКРА» 656453.028 РЭ «Шкаф релейной защиты автотрансформатора 110 – 220 кВ и автоматики управления выключателями типа ШЛ 2607.071».**
23. **Маруда И. Ф.** Совершенствование и расчет резервных защит автотрансформаторов 220 кВ // Электрические станции. 2011. № 4. С. 40 – 45.
24. **Руководящие указания по релейной защите.** Защита генераторов, работающих на сборные шины. М.–Л.: ГЭИ, 1961. Вып. 1.
25. **Савченко Е. В.** Резервная защита синхронных генераторов // Электрические станции. 1974. № 5.
26. **Руководящие указания по релейной защите.** Защита блоков генератор – трансформатор и генератор – автотрансформатор. М.–Л.: Энергия, 1963. Вып. 5.
27. **Маруда И. Ф.** Повышение эффективности резервных защит от коротких замыканий объектов электростанций // Электрические станции. 2013. № 1. С. 37 – 43.

28. **Руководящие указания по релейной защите.** Дистанционная защита линий 35 – 330 кВ. М.-Л.: Энергия, 1966. Вып. 7.
29. **Маруда И. Ф.** О максимальной токовой защите блочных генераторов ГЭС // Электрические станции. 2011. № 7. С. 50 – 51.
30. **Маруда И. Ф.** Способ обеспечения селективности токовых защит нулевой последовательности // Электричество. 2000. № 9. С. 27 – 31.
31. **Руководящие указания по релейной защите.** Ступенчатая токовая защита нулевой последовательности от замыканий на землю линий 110 – 220 кВ. М.-Л.: ГЭИ, 1961. Вып. 2.
32. **Маруда И. Ф.** Решение проблемы релейной защиты тупиковых ВЛ 110 – 220 кВ параллельного следования с взаимоиндукцией // Энергетик. 2001. № 6. С. 28 – 29.
33. **Чернин А. Б.** Вычисление электрических величин и поведение релейной защиты при неполнофазных режимах в электрических системах. М.: Госэнергоиздат, 1963.
34. **Маруда И. Ф.** Релейная защита линий 110 – 220 кВ при разрывах фаз // Электрические станции. 2002. № 1. С. 40 – 42.
35. **Свидетельство РФ № 3512** на полезную модель. Устройство с избирательностью действия для релейной защиты / И. Ф. Маруда. Опубл. 16.01.97. № 1.
36. **Свидетельство РФ № 3667** на полезную модель. Селективный орган токовых защит / И. Ф. Маруда. Опубл. 16.07.97. № 2.
37. **Казанский В. Е.** Трансформаторы тока в схемах релейной защиты. М.: Энергия, 1969.
38. **Руководящие указания по релейной защите.** Токовая защита нулевой последовательности от замыканий на землю линий 110 – 500 кВ. Расчеты. М.: Энергия, 1980. Вып. 12.
39. **Пат. 2120168 РФ.** Способ обеспечения селективности токовых защит нулевой последовательности / И. Ф. Маруда. Опубл. 10.01.98. № 28.
40. **Пат. 2143164 РФ.** Способ обеспечения селективности токовых защит нулевой последовательности / И. Ф. Маруда. Опубл. 20.12.99. № 35.
41. **Маруда И. Ф.** Токовые защиты нулевой последовательности автотрансформаторов // Электрические станции. 1997. № 6. С. 48 – 52.
42. **Вавин В. Н.** Релейная защита блоков турбогенератор – трансформатор. М.: Энергоатомиздат, 1982.
43. **Маруда И. Ф.** Релейная защита понижающих трансформаторов от коротких замыканий на линиях при разрывах фаз // Электрические станции. 2003. № 2. С. 44 – 46.

Содержание

Часть 1. Логические защиты

Предисловие	3
Список принятых сокращений	6
Введение	7
ГЛАВА ПЕРВАЯ. Принципы построения логических защит	13
ГЛАВА ВТОРАЯ. Защиты двойной селективности	21
2.1. Общие сведения	21
2.2. Электрические распределительные сети 110 – 220 кВ	22
2.3. Автотрансформаторы	34
2.4. Генераторы электростанций	44
2.5. Блоки генератор – трансформатор электростанций.	50
2.6. Поведение логических защит объектов электростанций при качаниях.	64
2.7. Максимальная токовая защита с двумя зонами защиты блочных генераторов ГЭС	65
Список литературы.	74

Часть 2. Токовые защиты нулевой последовательности

Предисловие	3
Список принятых сокращений	6
ГЛАВА ТРЕТЬЯ. Токовые защиты нулевой последовательности от коротких замыканий.	7
3.1. Общие положения.	7

3.2. Токовые направленные защиты нулевой последовательности	8
3.3. Проблемы чувствительности органов направления токовых защит нулевой последовательности	12
3.4. Способ токовых избирателей поврежденного присоединения	20
3.5. Релейная защита радиальных линий с взаимоиндукцией	31
3.6. Релейная защита линий проходных подстанций распределительной сети 110 кВ	35
3.7. Релейная защита автотрансформаторов.	46
Список литературы.	59

Библиотечка электротехника

Приложение к производственно-массовому журналу «Энергетик»

МАРУДА ИВАН ФЕДОРОВИЧ

Релейная защита электрических объектов.

Часть 2. Токовые защиты нулевой последовательности

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

115280, Москва, ул. Автозаводская, 14

Тел. (495) 675-19-06, тел./факс 234-74-21

Редакторы: Л. Л. Жданова, Н. В. Олышанская

Сдано в набор 03.03.15. Подписано в печать 12.03.15.

Формат 60×84¹/₁₆. Печать офсетная.

Печ. л. 4,0. Заказ БЭТ/03(195)-2015.

Макет выполнен издательством «Фолиум»: 127238, Москва, Дмитровское ш., 157.

Отпечатано типографией издательства «Фолиум»: 127238, Москва, Дмитровское ш., 157.

Журнал «Энергетика за рубежом»

Приложение к журналу «Энергетик»

Подписывайтесь на специальное приложение к журналу «Энергетик» — **«Энергетика за рубежом»**. Это приложение выходит **один раз в два месяца**.

Журнал «Энергетика за рубежом» знакомит читателей с важнейшими проблемами современной зарубежной электроэнергетики:

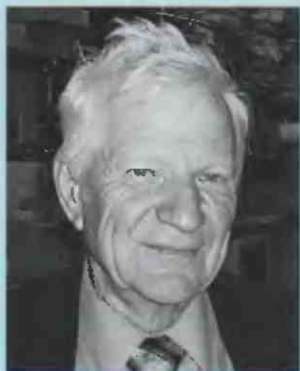
- развитие и надежность энергосистем и энергообъединений;
- особенности и новшества экономических и рыночных отношений в электроэнергетике;
- опыт внедрения прогрессивных технологий в энергетическое производство;
- модернизация и реконструкция (перемаркировка) оборудования электростанций, электрических и тепловых сетей;
- распространение нетрадиционных и возобновляемых источников энергии;
- энергосбережение, рациональное расходование топлива и экологические аспекты энергетики.

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении связи по объединенному каталогу **«ПРЕССА РОССИИ»**. Том 1. Российские и зарубежные газеты и журналы.

Подписной индекс журнала «Энергетика за рубежом» — приложения к журналу «Энергетик»

87261

Об авторе



**Маруда
Иван Федорович —**

кандидат технических наук, ведущий специалист службы РЗА «СО ЕЭС» — Волгоградское РДУ.

Автор монографии, статей, изобретений в области релейной защиты.

Повышение эффективности резервных защит электрических объектов электростанций, электрических сетей
