



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Энергетика, автоматика и системы коммуникаций»

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

«Основы релейной защиты элементов энергетических систем»

Автор
Цыгулев Н.И.; Проус В.Р.

Ростов-на-Дону, 2013



Аннотация

В работе используется новый подход к изложению материала – релейная защита и автоматика энергосистем представлены целостной философией эволюции. Автор стремится научить читателя логически мыслить категориями релейной защиты.

В книге подробно разъясняется, как эволюционировали релейная защита и сознание специалистов - релейщиков, почему проектировщики релейного оборудования приняли то, или иное конструкторское решение, описываются технические проблемы и анализируются пути их разрешения.

Цель учебного пособия научить творчески подходить к проектированию релейной защиты элементов энергосистемы, уметь анализировать поведение релейной защиты и автоматики при возникновении отклонений от нормального режима работы системы, предсказывать поведение энергосистемы при различных воздействиях на неё.

Учебное пособие не только содержит концептуальные основы построения современных устройств релейной защиты и автоматики энергосистем, но и обосновывает необходимость и пути совершенствования этих устройств.

Для бакалавров направления 140400 «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения.

Автор

д.т.н., проф. Цыгулев Николай Иосифович
к.т.н., доцент Проус Владимир Романович





Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ	6
ВВЕДЕНИЕ.....	9
1. ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ	12
1.1. Нарушение нормального режима работы энергосистем.....	12
1.2. Назначение релейной защиты и автоматики.....	19
1.3. Основные свойства систем релейной защиты	21
1.4. Структурная схема устройств релейной защиты	24
1.5. Развитие техники релейной защиты	27
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	32
2. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ РЕЛЕ	33
2.1 Общие сведения	33
2.2. Реле тока	34
2.3. Реле направления мощности.....	49
2.4. Реле сопротивления.....	54
2.5. Дифференциальное реле	58
2.6. Промежуточные реле.....	64
2.7. Реле времени.....	67
2.8. Указательные реле	71
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	71
3. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ. ФИЛЬТРЫ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ.....	73
3.1. Назначение измерительных трансформаторов и общие принципы их работы	73
3.2. Измерительные трансформаторы тока и их работа в установившемся режиме	74
3.3. Схемы соединения трансформаторов тока и цепей тока защиты.....	85
3.4. Измерительные трансформаторы напряжения	87
3.5. Схемы соединения обмоток трансформаторов напряжения	92
3.6. Фильтры симметричных составляющих	



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	99
4. МАКСИМАЛЬНЫЕ ТОКОВЫЕ ЗАЩИТЫ.....	101
4.1. Принцип действия защиты	101
4.2. Схемы построения максимальной токовой защиты	103
4.3 Токовая отсечка.....	113
4.4.Токовая отсечка на линиях с двухсторонним питанием.....	119
4.5. Токовая направленная защита.....	121
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	126
5. ДИСТАНЦИОННАЯ ЗАЩИТА	128
5.1. Принцип действия защиты	128
5.2. Принципы построения измерительных органов реле сопротивления	129
5.3. Структурная схема дистанционной защиты.....	133
5.4. Принципы выполнения блокировки от качаний	134
5.5. Выбор параметров срабатывания дистанционной защиты.....	136
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	138
6. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА	139
6.1 Продольная дифференциальная токовая защита	139
6.2. Поперечная дифференциальная защита	142
6.3. Дифференциальная токовая защита генераторов	145
6.4.Дифференциальная токовая защита трансформаторов.....	147
6.5.Дифференциальная токовая защита сборных шин	152
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	156
7. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЗАЩИТЫ	157
7.1.Назначение и виды высокочастотных защит	157
7.2.Принципы выполнения и работа высокочастотной части защиты	157
7.3.Направленная защита с высокочастотной блокировкой.....	159
7.4.Дифференциально-фазная высокочастотная защита.....	163



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	170
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ЗАЩИТА ГЕНЕРАТОРОВ	171
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ЗАЩИТА ТРАНСФОРМАТОРОВ	187
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ	209
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. ЗАЩИТА ШИН	216
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	222



ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие написано в соответствие содержанием дисциплины «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». В пособии компактно излагаются физические основы релейной защиты, изучение которых должно создать целостную картину построения релейной защиты и автоматики в энергосистемах.

При написании книги автор опирался на фундаментальные монографии и учебники по релейной защите и автоматике отечественных и зарубежных учёных, таких как Атабеков Г. И., Ванин В.К., Гельфанд Я.С., Дроздов А.Д., Засыпкин А.С., Кужеков С.Л., Фабрикант В.И., Федосеев А.М., Шнеерсон Э.М., Warrington A.R., Sachdev M.S., Phadke A.G., Thorp J. S.

Построение учебного пособия предусматривает легко реализуемую возможность выборочного использования его материала. При этом сохраняются идеи, главные для научного направления, отражённого в книге. Для этого направления наиболее существенным является особое внимание к физике явлений при наибольшем приближении к физике трактовки их.

Настоящая дисциплина и соответствующее ей учебное пособие не ставят своей целью дать студенту полное руководство к проектированию релейной защиты сложных энергетических систем. При изучении этой дисциплины студент должен не столько получить навыки в проектировании защит, сколько выработать философское понимание процессов в системах защиты, связанных с физикой явлений и заложенных в алгоритмов работы, научиться практически подходить к инженерной оценке анализа работы устройств защиты. Для этого будущему инженеру необходимо воспитывать вкус и способности к физической интерпретации результатов анализа.

Электрические системы всё в большей степени становятся автоматически регулируемыми и управляемыми сложными системами, перерастая в системы кибернетического типа, т.е. целенаправленные, оптимизируемые при прогнозировании, проектировании и эксплуатации.

В современные сети повсеместно вводятся технологии *Smart Grid* (интеллектуальные сети). При этом все эксперты замечают, что в России понятие *Smart Grid* имеет наполнение отличное от концепций, реализуемых в Европе или Америке. По максимуму в России под *Smart Grid* следует понимать электрические сети, имеющие глубокую степень автоматизации, позволяющие



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

управлять перетоками активной мощности (в т.ч. с реверсом) и реактивной мощности, а также допускающие интеграцию малой и распределённой генерации в общую энергосистему. Технологии *Smart Grid* сетей предъявляет новые требования к устройствам релейной защиты. Можно даже говорить о смене подхода к обеспечению упомянутых выше характеристик релейной защиты: селективности и чувствительности.

Технологии *Smart Grid* – приводят к коренному изменению принципов построения электрических сетей. В сетях появляется большое количество управляемых (или самоуправляемых) компонентов, например, таких, как быстродействующие компенсаторы реактивной мощности, токоограничивающие устройства и пр. Кроме того, ожидается, что в энергосистеме появится огромное количество генерирующих источников, режим работы которых (особенно когда речь идет об альтернативных источниках энергии) невозможно спланировать. Все эти новшества будут оказывать серьезное влияние на режимы работы сети, что, в свою очередь, потребует изменений функций и алгоритмов релейной защиты.

Усложнение режимов работы сети и невозможность их адекватного прогнозирования ставит вопрос о принципиальной невозможности расчёта уставок для релейной защиты. Штатный режим работы такой сложной системы может иметь характеристики свойственные аварийному режиму и наоборот – взаимное влияние элементов сети может скрыть от релейной защиты факт вхождения системы в аварийный режим. В случае возникновения сбоев в работе такой сложной сети с огромным количеством активных компонентов, влияющих друг на друга, выяснить причину этих сбоев будет очень непросто.

Развитие элементной базы релейной защиты и повсеместное внедрение микропроцессорных устройств релейной защиты (МУРЗ) фактически подталкивает разработчиков совместить несколько систем в рамках одной. В частности, некоторые из концепций *Smart Grid* подразумевают наделение релейной защиты функциями информационно-измерительной системы. Возможно, что релейной защите поручат также вести мониторинг и диагностировать состояние электрооборудования. Теоретически современные МУРЗ могут взять на себя даже функции учёта и контроля потребления. Всё это означает повышение концентрации функций в единичных микропроцессорных модулях, что чревато снижением надёжности релейной защиты.

Указанный конфликт технологий ставит под сомнение в



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

принципе концепцию *Smart Grid*. Релейная защита должна оставаться обособленной системой, элементы которой выполняют функции только релейной защиты. Но даже при такой постановке задачи, открытым остаётся вопрос расчёта уставок релейной защиты для работы в системе со сложным и непредсказуемым режимом.

В то же время существует и иная точка зрения. Ряд аналитиков считают, что проблемы интеграции релейной защиты со *Smart Grid* можно решить, если вывести систему защиты на новый уровень. Для чего можно использовать алгоритмы нечёткой логики, нейронные сети, элементы искусственного интеллекта, и т.д.

Один из векторов развития релейной защиты – использование автоматических программно-технических комплексов проверки устройств РЗА, а также переход к динамическому тестированию функций защит.

Рассмотренный круг вопросов и определил содержание книги.

Авторы



ВВЕДЕНИЕ

Энергетическая система представляет собой сложную многозвенную техническую систему, предназначенную для производства, распределения и потребления электроэнергии. Процессы, происходящие в энергосистеме, отличаются быстротой, взаимосвязанностью, единством процессов производства, распределения и потребления электроэнергии. Управление ими без применения специальных технических средств, называемых средствами автоматического управления, в большинстве случаев оказывается невозможным.

В процессе функционирования энергетических систем могут возникать повреждения, чаще всего короткие замыкания, сопровождающиеся увеличением тока через отдельные элементы энергосистемы. Без принятия специальных мер, такие режимы могут привести к повреждению элементов энергосистемы и нарушению электроснабжения.

В соответствие с Международным стандартом «Защита энергетических систем» IES 50 (448) «защитой является совокупность устройств, предназначенных для обнаружения повреждений или других аномальных режимов в энергосистеме, отключения повреждения, прекращения аномальных режимов и подачи команд или сигналов». Одним из важнейших элементов защиты являются измерительные реле, которые реагируют на значения контролируемых (измеряемых) параметров энергосистемы. Устройством защиты является устройство, состоящее в общем случае из совокупности отдельных измерительных реле и логических элементов, предназначенных для выполнения предусмотренных функций при возникновении повреждений в энергосистемах.

Релейную защиту можно рассматривать как управляющую систему, которая в общем случае получает информацию о токах, напряжениях и состоянии коммутационных элементов в отдельных пунктах энергосистемы. В результате обработки этой информации устройства релейной защиты вырабатывают управляющие сигналы для выключателей (команды отключения или включения), а также различные сообщения, позволяющие фиксировать или анализировать процессы, протекающие в элементах энергосистемы, и функционирования самих устройств релейной защиты.

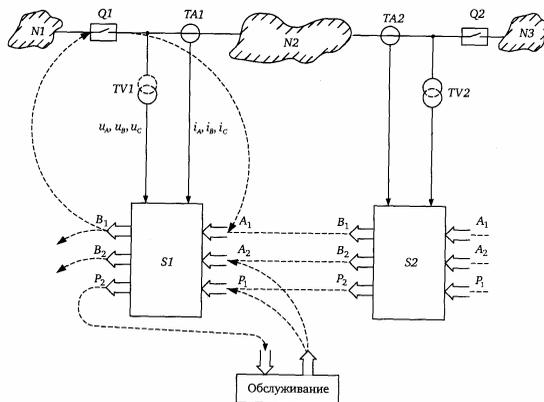
В релейной защите в последние два десятилетия произошли революционные качественные изменения, вызванные широким внедрением цифровой (микропроцессорной) техники. Это



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

обусловлено, в первую очередь, существенными преимуществами релейной защиты на микропроцессорной элементной базе, по сравнению с электромеханической и полупроводниковой (электронной) релейной защитой.

Принципы построения и алгоритмы, используемые в цифровой релейной защите, во многом отличаются от применяемых в электромеханических и электронных релейных защитах, в виду существенно различающихся технической основы и способов обработки информации. Новые возможности цифровой обработки сигналов и обмена информацией, позволяют реализовать целый ряд защитных функций, которые невозможно было осуществить ранее. Поток информации, используемые в общем случае в цифровой релейной защите, показаны на рисунке.



Здесь $N1, N2, N3$ - части электрической системы; $Q1, Q2$ - силовые выключатели; $TA1, TA2$ - высоковольтные измерительные трансформаторы; $TV1, TV2$ - высоковольтные измерительные трансформаторы напряжения; $S1, S2$ - устройства релейной защиты.

Цифровая релейная защита, в общем случае, получает следующую информацию: непрерывные (аналоговые) сигналы: токи i_A, i_B, i_C , напряжения u_A, u_B, u_C в месте установки защиты и, при необходимости, в любых других местах энергосистемы; а также дискретные (бинарные) сигналы (0,1), характеризующие состояние коммутационной аппаратуры, других устройств защиты и др.

Всё это делает возможным повышение технического со-



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

вершенства релейной защиты при применении цифровых устройств, благодаря более полному учёту свойств повреждений в энергосистеме, большей долговечности и меньшим затратам на обслуживание, прежде всего периодическое, вследствие возможности увеличения сроков между проверками и отсутствие необходимости ревизии каких-либо механических элементов.

В книге основное внимание уделено описанию «классических» принципов релейной защиты (токовой, токовой направленной, дистанционной и др.), которые в полном объёме и с определёнными расширениями используются и в микропроцессорной защите. При этом легче разобраться в принципе выполнения устройств защиты и предъявляемых к ним требованиям. Это позволило в необходимых случаях иметь полноценное описание функций цифровых устройств.

Наступивший новый век и третье тысячелетие ставят новые грандиозные задачи перед энергетиками и, в общем комплексе решения этих задач, роль специалистов по противоаварийному управлению будет возрастать.



1. ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

1.1. Нарушение нормального режима работы энергосистем

В процессе проектирования и эксплуатации релейной защиты электротехнического оборудования энергосистем необходимо учитывать практическую возможность возникновения ненормальных режимов работы, при которых электроснабжение потребителей и условия нормальной работы электрооборудования нарушаются: ухудшается качество электроэнергии за счёт недопустимых отклонений величин напряжения и частоты, происходят повреждения электрического оборудования, не в полной мере поступает энергия потребителям. Такие вынужденные нарушения нормального режима работы электрических систем классифицируются как аварии.

Создание условий безаварийной работы электрических систем – важнейшая задача, на успешное решение которой направлена научная и практическая деятельность многочисленных коллективов специалистов, изготавливающих оборудование, проектирующих, монтирующих и эксплуатирующих электроэнергетическое оборудование. Предотвращение аварий в электрических системах достигается тщательным и строгим соблюдением правил технической эксплуатации электрических установок и своевременным проведением всех необходимых мероприятий, в том числе, планово—предупредительных ремонтов и т.п.

Наряду с проведением мероприятий, исключающих самую возможность повреждений в электрических системах, одним из действенных способов современной борьбы с авариями является применение релейной защиты в сочетании с системной электроавтоматикой.

В ряде случаев полное предотвращение того или иного вида повреждения в электрических системах представляется с технико-экономической точки зрения менее целесообразным по сравнению с применением релейной защиты и системной автоматики, предупреждающих развитие аварий и пресекающих возможность распространения влияния повреждений на остальную часть системы. Примером такого способа борьбы с авариями служит быстродействующая релейная защита в сочетании с автоматическим повторным включением. Быстрое отключение повреждённого участка и автоматическое повторное включение его позволяет ликвидировать повреждение и избежать перерывов в



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

электроснабжении потребителей.

Как показала многолетняя практика эксплуатации энергосистем, аварии наступают в основном в результате нарушения изоляции электрического оборудования, приводящего к коротким замыканиям (КЗ). Нарушения электрической изоляции, в свою очередь могут вызываться перенапряжениями, прямыми ударами молнии, пробоем изоляции вследствие снижения её диэлектрических свойств, механическим повреждением оборудования и т.п. Наиболее уязвимыми элементами в энергосистемах являются воздушные линии электропередачи.

По степени несимметрии токов и напряжений в трёхфазной системе различают симметричные и несимметричные режимы.

Симметричными режимами являются такие, при которых симметрия токов и напряжений всех трёх фаз не нарушается. Сюда относятся случаи равномерной перегрузки всех трёх фаз.

Несимметричные режимы включают большое число нарушений нормального режима, при которых одна фаза, как правило, это фаза *A*, оказывается в условиях, отличных от остальных, или все фазы оказываются в различных условиях. Сюда относятся случаи неравномерной загрузки фаз, несимметричных коротких замыканий и т.п.

Для настройки параметров срабатывания устройств релейной защиты и анализа работы защиты при возникновении аварийных режимов требуется производить расчёт токов симметричных (трёхфазных) и несимметричных коротких замыканий. Такие расчёты для целей релейной защиты выполняются, как правило, в именованных единицах с точным приведением коэффициентов трансформации.

Расчёт тока короткого замыкания (КЗ) при трёхфазном повреждении начинается с составления схемы замещения. Схему замещения изображают однолинейной, изображая только одну фазу. На схеме не показывается обратный путь тока. На схеме замещения изображаются только те элементы, по которым протекает ток КЗ, используя симметрию схемы. Ток КЗ протекает от генераторов к месту повреждения. Элементы схемы замещения обозначают в виде обыкновенной дроби, в числителе которой записывается порядковый номер, а в знаменателе – величина сопротивления. В расчётах применяют укрупнённые именованные величины: кВ, кА, МВА и т.п.

Сопротивления всех элементов схемы выражаются в име-



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

нованных единицах. Сопротивления генератора X_G , трансформатора X_T и линии X_W определяются с помощью выражений:

$$X_G = X_d'' \frac{U_n^2}{S_n} = X_d'' \frac{\cos \varphi \cdot U_n^2}{P_n},$$

$$X_T = \frac{U_{k\%}}{100\%} \frac{U_n^2}{S_n},$$

$$X_W = X_{noz} l,$$

где X_d'' – сверхпереходное сопротивление генератора; S_n , P_n – полная и активная мощности соответственно, $U_{k\%}$ – напряжение короткого замыкания трансформатора (в процентах); U_n – номинальное напряжение; X_{noz} – погонное сопротивление линии электропередачи; l – длина линии.

При наличии в схеме трёхобмоточных трансформаторов и/или автотрансформаторов напряжения короткого замыкания обмоток высокого (B), среднего (C) и низшего (H) напряжений определяются из выражений:

$$U_{k*B} = (U_{k*BC} + U_{k*BH} - U_{k*CH}) / 2,$$

$$U_{k*C} = (U_{k*BC} + U_{k*CH} - U_{k*BH}) / 2,$$

$$U_{k*H} = (U_{k*BH} + U_{k*CH} - U_{k*BC}) / 2.$$

Если напряжение короткого замыкания одной из обмоток уже найдено, расчётные выражения упрощаются:

$$U_{k*\hat{A}} = U_{k*\hat{A}\hat{I}} - U_{k*\hat{I}}, \quad U_{k*\hat{N}} = U_{k*\hat{A}\hat{N}} - U_{k*\hat{A}},$$

$$U_{k*\hat{I}} = U_{k*\hat{A}\hat{I}} - U_{k*\hat{A}}.$$

Сопротивление энергосистемы определяется из выражения

$$x_c = \frac{U_c^2}{S_k^{(3)}},$$



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

где $S_k^{(3)}$ – мощность трёхфазного короткого замыкания,
 U_c – напряжение системы.

Выбирается основная ступень напряжения, к которой затем приводятся сопротивления всех элементов и ЭДС генераторов. В качестве основной ступени напряжения рекомендуется принять ступень, где произошло КЗ.

Коэффициент трансформации трансформатора определяется как отношение линейных напряжений при холостом ходе: напряжения обмотки, обращённой к основной ступени, к напряжению обмотки, обращённой к приводимому элементу.

При наличии между основной ступенью и приводимым элементом нескольких трансформаторов (автотрансформаторов) результирующий (эквивалентный) коэффициент трансформации равен произведению всех коэффициентов трансформации трансформаторов, расположенных между приводимым элементом и основной ступенью:

$$k_{\dot{y}} = k_1 k_2 \cdots k_n = \prod k_i.$$

Приведённые параметры обозначают как $\overset{\circ}{E}$, $\overset{\circ}{U}$, $\overset{\circ}{Z}$. Для приведения используют следующие формулы:

$$\overset{\circ}{E} = E \cdot k_{\dot{y}}, \quad \overset{\circ}{U} = U \cdot k_{\dot{y}},$$

$$\overset{\circ}{I} = I / k_{\dot{y}},$$

$$\overset{\circ}{Z} = Z \cdot k_{\dot{y}}^2.$$

После вычисления всех ЭДС (генераторов и систем) и сопротивлений элементов заданного участка энергосистемы и приведения их к основной ступени напряжения, схема замещения сворачивается, используя правила преобразования электрических схем.

Найденные из преобразованной схемы эквивалентные ЭДС

$\overset{\circ}{E}_{\dot{y}}$ и сопротивление $\overset{\circ}{X}_{\dot{y}}$, используются для вычисления тока КЗ. Учитывая, что ЭДС линейная, а ток КЗ определяется фазный,



то действующее значение сверхпереходного тока КЗ вычисляется по формуле

$$I_k'' = \frac{E_9''}{\sqrt{3} X_9}$$

Найденный ток распределяется по всем элементам энергосистемы.

Векторная диаграмма ЭДС и токов предшествующего режима ($\dot{I}_{HA}, \dot{I}_{HB}, \dot{I}_{HC}$) и токов трёхфазного короткого замыкания ($\dot{I}_{KA}, \dot{I}_{KB}, \dot{I}_{KC}$) представлена на рис.1.1.

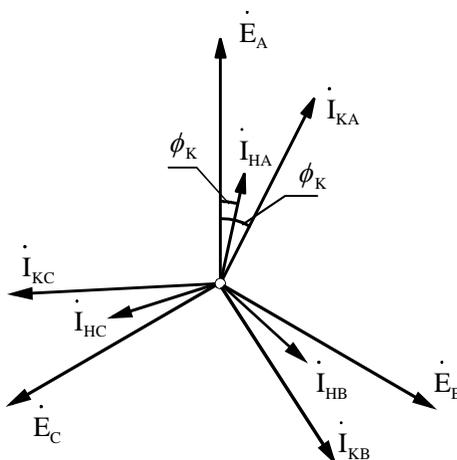


Рисунок 1.1. Векторная диаграмма ЭДС и токов предшествующего режима ($\dot{I}_{HA}, \dot{I}_{HB}, \dot{I}_{HC}$) и токов трёхфазного короткого замыкания ($\dot{I}_{KA}, \dot{I}_{KB}, \dot{I}_{KC}$)

Ток короткого замыкания при несимметричных повреждениях определяется с помощью метода симметричных составляющих. Вычисление токов при несимметричных КЗ производится в следующей последовательности:

- составляются схемы замещения: при междуфазных замыканиях прямой и обратной последовательностей; при замыканиях на землю – прямой, обратной и нулевой последовательностей;
- вычисляются сопротивления элементов схем



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

замещения в именованных единицах и приводятся к основной ступени напряжения;

- схемы замещения сворачиваются и находятся эквивалентные сопротивления;
- из схемы замещения прямой последовательности также находится эквивалентная ЭДС;
- определяется ток прямой последовательности

$$I_{1k}^{(n)} = \frac{E_{\Delta}}{X_{1\Delta} + X_{\Delta}^{(n)}},$$

где $X_{\Delta}^{(n)}$ – дополнительное сопротивление, вводимое в схему замещения прямой последовательности, величина которого зависит от вида КЗ и определяется соотношениями из табл.1.1.

- вычисляется ток КЗ

$$I_k^{(n)} = m^{(n)} I_{1k}^{(n)},$$

где $m^{(n)}$ – коэффициент пропорциональности, зависящий от вида КЗ, величина которого приведена в табл. 1.1.

Таблица 1.1 Значения $m^{(n)}$ и $X_{\Delta}^{(n)}$ при различных видах КЗ

Вид КЗ	$k^{(2)}$	$k^{(1)}$	$k^{(1,1)}$
$m^{(n)}$	$\sqrt{3}$	3	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{2\Delta} \cdot X_{0\Delta}}{(X_{2\Delta} + X_{0\Delta})^2}}$
$X_{\Delta}^{(n)}$	$X_{2\Delta}$	$X_{2\Delta} + X_{0\Delta}$	$\frac{X_{2\Delta} \cdot X_{0\Delta}}{X_{2\Delta} + X_{0\Delta}}$

Векторные диаграммы токов и напряжений при двухфазном, однофазном и двухфазном коротком замыкании на землю показаны на рис. 1.2, рис.1.3 и рис.1.4 соответственно.

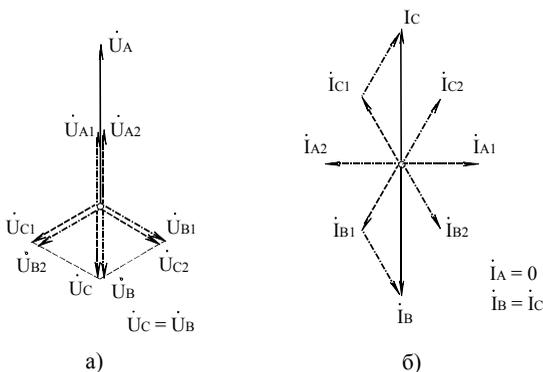


Рисунок 1.2. Векторные диаграммы напряжений (а) и токов (б) при двухфазном КЗ

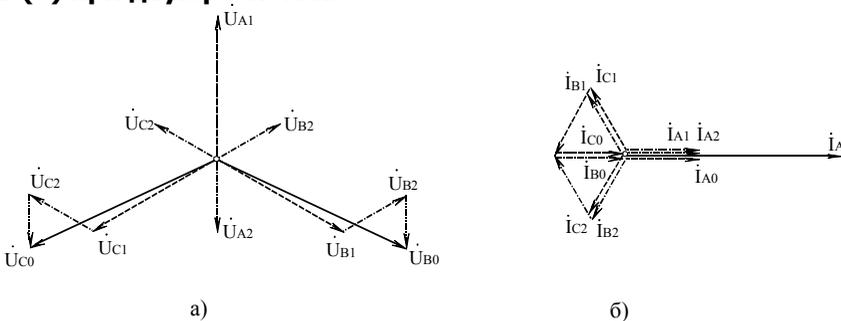


Рисунок 1.3. Векторные диаграммы напряжений (а) и токов (б) при однофазном КЗ

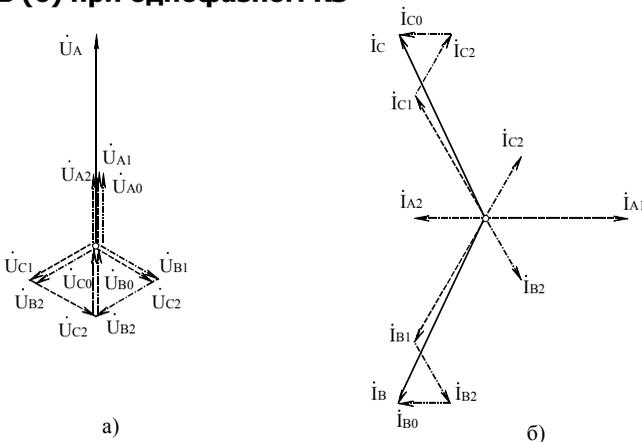


Рисунок 1.4. Векторные диаграммы напряжений (а) и токов (б) при двухфазном КЗ на землю



1.2. Назначение релейной защиты и автоматики

В энергетических системах могут возникать повреждения и аварийные режимы работы электрооборудования электростанций и подстанций, распределительных устройств, ЛЭП и электроустановок потребителей электрической энергии. Повреждения в большинстве случаев сопровождаются значительным увеличением тока и глубоким понижением напряжения в элементах энергосистемы. Повышенный ток выделяет большое количество тепла, вызывающее разрушения в месте повреждения и опасный нагрев неповреждённых ЛЭП и оборудования. Понижение напряжения нарушает нормальную работу потребителей электроэнергии и устойчивость параллельной работы генераторов и энергосистемы в целом. Аварийные режимы обычно приводят к отклонению величин напряжения, тока и частоты от допустимых значений. При понижении частоты и напряжения, создаётся опасность нарушения нормальной работы потребителей и устойчивости энергосистемы, а повышение напряжения и тока угрожает повреждению оборудования и ЛЭП.

В результате повреждения нарушают работу энергосистемы и потребителей электроэнергии, а аварийные режимы создают возможность возникновения повреждений или расстройства работы энергосистемы.

Для обеспечения нормальной работы энергетической системы и потребителей электроэнергии необходимо как можно быстрее выявлять и отделять место повреждения от неповреждённой сети, восстанавливая, таким образом, нормальные условия их работы и прекращая разрушения в месте повреждения.

Для предотвращения опасных последствий ненормальных режимов, необходимо своевременно обнаружить отклонение от нормального режима и принять меры к его устранению (например, понизить напряжения при его возрастании или снизить ток при его увеличении и т.д.). В связи с этим возникает необходимость в создании и применении автоматических устройств, выполняющих указанные операции и защищающие систему и её элементы от опасных последствий повреждений и аварийных режимов. В качестве таких автоматических устройств используют защитные устройства, выполняемые при помощи специальных автоматов–реле. Совокупность таких автоматических устройств, работающих в энергосистеме, называется релейной защитой. Релейная защита является основным видом электрической автоматики, без которой невозможна нормальная и надёжная работа



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

современных энергетических систем.

Основным назначением релейной защиты является выявление места возникновения короткого замыкания и быстрое автоматическое отключение повреждённого элемента сети – это защита, действующая на отключение.

При возникновении нарушения нормальных режимов работы (перегрузка, замыкание на землю одной фазы в сети с изолированной нейтралью, понижение уровня масла в трансформаторе и др.), когда эти явления не представляют непосредственной опасности для электрооборудования, достаточно дать предупредительный сигнал оперативному персоналу – это защита, действующая на сигнал.

Таким образом, исходя из назначения и функций, выполняемых релейной защитой, следует, что аппараты релейной защиты монтируются в «цепях вторичной коммутации», т.е. в слаботочных электрических цепях, предназначенных для управления и контроля режимов работы силовых цепей и систем электропитания.

В современных электрических системах релейная защита тесно связана с электрической автоматикой, предназначенной для быстрого автоматического восстановления нормального режима и питания потребителей. Основу такой автоматики составляют следующие устройства: автоматическое повторное включение (АПВ); автоматическое включение резервных источников питания и оборудования (АВР); автоматическая частотная разгрузка (АЧР); автоматическое регулирование возбуждения генераторов (АРВ) и т.д.

Рассмотрим основные виды повреждений и аварийных режимов.

Повреждения в электроустановках. Наиболее опасными и частыми видами повреждений являются короткие замыкания между фазами электрической установки и кз фаз на землю. В обмотках электрических машин и трансформаторов, кроме перечисленных КЗ бывают замыкания между витками одной фазы (межвитковые замыкания). При кз в сетях с глухозаземлённой нейтралью возрастает ток, и происходит снижение напряжения в сети, это приводит к ряду опасных последствий:

- ток кз в месте повреждения производит большие разрушения (вследствие теплового воздействия), а, проходя по неповреждённым участкам ЛЭП и оборудования вызывает их нагрев выше допустимого значения;



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

- ток КЗ, проходя по неповреждённым элементам энергосистемы, может вызвать механические разрушения токоведущих частей и электрооборудования;
- понижение напряжения, приводит к уменьшению момента вращения электродвигателей (а в ряде случаев и их остановку), также нарушается нормальная работа осветительных установок;
- снижение напряжения сопровождается нарушением устойчивости параллельной работы генераторов.

Замыкания на землю одной фазы в сети с изолированной нейтралью не приводит к КЗ, так как возникающий при этом ток в месте повреждения замыкается через ёмкость проводов относительно земли и имеет, как правило, небольшую величину, при этом линейные напряжения остаются неизменными. Однако возможно нарушение изоляции относительно земли двух неповреждённых фаз и перехода однофазного замыкания на землю в междуфазное КЗ.

Последствия аварийных режимов. протекание сверхтоков, вызванных перегрузкой оборудования или внешним КЗ, при этом по неповреждённому оборудованию протекают токи, превышающие номинальное значение, допустимое время прохождения повышенных токов, зависит от их величины, в том случае, если время прохождения сверхтоков превышает допустимое значение то, это приводит к старению изоляции и выходу оборудования из строя.

1.3. Основные свойства систем релейной защиты

Основными свойствами устройств релейной защиты принято считать: чувствительность, селективность, быстродействие и надёжность.

Чувствительность. Одной из основных задач релейной защиты является выявление повреждений, обусловленных КЗ и аномальными режимами, в элементах энергосистем, и выдача команд и сигналов, способствующих восстановлению электропитания.

Предположим, что в электрической сети, показанной на рис.1.5, на линии $W1$ в точке K_1 происходит КЗ. При этом токи КЗ протекают не только по линии $W1$, но и по другим элементам энергосистемы. Одной из основных задач релейной защиты (за-



щит $S1-S11$) является формирование сигнала (для коммутационной аппаратуры) на отключение повреждённого элемента (линии), что обеспечивает как сохранность элементов энергосистемы, так и быстрое восстановление электроснабжения.

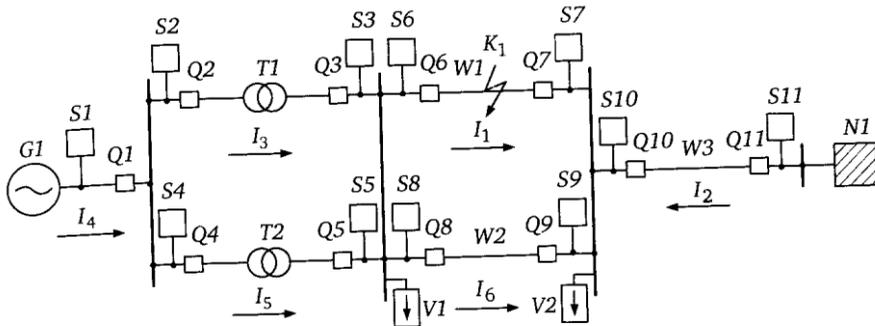


Рисунок 1.5. Схема участка энергосистемы с КЗ на линии $W1$

В данном случае это обеспечивается отключением повреждённой линии выключателями $Q6$ и $Q7$, на которые подаются командные импульсы от защит $S6$ и $S7$. При этом место КЗ изолируется от источников напряжения (генератор $G1$ и эквивалентная система $N1$), и тем самым прекращается протекание токов КЗ по повреждённым и ряду неповреждённых элементов сети.

Чувствительность – это свойство релейной защиты выявлять всевозможные повреждения на защищаемом участке и выдавать команду на их отключение соответствующей коммутационной аппаратуре, таким образом, чтобы сохранялась работоспособность как отключённых, так и оставшихся в работе элементов энергосистемы.

Чувствительность защиты оценивается коэффициентом чувствительности $k_{\text{ч}}$, например, для токовых защит

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{кзmin}}}{I_{\text{сз}}},$$

где $I_{\text{кзmin}}$ – минимальное значение тока в защите при



$K3, I_{сз}$ – ток срабатывания защиты.

Селективность. Селективность (или избирательность) это свойство релейной защиты формировать команды отключения только повреждённого элемента или минимального числа элементов электрической сети вблизи места повреждения, с тем, чтобы свести к минимуму недоотпуск энергии потребителям.

Так, селективность релейной защиты для электрической сети на рис.1.5 означает, что устройства защиты $S6$ и $S7$ должны при $K3$ в точке K_1 сформировать команды на выключатели $Q6$ и $Q7$ раньше, чем устройства защиты $S1 - S5$ и $S8 - S11$, которые также измеряют ток $K3$. Только при этих условиях в данной электрической сети с двухсторонним питанием электрообеспечение потребителей $V1$ и $V2$ будет сохранено. Обеспечение селективности является достаточно сложной задачей потому, что токи $K3$ протекают как по повреждённым, так и неповреждённым элементам.

По способу обеспечения селективности устройства релейной защиты подразделяются на две группы: с относительной селективностью и с абсолютной селективностью.

Селективность защит первой группы обеспечивается выбором значений параметров срабатывания (уставок) защиты, а селективность защит второй группы обеспечивается принципом их действия, т.е. защиты с абсолютной селективностью по принципу своего действия не реагируют на внешние по отношению к защищаемому объекту $K3$. К защитам с относительной селективностью относятся, в основном, токовые и дистанционные защиты, а к защитам абсолютной селективностью продольные и поперечные дифференциальные защиты, направленные защиты с высокочастотной блокировкой, дифференциально-фазные защиты, а также защиты, реагирующие на неэлектрические параметры (газовая защита трансформатора).

Быстродействие. Быстрое отключение коротких замыканий позволяет уменьшить размер повреждения оборудования за счёт термического и динамического действия токов, снизить влияние понижения напряжения на работу потребителей, повысить вероятность сохранения устойчивости параллельной работы энергосистемы. Защита считается быстродействующей при времени её срабатывания до 0,1сек.

Надёжность. Защита должна обладать аппаратной и



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

функциональной надёжностью. Аппаратная надёжность обеспечивается надёжностью её отдельных компонентов, грамотными схемными реализациями и условиями эксплуатации. Чем проще устройство, тем при прочих равных условиях, выше его аппаратная надёжность. Поскольку в процессе эксплуатации аппаратная надёжность снижается, большое значение имеют периодические проверки, выявляющие неисправные элементы. Функциональная надёжность достигается за счёт совершенства алгоритма функционирования защиты. Различают надёжность срабатывания и надёжность несрабатывания защиты, причём в общем случае требования к ним могут быть неодинаковыми вследствие возможных разных последствий от излишнего срабатывания или от отказа в срабатывании.

1.4. Структурная схема устройств релейной защиты

Каждое устройство релейной защиты должно обнаружить повреждение в любом элементе энергосистемы и сформировать команду на отключение соответствующего выключателя (выключателей). Устройство релейной защиты содержит, как правило, три составные части: измерительную, логическую и исполнительную (рис. 1.6). Кроме того, в устройство защиты также входят сигнальные органы, обеспечивающие необходимый объём информации о действии защиты и её отдельных элементов для последующего анализа.

Назначением измерительной части защиты является сравнение текущих значений параметров режима защищаемого объекта с заданными значениями, при которых защита должна срабатывать, т.е. с уставкой.

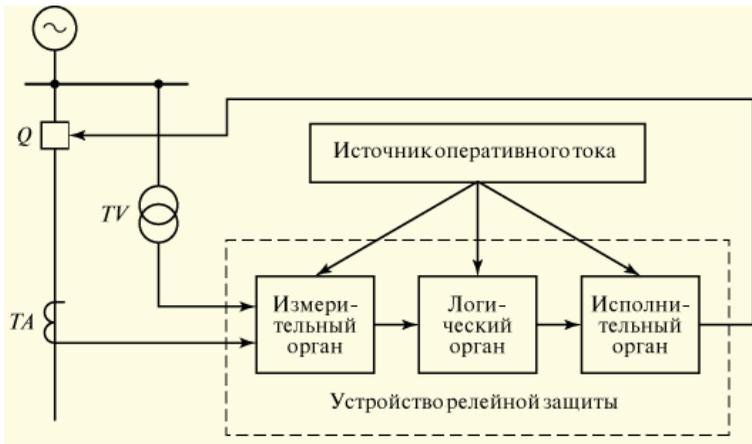


Рисунок 1.6. Структурная схема релейной защиты

В зависимости от вида РЗ такими параметрами могут быть ток, напряжение, направление мощности, отношение напряжения к току, т.е. сопротивление, и др. Если защита должна срабатывать при значениях параметра режима больших уставки, она называется максимальной, а если при значениях параметра меньших уставки – минимальной.

При КЗ на защищаемом объекте ток увеличивается, напряжение снижается, изменяется фазовый сдвиг между током и напряжением, нарушается симметрия токов и напряжений. Эту информацию измерительная часть защиты получает от измерительных преобразователей (трансформатора тока TA и трансформатора напряжения TV), изолирующих устройство релейной защиты от высокого напряжения на защищаемом объекте.

Измерительная часть защиты обрабатывает входную информацию. В том случае, когда контролируемые параметры выходят за установленные пределы, пусковые органы измерительной части защиты выдают сигналы в логическую часть, реализующую логику действия защиты. В зависимости от вида релейной защиты она должна при срабатывании одного или при одновременном срабатывании нескольких пусковых органов измерительной части выдавать сигнал на отключение защищаемого объекта от энергосистемы без выдержки или с выдержкой времени.

Сигнал на отключение объекта от энергосистемы поступает в исполнительную часть защиты, формирующую управляющее воздействие на выключатель (или выключатели) Q , отключающий поврежденный объект от источников питания.



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

Помимо отключения объекта от источников питания при возникновении на нём КЗ на релейную защиту возлагаются также функции защиты объекта от ненормальных режимов работы, чаще всего от его перегрузки током внешнего короткого замыкания и от недопустимой перегрузки рабочим током. Практически на всех объектах энергосистемы (генераторах, трансформаторах, линиях электропередачи, сборных шинах и др.) устанавливаются, как правило, не одно, а несколько устройств релейной защиты, обеспечивающих защиту объекта от междуфазных коротких замыканий, от коротких замыканий на землю, а также от ненормальных режимов работы.

Измерительные трансформаторы тока и трансформаторы напряжения, от которых устройство релейной защиты получает информацию о параметрах режима защищаемого объекта, должны иметь погрешность преобразования значений тока и напряжения защищаемого объекта в их вторичные значения, поступающие в измерительную часть защиты, не превышающую в условиях срабатывания защиты 10 %.

Логическая и исполнительная части релейной защиты требуют для своего функционирования специальный источник питания – источник оперативного тока. Измерительная часть защиты, если она выполнена на интегральных микросхемах или с использованием микропроцессоров, также требует питания от источника оперативного тока. К источникам оперативного тока предъявляются в основном три требования: автономность, т.е. независимость от режима работы защищаемого объекта; надёжность, т.е. безотказность в работе; мощность достаточная как для питания устройства релейной защиты, так и для отключения выключателя (или выключателей) защищаемого объекта.

В распределительных электрических сетях и системах электроснабжения, имеющих, как правило, значительное число электрических подстанций без постоянного обслуживающего персонала, в качестве источников оперативного тока используются трансформаторы тока, трансформаторы напряжения, трансформаторы собственных нужд и предварительно заряженные конденсаторные батареи. На электрических станциях и крупных подстанциях источниками оперативного тока являются аккумуляторные батареи, работающие в режиме постоянного подзаряда.

Совершенно очевидно, что не все устройства защиты в полном объёме соответствуют приведенной структурной схеме и содержат три типа органов. Во многих случаях отдельные функции могут совмещаться в одном органе, а некоторые из них могут



вообще отсутствовать.

Например, реле прямого действия, встраиваемые в привод выключателя, выполняют одновременно функции измерительно-го, логического, исполнительного, а в некоторых случаях и сигнального органа, а плавкие предохранители, кроме того, и функции коммутирующего аппарата.

1.5. Развитие техники релейной защиты

В электрической системе короткие замыкания в большинстве случаев сопровождаются увеличением тока. Поэтому первыми появились максимальные токовые защиты, действующие в тех случаях, когда ток в защищаемом элементе превышает заранее установленное значение. Токовые защиты могут выполняться посредством плавких предохранителей или реле. Плавкие предохранители использовались для защиты первых электроэнергетических установок ещё в конце 19 века. В скором времени они в ряде случаев перестали удовлетворять своему назначению и стали заменяться электромагнитными реле тока. Однако конструкции плавких предохранителей постоянно совершенствуются, и они продолжают с успехом использоваться не только в системах напряжением ниже 1000 В, но также и в распределительных сетях более высоких напряжений.

Одни из первых устройств релейной защиты были применены в 1891 году на первой промышленной воздушной линии трёхфазного переменного тока 28,3 кВ от ГЭС Лауфен до г. Франкфурт–на–Майне (Германия) протяжённостью 170 км. Электростанция, линия электропередачи, электроподстанция и устройства релейной защиты были спроектированы под руководством инженеров М. О. Доливо–Добровольского и Ч. Брауна.

Широкое применение для защиты реле получают в начале 20 столетия. В 1901 году разрабатываются индукционные реле, построенные на базе индукционных измерительных механизмов. В 1905–1908 годах разрабатываются дифференциальные токовые защиты. С 1910 года начинают применяться токовые направленные защиты; к этому же времени относятся попытки выполнения дистанционных реле (реле сопротивления), завершившиеся выпуском в начале 20–х годов дистанционных защит.

К 20–м годам относится также выпуск первых обобщающих публикаций по релейной защите, выполненной на электро-механической элементной базе (Р. Рюденберг, Г. Нейгебауер).

В 1923–1928 годах делаются первые попытки использования электронной элементной базы для целей релейной защиты. В



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

1932 году появилась работа французского электротехника Фалло по распространению высокочастотной энергии по линиям электропередачи и описанию защиты с наложенными на линию токами высокой частоты. В 1934 году были опубликованы результаты разработок на электронных лампах реле различного назначения (R. Widerol).

В эти же годы в СССР была разработана на электронных лампах дистанционная защита. Однако в дальнейшем электронные лампы получили распространение только в ламповых приёмопередатчиках в каналах для передачи высокочастотных сигналов по проводам защищаемых линий для осуществления их быстродействующих защит.

Более перспективным оказалось применение полупроводников, начатое также ещё в 30-е годы для выполнения реле, работающих на выпрямленных токах. Дальнейшее развитие этого направления получило в конце 40-х годов, когда стало возможным применение германиевых и кремниевых диодов, а также транзисторов.

В последующие годы в СССР и за рубежом разрабатывались и изготавливались на полупроводниках как отдельные бесконтактные реле и устройства, так и защиты в целом. Однако надежды, возлагавшиеся на полупроводниковые защиты по потребляемым мощностям и связанными с ними чувствительностями, оправдались не в полной мере. Выявилась также их относительно невысокая надёжность, обусловленная наличием весьма большого количества внешних соединений между отдельными функциональными элементами реле и защит в целом.

Положение с применением для защит полупроводниковой элементной базы существенно изменилось в 60-е годы после разработки интегральной микроэлектроники с всё возрастающей степенью интеграции, когда в одном кристалле удаётся «упаковать» очень большое количество микроэлементов (резисторов, конденсаторов, транзисторов и т.п.). Поэтому в СССР и за рубежом было разработано достаточно большое количество защит на микроэлектронной базе, обладающие высокой надёжностью и потребляющие небольшие мощности от первичных измерительных преобразователей тока и напряжения.

В последнее время широко используются устройства релейной защиты на микропроцессорной элементной базе. В этом случае защита строится не с помощью отдельных реле, а в виде программ «зашиваемых» в микропроцессорные системы.

Принципиально представлялось бы целесообразным такое



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

выполнение защит от повреждений, при котором они могли бы не только фиксировать произошедшее повреждение, но и выявлять намечающееся. Практически в большинстве случаев выполнять такие защиты затруднительно или даже невозможно; но к этому, однако, необходимо стремиться. В отдельных случаях иногда получают положительные результаты. Если такие защиты будут созданы, то станет необходимым изменить редакцию ПУЭ, так как в существующем – срабатывание защиты, ещё при отсутствии повреждения, классифицируется как излишнее срабатывание, и трудно будет доказать, что повреждение произошло бы.

Обычно для действия защит используют токи и напряжения промышленной частоты защищаемых объектов. Иногда, однако, оказывается целесообразным применять электрические величины волновых процессов, колебательные и апериодические слагающие переходного процесса, а также наложенные токи высокой частоты и наложенный постоянный ток. В некоторых случаях используются и неэлектрические величины, например, излучение электрической дуги в замкнутом объёме, газ, выделяющийся из масла при повреждениях в трансформаторе и т.п.

Основными научно-исследовательскими центрами по релейной защите в 30-е годы были: лаборатория высоких напряжений им. А.А. Смурова, отдел релейной защиты института Теплоэлектропроект (ТЭП), Харьковский электромеханический завод (ХЭМЗ), Государственный трест по организации и рационализации районных электростанций и сетей (ОРГРЭС) и крупнейшие энергетические системы – Мосэнерго, Ленэнерго, Уралэнерго и другие. Начали активно включаться в работу и кафедры ВУЗов – Томского политехнического института (ТПИ), Новочеркасского политехнического института (НПИ), Ленинградского электротехнического института (ЛЭТИ), Ленинградского политехнического института (ЛПИ), Московского энергетического института (МЭИ) и др.

Лабораторией им. А.А. Смурова под руководством В.И. Иванова и П.И. Рыжова проводились разработки защит генераторов и «высокочастотных» защит линий высокого напряжения.

Большая работа по созданию схем защит и разработки методов расчёта их параметров срабатывания, а также по их типизации проводилась в ТЭПе, где под руководством Л.Е. Соловьёва начался выпуск «Руководящих указаний по релейной защите» (РУ). После Л.Е. Соловьёва эта работа в течение многих лет выполнялась под руководством А.Б. Чернина. В предвоенные и первые послевоенные годы (до выпуска ПУЭ издания 1950 года) РУ имели характер основных директивных материалов. В настоящее



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

время при наличии ПУЭ раздел III РУ являются рекомендуемым материалом Министерства энергетики.

Электроцехом ОРГРЭС, созданным в 1933 году, разрабатывались методы испытаний реле и защит, осуществлялись наладка и включение в работу релейных защит на новых электростанциях. Большое значение имели при этом работы И.А. Сыромятникова по режимам работы двигателей и их защиты, давшие возможность коренным образом повысить надёжность работы собственных нужд электростанций и потребителей.

На ХЭМЗ под руководством Ф.А. Ступеля осваивается конструирование и производство многочисленных новых типов реле и защит.

В этот период написаны многие оригинальные обобщающие труды советских авторов по вопросам релейной защиты – это книги В.И. Иванова, Ф.А. Ступеля, Н.Н. Щедрина, Н.Ф. Марголина.

Послевоенные годы характеризуются дальнейшим быстрым развитием техники релейной защиты, ставшим возможным благодаря как вновь созданных (Чебоксарский электроаппаратный завод (ЧЭАЗ), Всесоюзный научно-исследовательский институт релестроения (ВНИИР), Всесоюзный научно-исследовательский институт электроэнергетики (ВНИИЭ)), так и работавшие в этом направлении ранее (Техуправление Минэнерго, ТЭП, институт электродинамики АН УССР, энергетические системы – Мосэнерго, Ленэнерго, Челябинэнерго, Днепроэнерго и другие, и высшие учебные заведения – НПИ, Рижский политехнический институт, МЭИ, Уральский политехнический институт (УПИ), ЛПИ, ТПИ и др.).

Серьёзной проблемой для советских релейщиков явилось в тот период создание новых защит для сооружавшихся электропередач 400 – 500 кВ. С этой проблемой они успешно справились. Особенно в решение этой проблемы следует отметить роль ТЭП (В.М. Ермоленко, С.Я. Петров и др.), ВНИИЭ (Е.Д. Сапир, М.И. Царёв и др.), ЧЭАЗ (А.В. Буйлов, А.М. Бреслер, Г.Ф. Эдельштейн и др.) и служб эксплуатации (Н.В. Чернобровов и др.).

К этому периоду относятся также опубликование ряда обобщающих трудов Г.И. Атабекова, В.Л. Фабриканта, А.Б. Чернина и др. Г.И. Атабеков был одним из первых, кто добился внедрения полупроводников в отечественную технику релейной защиты.

В наступивший период значительно возросла по сравнению с довоенным уровнем роль коллективов высших учебных заведений в разработке систем релейной защиты.

Так, например, в НПИ под руководством профессора А.Д.



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

Дроздова образовался сильный коллектив (А.С. Засыпкин, С.Л. Кужеков, В.В. Михайлов, В.В. Платонов, Э.В. Подгорный и др.), разработавший вопросы создания устройств защиты на базе теории цепей с ферромагнитными сердечниками (реле РНТ–565, ДЗТ–11 и др., которые уже более 50 лет выпускаются на заводе ЧЭАЗ), исследовавший работу электромагнитных трансформаторов тока и напряжения в переходных режимах, поведение защит при бросках тока намагничивания силовых трансформаторов и др.

В РПИ В.Л. Фабрикант создал общую теорию построения измерительных органов релейной защиты на электромеханической элементной базе, а затем – на полупроводниковой. В.Л. Фабрикантом создана также общая теория построения пассивных фильтров симметричных составляющих.

В УПИ под руководством В.Е. Полякова проводились исследования и разработки по применению аппарата математической логики в технике релейной защиты.

На кафедре РЗиА энергетических систем МЭИ разрабатывались вопросы защиты линий электропередачи постоянного тока высокого и сверхвысокого напряжений (под руководством В.М. Маранчака), защиты линий переменного тока высокого и сверхвысокого напряжений (В.Г. Дорогунцев), применение полупроводниковой и микропроцессорной элементной базы в релейной защите (Н.И. Овчаренко).

В ЛПИ под руководством Г.М. Павлова и В.К. Ванина проведены работы по использованию для защиты элементов аналоговой вычислительной техники, в том числе операционных усилителей.

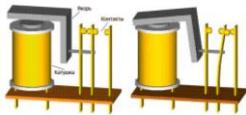
В заключении необходимо отметить огромный вклад в разработку техники релейной защиты и автоматизации энергосистем в СССР, сделанный профессором, доктором технических наук Алексеем Михайловичем Федосеевым. Профессор Федосеев А.М. является основателем школы релейной защиты в нашей стране. Он внёс также значительный вклад в развитие моделирования энергосистем, создание и внедрение комплексной защиты и автоматики дальних электропередач сверхвысокого напряжения. На его учебниках выросло не одно поколение релейщиков в нашей стране.

Под руководством Федосеева А.М. разработано большое количество оригинальных проектов в области релейной защиты и автоматики, в частности, уникальные проекты дальних электропередач 400–500–750 кВ, в которых был обобщён огромный опыт проектирования, эксплуатации и релестроения в нашей стране.



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Повреждения и ненормальные режимы работы электрооборудования электроэнергетических систем.
2. Причины и виды повреждений в энергетических системах.
3. Расчёт токов короткого замыкания при трёхфазных повреждениях.
4. Расчёт токов короткого замыкания при несимметричных повреждениях.
5. Векторные диаграммы токов и напряжений при трёхфазном КЗ.
6. Векторные диаграммы токов и напряжений при двухфазном КЗ.
7. Векторные диаграммы токов и напряжений при однофазном КЗ.
8. Векторные диаграммы токов и напряжений при двухфазном КЗ на землю.
9. Назначение релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем.
10. Основные требования, предъявляемые к устройствам релейной защиты от повреждений.
11. Особенности выполнения релейной защиты от ненормальных режимов.
12. Основные и резервные устройства релейной защиты.
13. Классификация устройств релейной защиты по способу обеспечения селективности.
14. Классификация устройств релейной защиты по принципу действия измерительных органов.
15. Структурные части устройства релейной защиты: измерительная, логическая и исполнительная.
16. Назначение и виды источников оперативного тока.
17. Требования, предъявляемые к источникам оперативного тока.
18. Какие защиты называются максимальными, какие – минимальными?
19. Развитие техники релейной защиты.



Первое реле было изобретено [Джозефом Генри](#) в 1831 г. на электромагнитном принципе действия

2. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ РЕЛЕ

2.1 Общие сведения

Название «релейная защита» появилось в ряде стран в связи с тем, что рассматриваемый вид противоаварийной автоматики начал внедряться с использованием электромеханических аппаратов, названных реле. В дальнейшем этот термин получил всеобщее признание и был узаконен в Международном электротехническом словаре, сыгравшим большую роль в становлении отечественной терминологии.

В соответствии с ГОСТ наименование «реле» присвоено большой группе автоматических приборов управления, обладающих релейным действием, то есть обладающих релейной характеристикой срабатывания (рис.2.1), под которым понимается скачкообразное изменение состояния управляемой цепи (например, её замыкание или размыкание), при заданных значениях величин, характеризующих определённое отклонение режима контролируемого объекта.

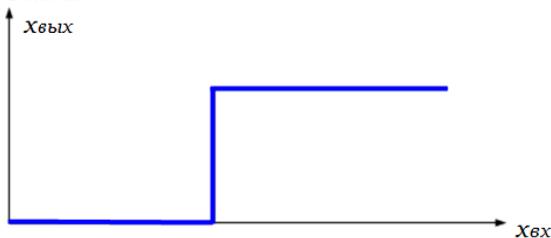


Рисунок 2.1. Релейная характеристика срабатывания:

$X_{вх}$ – входная величина; $X_{вых}$ – выходная величина

В устройствах релейной защиты применяются электрические, механические и тепловые реле.

Электрические реле реагируют на электрические величины: ток, напряжение, мощность, частоту, сопротивление, угол между током и напряжением или двумя токами, или двумя напря-



жениями.

Механические реле реагируют на неэлектрические величины: давление, скорость истечения жидкости или газа, частоту вращения, уровень жидкости и т.д.

Тепловые реле реагируют на количество выделенного тепла или изменении температуры.

Наибольшее распространение получили электрические реле, которые выполняются на электромеханической, полупроводниковой и микропроцессорной элементной базе.

В соответствии с ГОСТ электрические реле имеют пять основных функциональных частей: воспринимающую, преобразующую, сравнивающую, исполнительную и замедляющую. В реле, реагирующих более чем на одну величину, может иметься несколько однотипных частей.

Реле делятся на максимальные и минимальные – срабатывающие при увеличении или соответственно уменьшении воздействующей величины.

2.2. Реле тока

Реле тока предназначено для контроля величины тока в цепи – реле срабатывает, если величина тока превышает заданное значение.

Электромеханическая элементная база. Электромеханическая элементная база может использоваться для всех функциональных частей и органов защиты в виде электромеханических реле. Электромеханическими называются реле, работа которых основана использовании относительного перемещения механических элементов под действием электромагнитной энергии протекающего тока.

Преобразование аналоговых входных сигналов в дискретные сигналы на выходе в электромеханических реле осуществляется при помощи контакта (контактов). Электромеханическое реле может совмещать функции, как измерительного органа, так и логического.

В электромеханических реле электромагнитная энергия поля преобразуется в механическую энергию перемещения подвижной части. Часто используется её угловое перемещение α ; поэтому часто удобнее использовать понятие вращающего момента, а не силы. Общее выражение вращающего электромагнитного

$M_{эм,t}$ (мгновенное значение) можно получить из уравнений Лагранжа, являющихся уравнениями динамики системы



$$M_{эм.т} = \frac{dW_{эм.т}}{d\alpha},$$

(2.1)

где $W_{эм.т}$ – электромагнитная энергия поля для момента времени.

Это уравнение характеризует изменение электромагнитной энергии $W_{эм.т}$ при повороте подвижной части реле, и является его основной характеристикой. Практически в работе всех реле используется только изменение магнитной составляющей энергии электромагнитного поля.

Магнитная энергия поля реле может быть представлена в следующем виде:

$$W_{эм.т} = 0,5 \sum_{p=1}^n L_p i_p^2 + \sum_{h=1}^{n-1} \sum_{k=p+1}^n M_{p,k} i_p i_k,$$

(2.2)

где i_k, i_p – токи в контурах и устройства; L_p и $M_{p,k}$ – коэффициенты самоиндукции и взаимной индукции контуров тока соответственно.

Промышленность стремится использовать одни и те же магнитные системы с разными характеристиками. Поэтому большое внимание обращается на принципы размещения обмоток на данных магнитных системах. Первая отечественная работа в этом направлении была опубликована А.Д. Дроздовым в 1937 году. Исчерпывающие исследования были выполнены в 40–50-е годы В.Л. Фабрикантом. Для реализации электромеханических реле преимущественно используются электромагнитные и индукционные системы.

Электромагнитные реле тока. Электромагнитными называются реле, работа которых основана на воздействии магнитных полей неподвижных обмоток на подвижный ферромагнитный элемент (якорь). Вращающий момент $M_{эм.т}$ определяется первым членом выражения (2.2), так как его второй член в данном случае равно нулю.

Энергия магнитного поля измерительного реле тока с одной обмоткой и током в ней i_p в соответствии с (2.2)



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

$W_{эм.т} = 0,5i_p^2 L$. Ток i_p , поступающий от трансформатора тока, являющегося источником тока (и энергии), практически не зависит от параметров электромагнита и положения якоря, характеризующегося углом его поворота α . Поэтому при повороте якоря изменяется только коэффициент самоиндукции L , и с учётом (2.1)

$$M_{эм.т} = \frac{\partial W_{эм.т}}{\partial \alpha} = 0,5i_p^2 \frac{dL}{d\alpha}. \quad (2.3)$$

Из (2.3) следует, что направление $M_{эм.т}$ не зависит от знака тока i_p . Поэтому электромагнитные системы могут использоваться, как на переменном, так и на постоянном токе.

Значение $M_{эм.т}$ при синусоидальном токе i_p равно

$$M_{эм.т} = 0,5I_{m,p}^2 \sin^2 \omega t \frac{dL}{d\alpha} = k_1 I_p^2 \frac{dL}{d\alpha} - k_1 I_p^2 \cos 2\omega t \frac{dL}{d\alpha} \quad (2.4)$$

Первый член выражения (2.4) не зависит от времени и даёт среднее за период значение $M_{эм}$; второй член представляет собой гармоническую слагающую удвоенной частоты. В результате на якорь реле переменного тока действует момент $M_{эм.т}$, изменяющийся во времени от нулевого до максимального значения с удвоенной частотой. С учётом инерциальности системы среднее значение момента можно найти из выражения $M_{эм.т} = k_1 I_p^2 \frac{dL}{d\alpha}$, определяемым действующим значением тока I_p .

Таким образом, $M_{эм}$ создаётся за счёт изменения индуктивности якоря при его движении в направлении срабатывания; при этом уменьшается немагнитный зазор и возрастает L . Значение L пропорционально квадрату числа витков $L = k_L w^2$. Подставляя его в (2.3), с учётом изложенного получаем



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

$$M_{эм} = 0,5 I_p^2 w^2 \frac{dk_L}{d\alpha} = 0,5 F^2 \frac{dk_L}{d\alpha}, \text{ где } F = I_p w \text{ —}$$

МДС. Таким образом, средний электромагнитный момент пропорционален квадрату МДС обмотки.

В реле с электромагнитными системами обычно осуществляется сравнение воздействующего электромагнитного момента с заданным моментом противодействующей пружины.

В моменты времени, когда $M_{эм.t} < M_{мех}$, якорь имеет тенденцию отходить от полюсов и снова возвращаться в моменты, соответствующие $M_{эм.t} > M_{мех}$. С якорем связан подвижный элемент контакта. Поэтому вибрация якоря может приводить к вибрации контакта. Для снижения вибрации принимаются специальные меры.

Конструкция электромагнитного реле тока показана на рис. 2.2, а. Реле представляет стальной сердечник 1, с размещёнными на нём обмотками 2. В зазоре между полюсами электромагнита помещён стальной подвижный якорь 3 с закреплённым на нём контактом 4. В исходном состоянии якорь удерживается за счёт пружины 6 и упора 7. При протекании тока по обмотке реле создаётся электромагнитная сила

$$F_э = k \frac{I_p^2 w^2}{R_m},$$

где k - коэффициент пропорциональности, учитывающий особенности конструктивного выполнения реле тока; I_p - ток в реле; w - число витков обмоток; R_m - сопротивление магнитной цепи.

Реле работает, когда электромагнитная сила $F_э$ преодолевает момент, создаваемый противодействующей пружиной, и контакты 4, 5 замкнутся. Ток, при котором срабатывает реле, называется током срабатывания реле $I_{сп}$. В момент срабатывания $F_э = F_{np}$, тогда

$$I_{cp}^2 = \frac{F_{np} R_M^2}{k W^2}, \text{ откуда } I_{cp} = \frac{R_M}{k_1 W} \sqrt{F_{np}}.$$

Из последнего выражения следует, что величину тока срабатывания реле можно регулировать, меняя сопротивление противодействующей пружины и число витков обмоток реле.

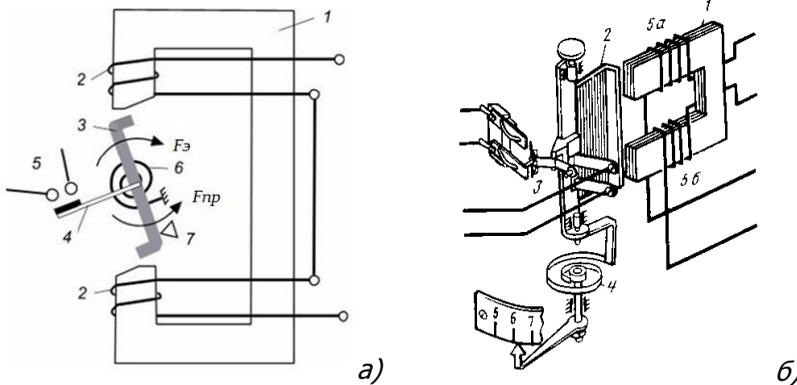


Рисунок 2.2. Общая схема электромагнитного реле (а) и реле РТ-40 (б)

Если после срабатывания реле уменьшать ток в обмотке, то при некотором значении тока, называемом током возврата реле, якорь реле вернётся в исходное состояние. Отношение тока возврата реле $I_{вр}$ к току срабатывания I_{cp} является нормативным параметром и называется коэффициентом возврата реле:

$$k_{в} = \frac{I_{вр}}{I_{cp}}.$$

На электромагнитном принципе работают реле тока типа РТ-40, конструкция которого показана на рис.2.2, б. На якоре 2 электромагнита 1 закреплён подвижный контакт в виде мостика, замыкающего неподвижные контакты при срабатывании реле. Для гашения вибраций контактной системы на якоре укреплен барабанчик, заполненный кварцевым песком. Ток срабатывания регулируется плавно противодействующей пружинкой 4, а также последовательным или параллельным соединением обмоток (5а, 5б) реле. Потребление реле при минимальной уставке для реле разной чувствительности составляет от 0,2 до 8 ВА;



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

$k_g = 0,8 \div 0,85$; время срабатывания $t_{cp} = 0,3$ с, при токе в реле $I_p \geq 3I_{cp}$.

Выпускаемые ЧЭАЗ реле напряжения переменного тока типов РН-53 и РН-54 выполнены конструктивно так же, как и реле РТ-40. Для уменьшения вибрации контактов обмотка реле включается на напряжение через выпрямитель. Обмотка реле напряжения имеет большее число витков с проводом меньшего диаметра и, следовательно, большее активное сопротивление.

Реле максимального напряжения типа РН-53 имеет k_g не ниже 0,8; а реле минимального напряжения РН-54 – не выше 1,25.

Индукционные реле тока. Индукционными называются реле, работа которых основана на взаимодействии переменных магнитных полей неподвижных обмоток с токами, индуктированными этими полями в подвижном неферромагнитном элементе (барабане или диске). Вращающий момент $M_{эм.т}$ определяется вторым членом выражения (2.2), так как индуктивность L при перемещении подвижного элемента не изменяется. Токи, индуктированные в подвижном элементе только одним из потоков, вращающего момента не создают, для его создания в индукционной системе должны участвовать не менее двух потоков, сдвинутых пространственно, т.е. они должны быть сдвинуты по фазе. Индукционная система может работать только при переменных токах.

Энергия магнитного поля и вращающий момент реле тока с двухпоточной четырёхполюсной системой с токами i_1 и i_2 в двух обмотках с учётом того, что поворот барабана не влияет на токи i_1 и i_2 , на основе выражений (2.1) и (2.2) записывается вы-

ражениями $W_{эм.т} = M_{12}i_1 \frac{di_2}{dt} + M_{21}i_2 \frac{di_1}{dt}$ и

$$M_{эм.т} = i_1 \left(\frac{di_2}{dt} \right) \left(\frac{dM_{12}}{d\alpha} \right) + i_2 \left(\frac{di_1}{dt} \right) \left(\frac{dM_{21}}{d\alpha} \right).$$

Поэтому

$$M_{эм.т} = k_1 \left(i_2 \frac{di_1}{dt} - i_1 \frac{di_2}{dt} \right). \quad (2.5)$$



Если токи i_1 и i_2 являются синусоидальными величинами одной частоты с фазным углом γ между ними, то получаем

$$\frac{di_1}{dt} \equiv \frac{d\Phi_{1t}}{dt} = I_{1m} \cos \omega t \quad \text{и}$$

$$\frac{di_2}{dt} \equiv \frac{d\Phi_{2t}}{dt} = I_{2m} \cos(\omega t - \gamma)$$

С учётом этого

$$M_{эм,t} = I_{1m} I_{2m} \sin \gamma \quad (2.6)$$

На основании выражений (2.5) и (2.6) можно сделать вывод, что в отличие от электромагнитной системы индукционная обеспечивает постоянство вращающего момента во времени.

На рис.2.3 показано устройство и внешний вид индукционного реле тока.

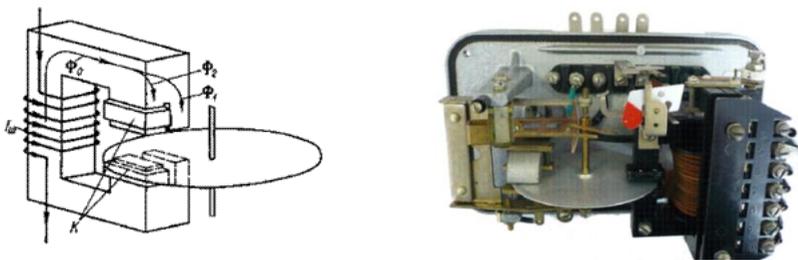


Рисунок 2.3. Устройство и внешний вид индукционного реле тока

Полупроводниковые реле тока. Полупроводниковая элементная база может использоваться для реализации всех функциональных частей и органов защиты. Её внешней отличительной особенностью является отсутствие подвижных элементов и контактов. Поэтому защиты, реализованные на рассматриваемой элементной базе, называются статическими. В настоящее время выпускается большое количество статических реле различных модификаций. Однако принцип их действия практически одинаков и сводится к сравнению подводимого измеряемого сигнала с опорным (рис.2.4).

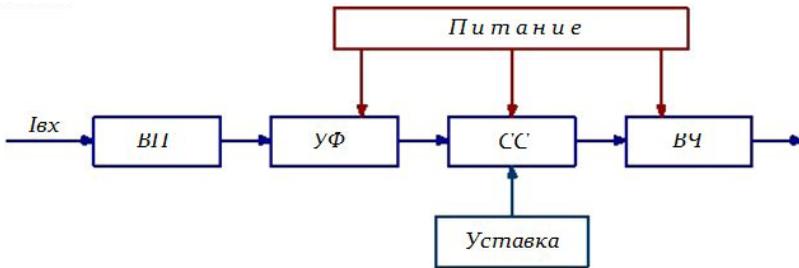


Рисунок 2.4. Структурная схема статического реле защиты

Реле состоит из следующих основных блоков:

1. Входной преобразователь *ВП* содержит измерительный преобразователь, на вход которого подаётся сигнал от трансформаторов тока защищаемого объекта. Измерительные преобразователи представляют собой промежуточные трансформаторы или трансреакторы, которые изменяют величину входного сигнала до значения, определяемого условиями управления операционными усилителями. Одновременно преобразователи отделяют полупроводниковую часть реле от вторичных цепей защищаемого объекта. Наряду с основными функциями они решают задачу защиты реле от высокочастотных наводок.

2. Для получения нужной характеристики реле выходной сигнал, подаваемый с преобразователя, необходимым способом преобразуется в узле формирования *УФ*. Способ и объём такой обработки определяется конкретным типом реле.

3. В схеме сравнения *СС*, сформированные сигналы измерительного тракта сравниваются с опорным напряжением, называемым уставкой срабатывания реле. Для срабатывания реле необходимо, чтобы входной сигнал превысил заданное значение опорного сигнала. В релейной защите в качестве элементов схемы сравнения широко используются компараторы. Напряжение на выходе компаратора находится на одном из двух фиксированных уровней: на верхнем, если напряжение на неинвертирующем входе компаратора больше напряжения на инвертирующем входе; и на нижнем, при противоположных соотношениях напряжений.

Для работы в качестве компаратора часто применяется обычный операционный усилитель. Одна из типовых схем компаратора приведена на рис.2.5.

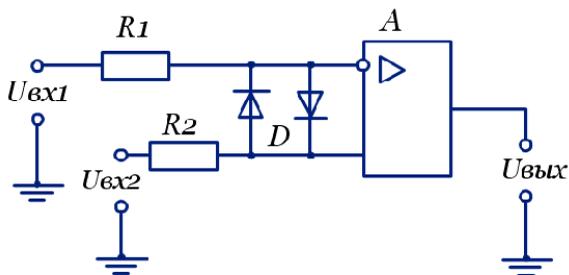


Рисунок 2.5. Схема компаратора для однополярных сигналов

На первый вход подаётся измеряемый сигнал, на второй – опорный. Если измеряемое напряжение меньше опорного, то на выходе схемы держится максимальное выходное напряжение, совпадающее по знаку с опорным. Когда измеряемое напряжение превысит опорное, полярность выходного сигнала меняется на противоположную. Диоды защищают входы операционного усилителя от повышенных значений разности сравниваемых напряжений.

Приведенная схема обладает существенным недостатком, который проявляется в случае примерного равенства сравниваемых напряжений – неустойчивость опрокидывания. Для устранения «дребезга» компаратора широко применяется схема инвертирующего триггера Шмитта (рис.2.6). Триггер Шмитта представляет собой компаратор с одним заземлённым входом, заданным опорным напряжением и положительной обратной связью.

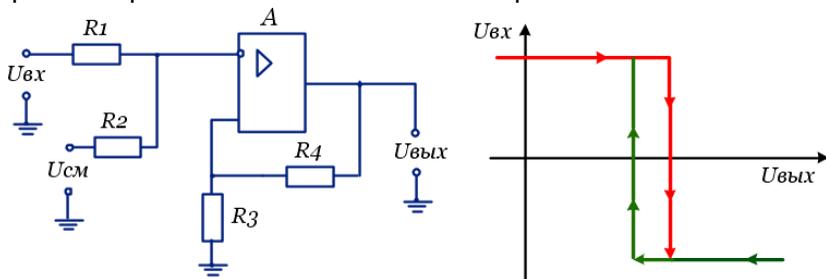


Рисунок 2.6. Схема триггера Шмитта и его передаточная характеристика

4. Выходная часть *ВЧ* выполняется с помощью электромагнитного или герконового реле. Одна из возможных схем выходной части статического реле показана на рис.2.7. На один из концов обмотки реле *K1* подаётся «плюс» оперативного тока 220



В, а другой подключается к коллектору транзистора VT_1 . Транзистор управляется сигналом от схемы сравнения.

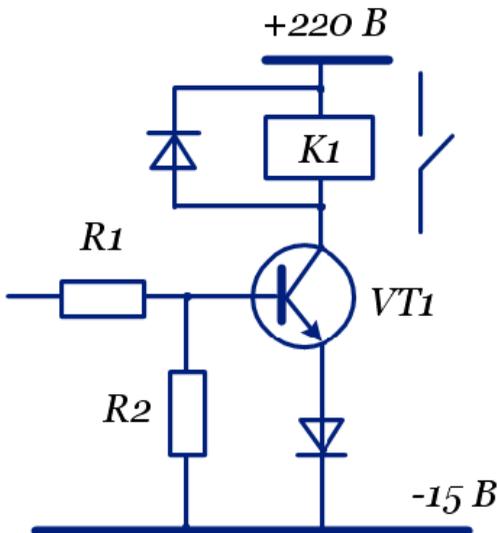


Рисунок 2.7. Схема выходной части статического реле

5. Для питания полупроводниковых элементов на схему реле должно быть подано напряжение ± 15 В. Если источником оперативного питания является аккумуляторная батарея на 220 В, то применяются специальные интегральные микросхемы, или питание осуществляется с помощью схемы, приведенной на рис. 2.8.



A_1 . На неинвертирующий вход компаратора подаётся опорный сигнал с блока задания уставок. Блок задания уставок представляет собой делитель напряжения с переключателями, которыми шунтируются резисторы делителя. При изменении положения переключателей изменяется доля напряжения, подаваемая на вход компаратора. Если значение поступающего сигнала меньше опорного, то конденсатор C заряжен положительным напряжением насыщения усилителя A_1 , примерно на 1–2 В отличающимся от уровня напряжения питания, до напряжения стабилизации стабилитрона VD_3 . На выходе компаратора A_2 напряжение отрицательно, и транзистор VT_1 закрыт.

При увеличении входного сигнала до значения больше опорного напряжения компаратор A_1 меняет свое состояние, конденсатор перезаряжается через сопротивление R_2 , на выходе компаратора A_2 появляется напряжение положительной полярности, транзистор VT_1 открывается и реле срабатывает. Времязадающая цепочка, состоящая из резисторов R_2, R_3 , конденсатора C и стабилитрона VD_3 обеспечивает отстройку реле от помех, приводящих к кратковременному опрокидыванию компаратора A_1 . Положительная обратная связь усилителя A_2 , выполненная на резисторах R_4, R_5 , обеспечивает гистерезис в переходной характеристике для исключения неопределённости момента переключения, т.е. для исключения «дребезга».

По своим техническим данным реле типа РСТ 13 близко к электромагнитным реле. Так, коэффициент возврата превышает 0,9; время срабатывания при токе реле $1,2 I_{cp}$ не более 60 мс; при токе $3 I_{cp}$ – не более 35 мс.

Микропроцессорные реле тока. Цифровое реле тока имеет много общего с цифровыми реле различного назначения и его можно представить в виде, показанном на рис.2.10.



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

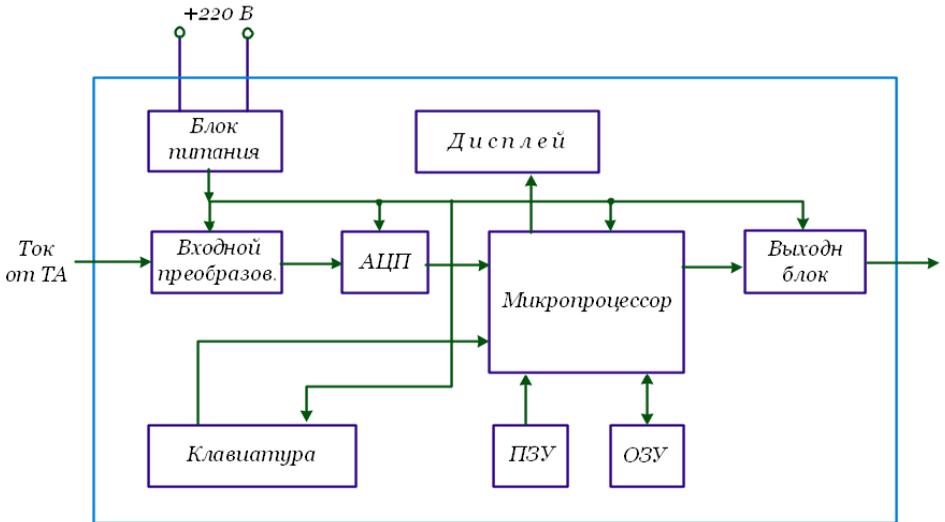


Рисунок 2.10. Структурная схема цифрового реле

тока

Общими для всех цифровых реле являются входные преобразователи – аналого–цифровые преобразователи (АЦП), один или несколько микропроцессоров для обработки поступившей информации, клавиатура, дисплей, блок питания и выходной блок.

Входные преобразователи обеспечивают гальваническую развязку схемы реле от внешних цепей, нормируют входной сигнал и выполняют его предварительную фильтрацию.

Аналого–цифровой преобразователь выполняет преобразование мгновенного значения входного сигнала в пропорциональное ему цифровое значение (цифру). Процесс перехода от аналогового сигнала к дискретному называется квантованием сигнала (рис.2.11).

Квантование сигнала всегда происходит с некоторой потерей информации из-за того, что для точного восстановления первоначального сигнала из его дискретного представления частота выборок должна, по крайней мере, вдвое превышать самую высокочастотную гармоническую составляющую входного сигнала (теорема отсчётов) и, соответственно, из входного сигнала должны быть исключены все гармоники с частотой, более высокой, чем частота квантования. В устройствах релейной защиты и автоматики применяют АЦП с частотой выборок от 600 до 2000 Гц.

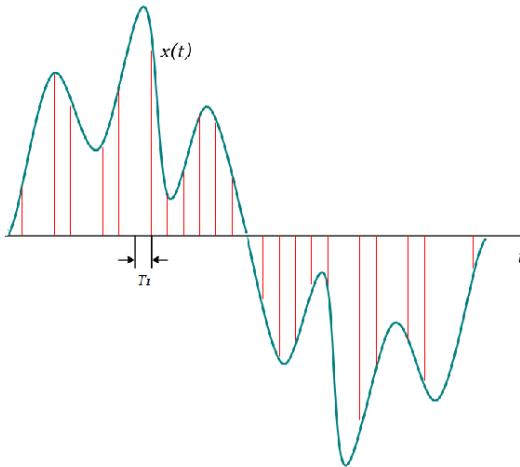


Рисунок 2.11 Квантование входного сигнала

$x(t)$ - входной аналоговый сигнал; T_1 - время дискретизации

Блок питания предназначен для обеспечения стабилизированным напряжением всех узлов реле, независимо от возможных изменений питающей сети. Блок питания может работать от сети постоянного или переменного тока.

Дисплей и клавиатура позволяют оператору получить информацию от устройства, изменить режим его работы, вводить информацию в реле. Дисплей и клавиатура в цифровых реле реализуются в максимально упрощенном виде: дисплей – цифробуквенный, однострочный; клавиатура – несколько кнопок.

Выходной блок формирует дискретный сигнал управления на защищаемый объект с гальванической развязкой коммутируемых цепей.

Микропроцессор является управляющим и решающим блоком реле. Программа его работы хранится в постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ). Для хранения промежуточных результатов вычислений применяется оперативное запоминающее устройство (ОЗУ).

Определение контролируемого параметра тока, основано на вычислении среднего или действующего значения периодической временной функции $x(t)$



$$X_{cp} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} |x(t)| dt \quad \text{и} \quad X = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} x^2(t) dt}$$

В реальном времени результат вычисления этого интеграла, может быть получен только после наблюдения за контролируемым сигналом $x(t)$ в течение периода T , поэтому собственное время срабатывания цифровых реле осталось практически таким же, как у их электромеханических аналогов.

Теоретически можно мгновенно определить для любого момента времени амплитуду и фазу синусоидального сигнала $x(t) = X \sin(\omega_n t + \varphi)$ частоты ω_n по известному его мгновенному значению и значению производной.

Решая систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= X \sin(\omega_n t + \varphi); \\ x'(t) &= \omega_n X \cos(\omega_n t + \varphi) \end{aligned} \right\}$$

относительно X и φ получим

$$X = \sqrt{x^2(t) + \left(\frac{x'(t)}{\omega_n} \right)^2};$$

$$\varphi = \arctg \frac{\omega_n x(t)}{x'(t)} - \omega_n t$$

Практически такой алгоритм требует усреднения нескольких выборок из-за сложности и погрешности нахождения производной тока, наличия помех, и поэтому реального увеличения быстродействия достичь не удаётся.

Однако в целом, полупроводниковые реле, по сравнению с электромагнитными и индукционными, работают с меньшими погрешностями, требуют меньших затрат на эксплуатацию, более просты в наладке. Важным достоинством полупроводниковых реле является наличие сервисных функций, таких, как тестирование и самодиагностика.

2.3. Реле направления мощности

Срабатывание реле направления мощности определяется только величиной угла между током и напряжением, подаваемых на реле, при широком диапазоне изменения их абсолютных значений.

Характеристика реле направления мощности при фиксированном векторе напряжения представляет собой прямую линию, проходящую через начало вектора \dot{U} перпендикулярно току \dot{I} , соответствующему максимальной выходной величине схемы сравнения. Угол между \dot{U} и \dot{I} для этих условий называется углом максимальной чувствительности $\varphi_{м.ч}$.

Индукционное реле мощности. Наибольшее распространение в нашей стране получило индукционное реле направления мощности серии РБМ-170. Конструктивно индукционное реле мощности представляет собой четырёхполюсную магнитную систему 1 с расположенными на сердечнике двумя обмотками: тока 2 и напряжения 3 (рис.2.12).

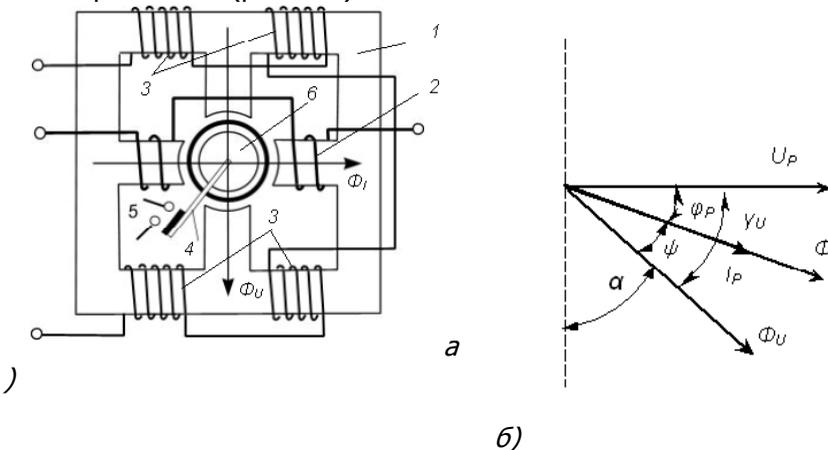


Рисунок 2.12 Индукционное реле мощности (а) и векторная диаграмма реле (б)

Между полюсами электромагнита помещён внутренний стальной сердечник и подвижный алюминиевый ротор b с закреплённым на нём контактом 4. При протекании тока по обмоткам создаются магнитные потоки, пропорциональные току Φ_I и



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

напряжению Φ_U . За счёт взаимодействия этих потоков с индуктированными в цилиндре токами создаётся вращающий момент:

$$M_{\text{вр}} = k \Phi_U \Phi_I \sin \psi,$$

где Φ_I – поток, создаваемый токовой обмоткой; Φ_U – поток, создаваемый обмоткой напряжения; ψ – угол между потоками.

Если в выражении для вращающего момента заменить потоки пропорциональными величинами – током в реле I_p и напряжением U_p , а угол ψ , равным ему углом $\psi = 90 - (\varphi_p + \alpha)$, то выражение для момента будет иметь вид:

$$M_{\text{вр}} = k \Phi_U \Phi_I \sin(90^\circ - (\varphi_p + \alpha)) = k_1 \Phi_U \Phi_I \cos(\varphi_p + \alpha).$$

Угол, при котором вращающий момент максимален, называется углом максимальной чувствительности. Угол, определяющий сдвиг вектора тока в обмотке напряжения относительно приложенного напряжения, называется углом внутреннего сдвига реле. В зависимости от значения угла внутреннего сдвига характеристика реле меняет своё положение в плоскости координат.

При $\alpha = 90^\circ$ реле называют реле реактивной мощности или синусным; при $\alpha = 0^\circ$ – реле активной мощности или косинусным. При промежуточных значениях угла реле реагирует на обе составляющие мощности и называется реле смешанного типа. Эти реле имеют наибольшее распространение в схемах релейной защиты. Угол внутреннего сдвига можно менять, включая в цепь обмотки напряжения реле активное сопротивление или конденсатор.

Для целей защиты промышленностью страны выпускаются реле направления мощности типов РБМ-171 и РБМ-271 с $\varphi_{\text{м.ч}}$ равным 30 и 45 градусов (ток опережает напряжение), и РБМ-177, РБМ-178 и РБМ-277, РБМ-278 с $\varphi_{\text{м.ч}} = -70^\circ$ на номинальные токи 1 А и 5 А и номинальное напряжение 100 В. Потребление токо-



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

вой цепи для всех реле около 10 ВА. Потребление цепи напряжения составляет 35–90 ВА. На базе этой же индукционной системы выпускается реле направления мощности обратной последовательности

РМОП-2.

Рассмотренное реле позволяет определить направление мощности короткого замыкания. Изменение знака момента происходит при изменении направления тока в первичной цепи. В схемах релейной защиты используется способность реле определять направление тока, поэтому такие реле называют реле направления мощности.

Полупроводниковые реле направления мощности. Наличие ряда недостатков индукционных реле, таких, как трудность отстройки от «самохода», вибрация контактной системы, низкая механическая устойчивость, поставили вопрос о необходимости их замены на полупроводниковые реле. В настоящее время промышленностью выпускаются различные виды полупроводниковых реле мощности. Одна из возможных реализаций реле на микроэлектронной основе представлена на рис.2.13.

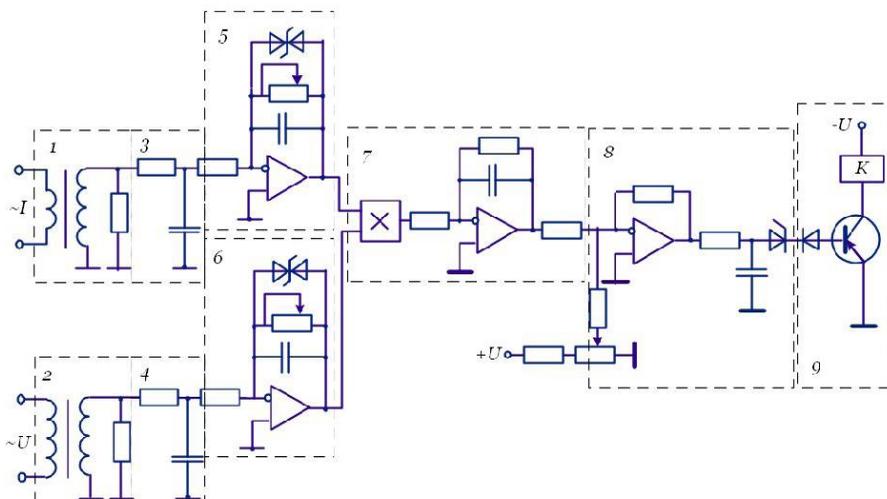


Рисунок 2.13 Принципиальная схема полупроводникового реле направления мощности

Реле состоит из входных преобразователей тока *1* и напряжения *2*; двух фильтров низких частот *3* и *4*; усилителей-ограничителей *5*, *6*; детектора знака активной мощности *7*, вы-



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

полненного на основе интегратора и перемножителя; порогового элемента \mathcal{B} , выполненного на компараторе; исполнительного блока \mathcal{D} .

Информация о токе и напряжении контролируемого объекта через входные преобразователи подаётся на фильтры низких частот. При помощи фильтров низких частот и усилителей–ограничителей формируются требуемые амплитудно–частотные характеристики каналов тока и напряжения. Сигналы, поступающие на входы детектора знака активной мощности, преобразуются при помощи перемножителя и интегратора в сигнал, пропорциональный активной мощности.

В общем случае, при возникновении повреждения на вход реле по цепи напряжения поступает сигнал, который описывается выражением

$$u(t) = U_0 + U_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + U_{2m} \sin(2\omega t + \psi_2) + \dots + U_{nm} \sin(n\omega t + \psi_n)$$

где U_0 – постоянная составляющая; U_{1m} – амплитуда основной гармоники; U_{2m}, \dots, U_{nm} – амплитуды высших гармоник; $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n$ – начальные фазы соответствующих гармоник.

Сигнал, поступающий на токовый вход, можно записать в следующем виде:

$$i(t) = I_0 + I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1 - \varphi_1) + \dots + I_{nm} \sin(\omega t + \psi_n - \varphi_n)$$

где $\varphi_1, \dots, \varphi_n$ – углы сдвига между соответствующими гармониками тока и напряжения.

Средняя мощность в цепи защищаемого объекта

$$\begin{aligned} p &= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u(t)i(t)dt = \\ &= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} [U_0 + U_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + \dots + U_{nm} \sin(n\omega t + \psi_n)] \times \\ &\times [I_0 + I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1 - \varphi_1) + \dots + I_{nm} \sin(\omega t + \psi_n - \varphi_n)] dt \end{aligned}$$

После перемножения многочленов интеграл можно представить в виде суммы следующих интегралов:



$$1. \quad \frac{1}{T} \int_t^{t+T} U_0 I_0 dt = U_0 I_0$$

2. Интегралов, содержащих произведение синусоид одинаковой частоты:

$$\frac{1}{T} \int_t^{t+T} U_{km} I_{km} \sin(k\omega t + \psi_k) \sin(k\omega t + \psi_k - \varphi_k) dt = U_{km} I_{km} \cos \varphi_k$$

3. Интегралов, содержащих произведение синусоид различной частоты:

$$\frac{1}{T} \int_t^{t+T} U_{km} I_{lm} \sin(k\omega t + \psi_k) \sin(l\omega t + \psi_l - \varphi_l) dt = 0$$

4. Интегралов вида

$$\frac{1}{T} \int_t^{t+T} U_0 I_{km} \sin(k\omega t + \psi_k - \varphi_k) dt = 0$$

и

$$\frac{1}{T} \int_t^{t+T} U_{km} I_0 \sin(k\omega t + \psi_k) dt = 0$$

В итоге получим

$$P = U_0 I_0 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots + U_n I_n \cos \varphi_n$$

Сигнал после перемножителя и интегратора пропорционален активной мощности и в зависимости от направления тока имеет положительный или отрицательный знак.

Полупроводниковые реле мощности, по сравнению с индукционными, обладают меньшей потребляемой мощностью, более чувствительны, работают с меньшими погрешностями, требуют меньших эксплуатационных затрат.



2.4. Реле сопротивления

Реле сопротивления реагирует на отношение подведённых к нему напряжения и тока, т.е. на сопротивление. Режим КЗ отличается от нормального режима работы сети пониженным значением напряжения и повышенным значением тока. Следовательно, сопротивление на входе реле при КЗ меньше, чем в нормальном режиме. Это обстоятельство и используется для выявления наличия КЗ.

Характеристики реле сопротивления. Реле сопротивления выполняются на индукционной, полупроводниковой или микропроцессорной элементных базах. Основное отличие различных исполнений реле заключается в способе обработки поступающей информации о токе и напряжении.

Поведение реле сопротивления в различных режимах зависит от его характеристики $Z_{cp} = f(\dot{I}_p, \dot{U}_p, \varphi_p)$, где φ_p – угол между векторами тока \dot{I}_p и напряжения \dot{U}_p , подводимых к реле.

Полное сопротивление Z состоит из активного R и реактивного X сопротивлений: $\underline{Z} = R + jX$ или, $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$, поэтому характеристику реле сопротивления представляют в плоскости Z , откладывая R по горизонтальной, а X – по вертикальной оси.

Характеристики реле сопротивления должны обеспечивать надёжную отстройку от нагрузочных режимов, учитывать наличие сопротивления дуги.

Виды характеристик реле сопротивления.

1. Круговая характеристика с центром в начале координат (рис.2.14).

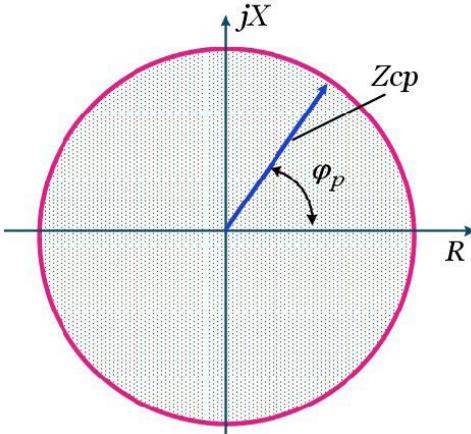


Рисунок 2.14 Круговая характеристика реле сопротивления с центром в начале координат

Зона, ограниченная окружностью, является зоной действия реле. Сопротивление срабатывания таких реле не зависит от φ_p , поэтому их называют реле полного сопротивления.

2. Круговая характеристика, проходящая через начало координат (рис.2.15).

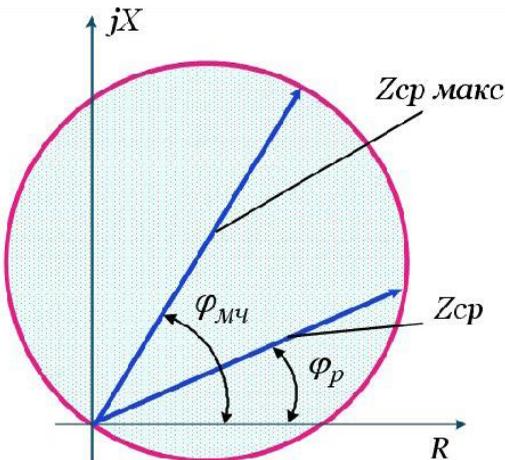


Рисунок 2.15 Характеристика направленного реле сопротивления

Реле с такой характеристикой не работают при направле-



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

нии тока из линии к шинам, поэтому оно является направленным. Точка 0 соответствует началу защищаемой линии. При коротком замыкании в начале линии, когда R и X равны нулю, реле не работает, что является его недостатком. Угол φ_p , при котором сопротивление срабатывания реле максимально, называется углом максимальной чувствительности.

3. Реле с эллиптической характеристикой (рис.2.16).

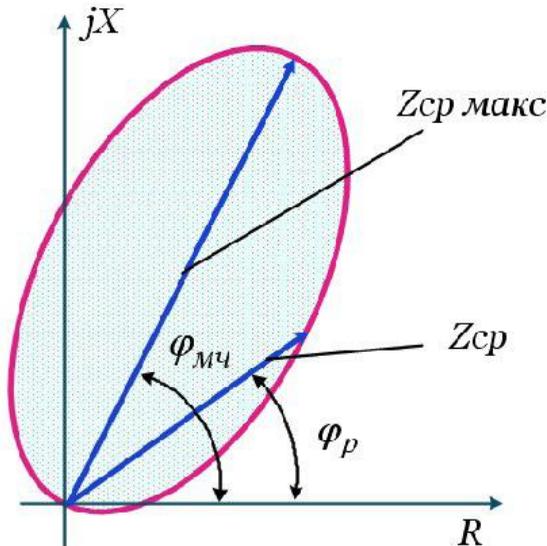


Рисунок 2.16 Эллиптическая характеристика реле сопротивления

Такие характеристики использовались для третьих ступеней защит с целью улучшения отстройки от рабочих режимов и получения большей чувствительности.

4. Реле с многоугольными характеристиками (рис.2.17).

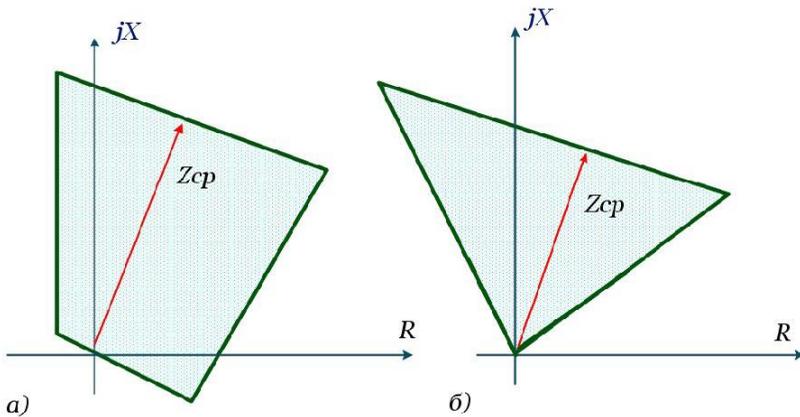


Рисунок 2.17 Многоугольная характеристика реле сопротивления

Четырёхугольная характеристика (рис.2.17, а) используется в реле для выполнения второй и третьей ступеней защит. Её верхняя сторона должна фиксировать концы защищаемых зон, правая боковая сторона обеспечивает отстройку от рабочих режимов. Левая сторона отстраивает защиту от мощностей нагрузок, передаваемых к месту её включения. Нижняя сторона обеспечивает работу защиты при близких повреждениях, сопровождающихся замыканием через переходное сопротивление.

Треугольная характеристика (рис.2.17, б) применяется для реле сопротивления третьей ступени, обеспечивает необходимую отстройку от нагрузочных режимов с соблюдением требуемой чувствительности.

Выполнение измерительных органов дистанционной защиты. Как и реле направления мощности, реле сопротивления могут выполняться на балансных электромагнитных и индукционных системах. В СССР наиболее распространёнными были индукционные реле сопротивления, т.е. реле, основанные на использовании схем сравнения по фазе.

В эксплуатации находится большое число реле сопротивления, выполненных на такой же четырёхполюсной индукционной системе с барабанчиком, что и реле направления мощности серии РБМ-170. К ним относятся, в частности, реле полного сопротивления серии КРС-111 и направленные реле сопротивления типов КРС-131 и КРС-132. Однако в отличие от реле направления мощности, у которых переход на полупроводниковую элементную ба-



зу приводил к существенному ухудшению характеристик, полупроводниковые реле сопротивления оказались не только конкурентоспособными с индукционными реле, но и позволили получать характеристики, трудно достижимые в реле серии КРС-100.

В настоящее время индукционные реле сопротивления в нашей стране не выпускаются; практически прекратился их выпуск и в других странах. Сейчас реле сопротивления выпускаются на аналоговых интегральных микросхемах или на цифровой электронике.

2.5. Дифференциальное реле

Дифференциальные реле используются для реализации дифференциальных защит.

Электромагнитное дифференциальное реле. Электромагнитное дифференциальное реле с быстроснасыщающимся трансформатором (БНТ) РНТ-565 выполняется на трёхстержневом сердечнике (рис.2.18), на котором размещены рабочая $W_{РАБ}$, две уравнивательных $W_{УР1}$ и $W_{УР2}$, короткозамкнутая $W_{КЗ}$ и вторичная обмотки. К вторичной обмотке подключено электромагнитное токовое реле КА.

Использование насыщающегося трансформатора тока позволяет отстроить защиту от бросков тока намагничивания в момент включения силового трансформатора. Аperiodическая слагающая тока насыщает магнитопровод, вследствие чего резко уменьшается сопротивление ветви намагничивания БНТ. В результате этого значительная часть периодической слагающей тока также замыкается через ветвь намагничивания, не попадая в обмотку реле.

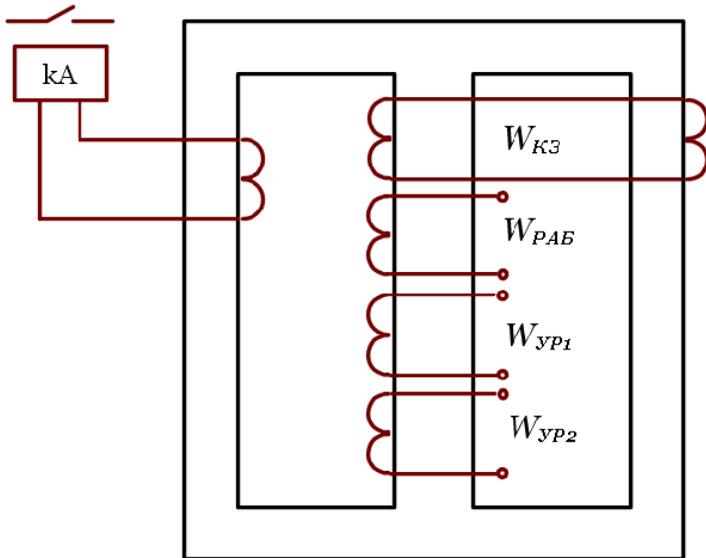


Рисунок 2.18 Принципиальная схема БНТ реле РНТ-565

Быстронасыщающийся трансформатор реле одновременно позволяет компенсировать неравенство вторичных токов в плечах дифференциальной защиты. Ток во вторичной обмотке БНТ, к которой подключено реле, определяется суммарным магнитным потоком, создаваемым рабочей и уравнительными обмотками. Если включить эти обмотки таким образом, чтобы при внешнем коротком замыкании потоки, создаваемые токами обмоток, были направлены встречно друг другу, и выровнять величину потоков за счёт подбора витков, то величина тока небаланса уменьшается.

Короткозамкнутая обмотка используется для улучшения отстройки от переходных режимов.

Полупроводниковые дифференциальные реле.

Реле типа РСТ 15 выполнено на микросэлектронной элементной базе и применяется для защиты понизительных трансформаторов и электродвигателей. Структурная схема реле представлена на рис.2.19.

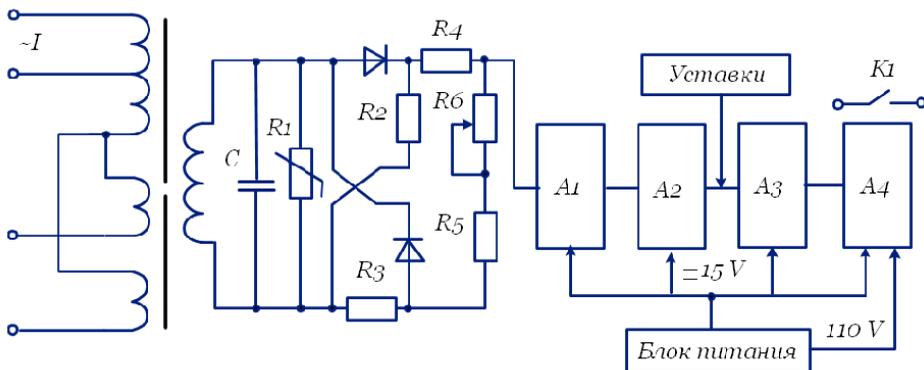


Рисунок 2.19 Дифференциальное реле тока типа РСТ 15

Сигнал от трансформаторов тока подаётся на трансреактор TAV , который содержит одну основную и две дополнительные обмотки. Обмотки связаны между собой перемычками. Трансреактор работает на выпрямительный мост, состоящий из двух диодов и двух резисторов, что позволяет повысить чувствительность реле к малым сигналам.

К выходу выпрямительного моста подключён активный фильтр нижних частот $A1$. Параметры фильтра подобраны таким образом, что для постоянной составляющей входного сигнала коэффициент усиления равен единице, для рабочей частоты – 2,2, для второй гармоники – 0,9.

На рис.2.20 представлена амплитудно–частотная характеристика этого фильтра.

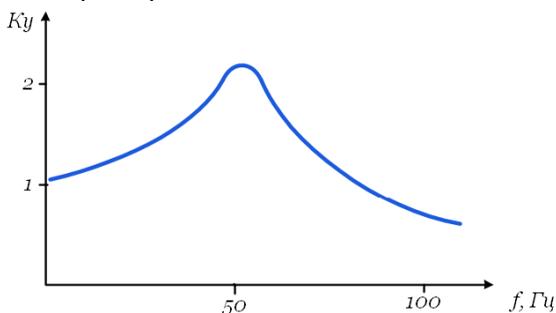


Рисунок 2.20 Амплитудно-частотная характеристика фильтра



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

С выхода фильтра $A1$ сигнал подаётся в логический блок, выполненный на операционных усилителях $A2$, $A3$ и предназначенный для идентификации повреждения. Усилитель $A2$ представляет собой компаратор, выполняющий сравнение входного сигнала с опорным, подаваемым с блока уставок. Усилитель $A3$ выполняет функции элемента задержки с установленной выдержкой времени 22 мс и в сочетании с предыдущим элементом позволяет отличить режим короткого замыкания от режима включения трансформатора.

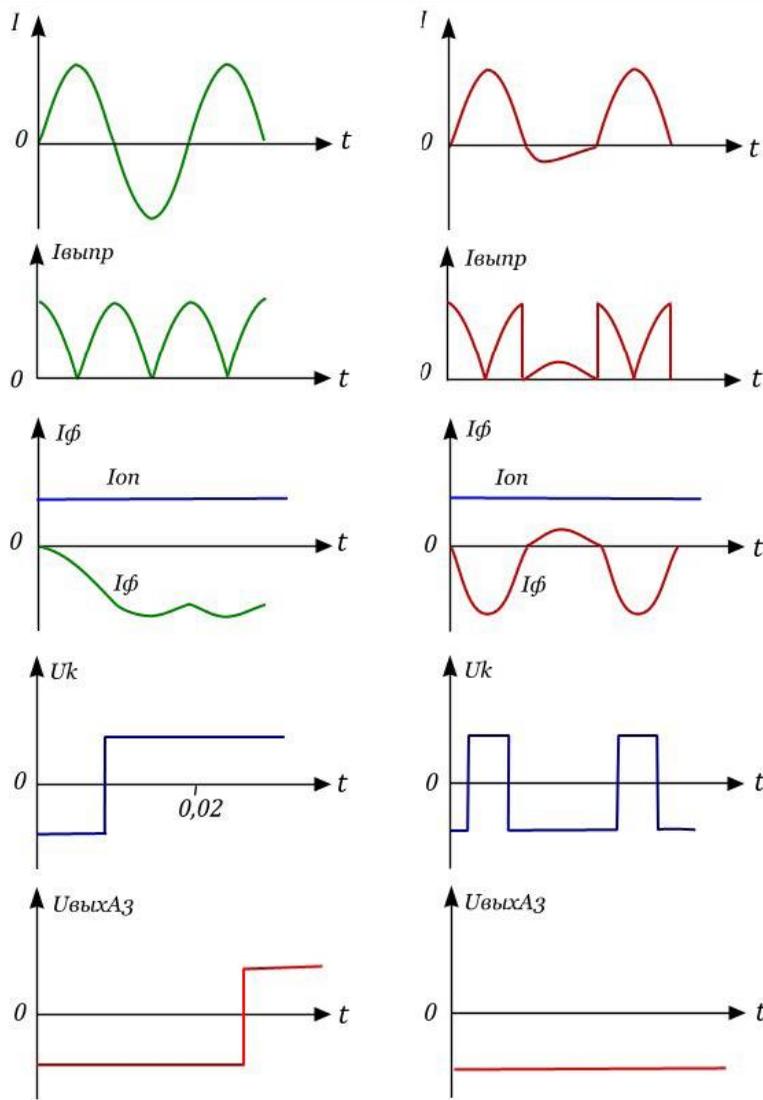
Для устранения «дребезга» реле в момент срабатывания выход операционного усилителя $A3$ соединён положительной обратной связью с входом компаратора $A2$.

Принцип работы реле иллюстрируется при помощи временных диаграмм (рис.2.21).

При возникновении короткого замыкания в зоне действия защит (рис. 2.21, *а*) входной сигнал превысит опорный, что приведёт к смене знака выходного напряжения компаратора $A2$. Элемент $A3$ отработает задержку времени, и транзистор выходного блока $A4$ откроется. Реле сработает.



Основы релейной защиты элементов энергетических систем



а)

б)

Рисунок 2.21 Временные диаграммы работы реле:

$I = f(t)$ – ток на входе реле; $I_{\text{выпр}} = f(t)$ – ток на выходе выпрямителя; $I_{\phi} = f(t)$ – опорный сигнал с блока уставок; $U_k = f(t)$ – напряжение на выходе компаратора;



$U_{\text{вых}A2} = f(t)$ – напряжение на выходе элемента задержки

В момент включения силового трансформатора (рис.2.16, б) элемент задержки не успевает отработать выдержку времени за время пока изменён знак выходного напряжения компаратора А2. Реле не работает.

В дифференциальных и фильтровых токовых защитах, где при больших кратностях входных токов возможно появление существенных токов небаланса, широко используются реле с торможением от какой-либо комбинации входных токов. Поскольку основной причиной появления токов небаланса являются элементы, нелинейность которых в большей степени проявляется при больших кратностях тока, торможение часто выполняют нелинейным: при входных тока, меньших номинального, оно либо отсутствует, либо очень мало, а при увеличении тока, когда могут появиться токи небаланса, формируется тормозной сигнал, зависящий от входного тока.

В СССР получил широкое распространение способ магнитного торможения в дифференциальных токовых реле серии ДЗТ-10, выполненных на электромагнитной элементной базе (конструкция магнитопровода реле серии ДЗТ-10 такая же, как и у реле РНТ-565).

В настоящее время промышленностью выпускаются дифференциальные реле (в том числе и с торможением) на полупроводниковой и микропроцессорной элементных базах.

Полупроводниковое дифференциальное реле тока с торможением типа ДЗТ 21. Реле типа ДЗТ-21 используется на энергетических объектах для выполнения дифференциальной защиты с торможением и до настоящего времени является наиболее распространённым типом защиты трансформаторов и автотрансформаторов большой мощности от внутренних повреждений и повреждениях на выводах. Реле обладает высокими чувствительностью и быстродействием.

Для отстройки от бросков намагничивающего тока силовых трансформаторов и переходных токов небаланса применяется времяимпульсный способ блокирования защиты в сочетании с торможением от составляющей второй гармоники тока намагничивания. В защите предусмотрено также торможение от фазных токов. Однолинейная структурная схема защиты приведена на рис. 2.22.

Реле ДЗТ-21 выполнено трёхфазным в четырёхмодульной каскаде и включает в себя три фазных модуля и модуль питания и



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

управления. Реле содержит: промежуточные автотрансформаторы $TL1$ и $TL2$ – для выравнивания вторичных токов; промежуточные трансформаторы $TL3$ и $TL4$ и выпрямители $VS1$ и $VS2$ – для формирования цепи торможения от фазных токов; трансреактор TAV – для формирования цепи торможения током второй гармоники при помощи фильтра ZF и питания токовой отсечки kA ; реагирующий орган PO – для создания управляющего сигнала. Стабилитрон VD обеспечивает запрет торможения при небольших токах.

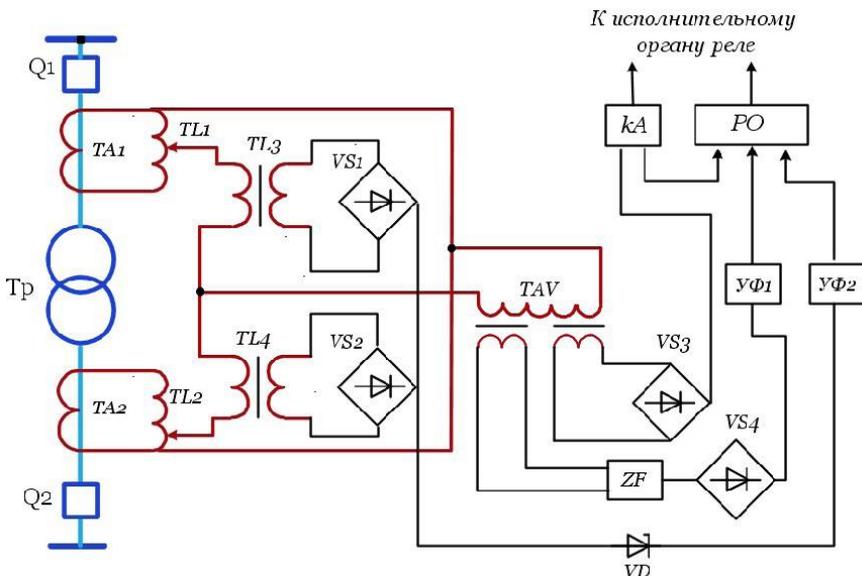


Рисунок 2.22 Однолинейная структурная схема защиты с реле ДЗТ-21

2.6. Промежуточные реле

В схемах релейной защиты на электромеханической элементной базе для выполнения логических операций, не требующих выдержки времени или при необходимости относительно малой задержки, используются электромагнитные промежуточные реле.

Конструкции промежуточных реле выбираются с таким расчётом, чтобы они были надёжными, обеспечивали необходимую коммутационную способность и требуемые изоляционные характеристики, имели по возможности малую потребляемую мощность и небольшие размеры.

Коэффициент возврата не имеет существенного значения,



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

поскольку возврат реле должен обеспечиваться при полном снятии напряжения, однако совершенно недопустимо залипание реле под воздействием остаточной индукции в магнитопроводе. Наиболее распространены промежуточные электромагнитные реле клапанного типа с поворотным якорем, притягиваемым полюсному наконечнику магнитопровода, обычно П-образной формы.

Основными промежуточными реле постоянного тока, используемые в схемах релейной защиты, являются реле РП-23 (рис.2.23), время работы которых составляет около 60 мс, быстродействующие реле РП-220 со временем действия около 10 мс и реле с замедлением на срабатывание или возврат серии РП-250.

Напряжение срабатывания составляют около $0,7U_{ном}$, возврата $(0,03 \div 0,05)U_{ном}$. Быстродействие реле РП-220 достигается за счёт некоторого облегчения конструкции и включения последовательно с катушкой реле добавочного резистора, значительно снижающего постоянную времени обмотки реле, т.е. обеспечивающего быстрое нарастание тока, а, следовательно, магнитного потока и усилия на подвижную часть реле.

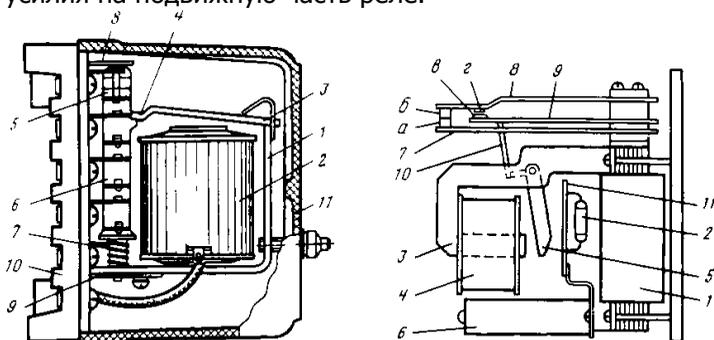


Рисунок 2.23 Промежуточное реле серии РП-23

В реле серии РП-250, наоборот, принимаются меры для снижения скорости нарастания потока после подачи напряжения, если необходима задержка на срабатывание, или снижения скорости спада потока после снятия напряжения, если требуется задержка на возврат.

Задержка на срабатывание в реле постоянного тока в общем случае может быть достигнута увеличением добротности электромагнита, т.е. отношения его индуктивного сопротивления к активному сопротивлению. Увеличение добротности достигает-



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

ся, увеличением объёма стали и обмотки. Изменение количества витков при неизменных геометрических размерах катушки практически не может повлиять на добротность системы.

Замедление нарастания магнитного потока может быть достигнуто путём использования короткозамкнутых гильз, охватывающих магнитопровод и занимающих существенную часть катушки. При подаче напряжения на обмотку реле в гильзах проходит наведённый ток, создающий магнитный поток, направленный встречно по отношению к магнитному потоку обмотки. Наведённый ток в гильзах затухает с постоянной времени, определяемой отношением индуктивности гильз к их сопротивлению. Эта постоянная времени может быть несколько выше постоянной времени обмотки такого же объёма, так как весь объём занят медью. Только после превышения магнитного обмотки по сравнению с наведённым потоком якорь реле начнёт движение.

В реле серии РП-250 магнитная система более добротна, чем в реле РП-23 и РП-220. Кроме того, в нём используются короткозамкнутые гильзы, что даёт возможность получить задержку на срабатывание до 0,12 с (реле РП-251) при потреблении 6 Вт, т.е. таком же, как и в реле РП-23 и РП-220.

Замедление при замыкании цепи обмотки промежуточного реле может выполняться при помощи схем, состоящих из резистора R и конденсатора C , включённых как показано на рис. 2.24, а. Конденсатор C разряжается на обмотку KL при замыкании его обмотки контактами $K.1$. Под действием тока разряда возврат реле замедляется до момента, когда ток разряда снизится до тока возврата KL . Резистор R ограничивает ток через конденсатор в момент включения реле KL .

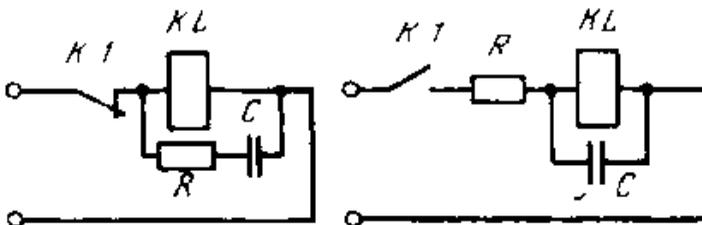


Рисунок 2.24 Схемы замедления действия промежуточных реле:

KL – обмотка промежуточного реле; $K.1$ – контакты в цепи обмотки

промежуточного реле

В схеме на рис.2.24, б действие реле замедляется как при



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

замыкании, так и при размыкании реле KL . В момент замыкания контактов $K.1$ происходит заряд конденсатора C , в нём появляется ток, создающий повышенное падение напряжения на сопротивлении R . Вследствие этого напряжение на зажимах обмотки реле уменьшается. По окончании заряда конденсатора прохождение тока через конденсатор прекращается, и на обмотке KL устанавливается нормальное напряжение.

При размыкании контактов $K.1$ конденсатор C разряжается на обмотку реле KL , удерживая реле в сработавшем состоянии до тех пор, пока ток в обмотке не снизится до значения тока возврата. Чем больше ёмкость C , тем больше замедляется действие реле.

Выпускаются промежуточные реле, замедленные на срабатывание до 0,25 с (РП18-1) и на возврат до 2 с (РП18-2 – РП18-5), в которых замедление обеспечивается с помощью специальных полупроводниковых схем, к выходу которых подключаются обмотки промежуточных реле.

Для выполнения логических функций в комплектах защиты довольно широко используются кодовые реле серии КДР. Они выпускаются без кожуха и имеют приблизительно такую же конструкцию, как и реле серии РП-250, но менее мощную контактную систему, что позволяет получать большее быстродействие для реле без выдержки времени и большее время действия в реле с задержкой. Кроме того, кодовые реле имеют существенно меньшее потребление (не более 1-2 Вт). Для применения в комплектных полупроводниковых устройствах ЧЭАЗ выпускает малогабаритные реле РП-13 (без кожуха), имеющие примерно такое же потребление, что и кодовые реле.

К числу быстродействующих реле, время действия которых составляет 0,01 с, относятся реле типов РП-210 – РП-215, кодовые реле КДР-1 и реле серии МКУ. Ещё большее быстродействие обеспечивают реле с герметизированными контактами (герконами).

2.7. Реле времени

Реле времени служит для искусственного замедления действия устройств релейной защиты и электроавтоматики. На схеме рис. 2.25 показано применение реле времени в релейной защите. При замыкании контактов реле тока $KA.1$ плюс источника оперативного тока подводится к обмотке реле времени KT , которое через определённый интервал времени замыкает контакты $KT.1$ в



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

цепи катушки отключения YAT , производя отключение выключателя. Время, проходящее с момента подачи напряжения на обмотку реле времени до замыкания его контактов, называется выдержкой времени реле.

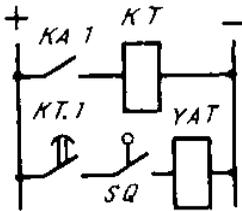


Рисунок 2.25 Схема включения реле времени

Основным требованием, предъявляемым к реле времени, применяемым в схемах РЗ, является точность. Погрешность во времени действия реле со шкалой до 3,5 с не должна превышать $\pm 0,06$ с, а при больших выдержках, устанавливаемых на реле со шкалой 20 – 30 с, $\pm 0,25$ с.

Электромеханические реле времени достаточно высокой точности, которые сейчас находят применение, выполняются на двух принципах, с применением часового механизма, в котором рабочее усилие определяется пружиной, и синхронного электродвигателя с редуктором, частота вращения которого определяется частотой сети и мало зависит от входного значения сигнала.

Отечественной промышленностью выпускаются два основных типа реле с часовым механизмом. В первом из них часовый механизм находится в заведённом состоянии при обеспеченном электромагните реле. При подаче напряжения на электромагнит, заводная пружина часового механизма освобождается, и механизм с анкерным ходом приходит в действие (рис.2.26). На выходном валу часового механизма установлены подвижные контакты реле времени. Неподвижные контакты могут устанавливаться в различное положение с таким расчётом, чтобы получить необходимое время задержки с момента подачи напряжения.

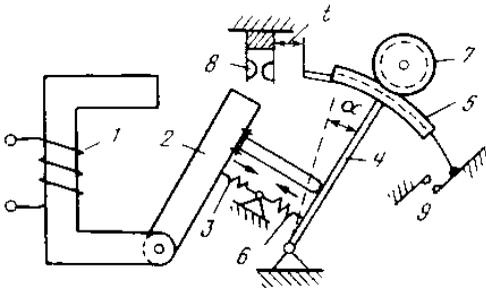


Рисунок 2.26 Конструкция реле времени с часовым механизмом

В реле времени возможна установка временно замыкающихся (проскальзывающих) контактов, которые замыкаются кратковременно при проходе около них подвижного контакта. С якорем электромагнита может быть связана контактная система, приводимая в действие без дополнительной выдержки времени.

При снятии напряжения с электромагнита пружина часового механизма заводится и последний приходит в исходное положение, причём это происходит достаточно быстро. Таким образом, реле времени первого типа могут обеспечивать операции длительного или кратковременного замыкания контактов с необходимой выдержкой времени после подачи сигнала. На таком принципе выпускаются реле времени постоянного напряжения серии ЭВ-100 на выдержки времени до 20 с. Погрешность реле по выдержке времени составляет 3 – 4 % наибольшей уставки.

Потребление электромагнита реле составляет около 30 Вт, однако в исполнении ЭВ-113 – ЭВ-143, предназначенном для длительного включения под напряжение, предусмотрено введение добавочного резистора мгновенными размыкающимися контактами и потребление в длительном режиме не превышает 15 Вт. Контакты реле времени рассчитаны на отключающую способность до 100 Вт на постоянном напряжении до 250 В и до 500 ВА на переменном напряжении. Длительный ток через контакты не более 5 А.

Реле времени второго типа отличается тем, что часовой механизм у него заводится при подаче напряжения на электромагнит реле и освобождается при его снятии. Поэтому часовой механизм обеспечивает действие с замедлением при исчезновении входного сигнала. Реле такого типа выпускаются с электромагнитом, рассчитанным на питание напряжением переменного тока. Реле типов ЭВ-215 – ЭВ-245 оборудованы таким же часовым механизмом, что и реле серии ЭВ-100, и имеют такие же контактные системы и выдержки времени. Потребление электромагнита



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

составляет 20 ВА.

Реле типов РВМ-12 и РВМ-13 предназначены для включения в токовые цепи защиты, и выполняются с использованием синхронного микродвигателя. Однофазный электродвигатель 3 (рис.2.27) питается от промежуточных насыщающихся трансформаторов тока (НТТ) 1 и 2, действующее значение напряжения, на вторичной обмотке которых поддерживается примерно на одинаковом уровне в широком диапазоне изменения тока в первичных обмотках. Оба НТТ включаются на разные фазные токи, а микродвигатель с помощью контактов пусковых реле подключается только к одному НТТ в зависимости от вида КЗ. Для ограничения амплитудных значений напряжений на вторичных обмотках НТТ параллельно им включаются конденсаторы 4 и 5 и резисторы 6 и 7.

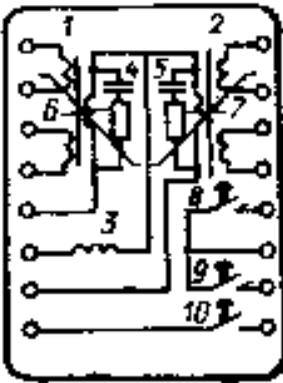


Рисунок 2.27 Принципиальная схема реле типов РВМ-12, РВМ-13

При подаче напряжения на обмотку микродвигателя последний начинает вращаться с частотой, определяемой частотой тока. С помощью редуктора частота вращения снижается до такого значения, чтобы выходной рычаг механизма, на котором укреплены подвижные контакты реле, двигался примерно 4 с для реле типа РВМ-12 и 10 с – для реле типа РВМ-13. В каждом реле имеются два про-скальзывающих контакта и один кольцевой 8-10.

Абсолютная погрешность по выдержке времени составляет 0,12 с для реле типа РВМ-12 и 0,25 с – для реле типа РВМ-13.

Таким образом, с помощью электромеханических реле серий ЭВ-100, ЭВ-200 и РВМ-10 можно выполнить большую часть логических операций задержки. Однако эти реле довольно трудоёмки в изготовлении и сложны в эксплуатации. Поэтому в настоящее время промышленностью выпускаются реле времени типов РВ-01 и РВ-03, а также блоков ВО100, ВО200 и ВО300 комплектного устройства защиты типа ЯРЭ-2201 на полупроводниковой элементной базе.

2.8. Указательные реле

Указательные реле служат для фиксации действия релейной защиты в целом или её структурных частей (элементов). На рис.2.28 показано указательное реле типа РУ-21, сигнализирующее действие РЗ на отключение выключателя. При срабатывании РЗ по обмотке реле 3 проходит ток, приводящий реле в действие.

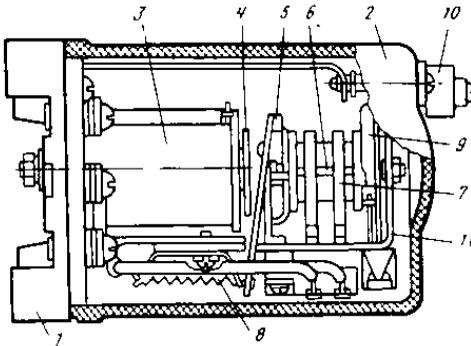


Рисунок 2.28 Конструкция указательного реле РУ-21

В виду кратковременности прохождения тока в обмотке указательных реле они выполняются так, что сигнальный флажок и контакты реле остаются в сработанном состоянии до тех пор, пока их не возвратит на место обслуживающий персонал.

При появлении тока в обмотке 3 якорь реле 5 притягивается и освобождает флажок 9.

Последний падает под действием собственной массы, принимая вертикальное положение. В этом положении флажок виден через прозрачный кожух 2. Возврат флажка в начальное положение производится кнопкой 10. Выпускаются также сигнальные реле типа ЭС, выполняющие те же функции.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое реле? Характеристика срабатывания реле.
2. Какие виды реле применяются в релейной защите?
3. На что реагируют электрические реле?
4. Функциональные части реле: воспринимающая, преобразующая, сравнивающая, исполнительная и замедляющая.
5. Какие реле называются электромеханическими?
6. Назначение реле тока.
7. Какие элементные базы используются для построения реле?
8. Принцип действия электромагнитного реле тока.
9. Принцип действия реле тока на полупроводниковой



элементной базе.

10. Как работает реле тока на микропроцессорной элементной базе?

11. Что такое ток срабатывания реле?

12. Что такое ток возврата реле?

13. Конструкция реле тока РТ-40.

14. Назначение реле напряжения.

15. Конструкция реле напряжения серии РН. Отличие от РТ-40.

16. Назначение компаратора. Принцип его работы.

17. Назначение триггера Шмита. Принцип его работы.

18. Как выполняется выходная часть полупроводникового реле?

19. Принцип работы реле РСТ-13.

20. Назначение аналого–цифрового преобразователя.

21. Как выбирается частота квантования сигнала?

22. Определение интегральных параметров сигнала по их выборкам.

23. Назначение и принцип работы реле направления мощности.

24. Принцип работы индукционного реле направления мощности.

25. Конструкция реле направления мощности серии РБМ-170.

26. Принцип работы полупроводникового реле направления мощности.

27. Назначение и принцип работы реле сопротивления.

28. Характеристики реле сопротивления.

29. Назначение и принцип работы дифференциального реле.

30. Электромагнитное дифференциальное реле РНТ-565.

31. Полупроводниковое дифференциальное реле ДЗТ-21.

32. Назначение и технические характеристики промежуточных реле.

33. Как задаётся замедление срабатывания промежуточных реле.

34. Назначение и требования к реле времени.

35. Принципы выполнения электромеханических реле времени.

36. Назначение и принцип выполнения указательных реле.



3. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ. ФИЛЬТРЫ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

3.1. Назначение измерительных трансформаторов и общие принципы их работы

Включение реле и измерительных приборов в установках высокого напряжения переменного тока производится, как правило, через измерительные трансформаторы тока (ИТТ) – для измерения тока и трансформаторы напряжения (ИТН) – для измерения напряжения. Назначение измерительных трансформаторов состоит в том, чтобы изолировать реле и измерительные приборы от цепей высокого напряжения и уменьшить токи (сотни и тысячи ампер) и напряжения (тысячи вольт) до величин, удобных для измерения. В России трансформаторы тока изготавливаются с номинальным вторичным током 5 А и 1 А, а трансформаторы напряжения – с номинальным вторичным напряжением 100 В и $\frac{100}{\sqrt{3}}$ В. По своему назначению трансформаторы тока разделяются на предназначенные для релейной защиты и устройств измерений, поскольку к точности их работы при различных кратностях первичного тока предъявляются разные требования.

Основным режимом ИТТ для измерений является нормальный рабочий; в пределах изменения рабочих токов должна обеспечиваться необходимая точность трансформации, характеризуемая классом точности. Работа ИТТ в схемах многих типов релейной защиты происходит в аварийных режимах, когда токи короткого замыкания могут значительно превосходить нормальные рабочие. Иногда, при соответствующем выполнении, вторичные обмотки трансформаторов тока могут одновременно использоваться для обоих случаев применения. У трансформаторов напряжения такого разделения нет, и они могут одновременно применяться для различных видов вторичной нагрузки.

Электромагнитные измерительные трансформаторы являются разновидностями обычных трансформаторов – индуктивных преобразователей, с помощью которых переменный ток или напряжение преобразуются соответственно в ток или напряжение. Поэтому хотя режимы работы ИТТ и ИТН совершенно различны, они характеризуются некоторыми общими свойствами трансформаторов.

На рис.3.1 приведена схема двухобмоточного трансформа-



тора.

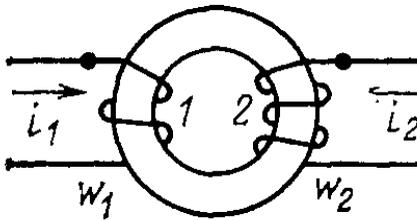


Рисунок 3.1 Двухобмоточный трансформатор

Его первичная обмотка с числом витков W_1 и током i_1 включается на первичное напряжение (ИТН) или ток (ИТТ). Вторичная обмотка с числом витков W_2 и током i_2 включается на нагрузку. ИТТ является практически идеальным источником тока, ИТН – напряжения.

3.2. Измерительные трансформаторы тока и их работа в установившемся режиме

По принципу преобразования тока измерительные преобразователи делятся на электромагнитные, оптико-электронные, магнитные, дискретные и некоторые другие. Ниже рассматриваются получившие в настоящее время наибольшее распространение в энергосистемах электромагнитные преобразователи, называемые просто трансформаторами тока (ТТ).

Конструктивно трансформатор тока представляет собой стальной сердечник с двумя обмотками: первичной W_1 , включаемой в рассечку цепи контролируемого тока, и вторичной W_2 (рис.3.2, а).

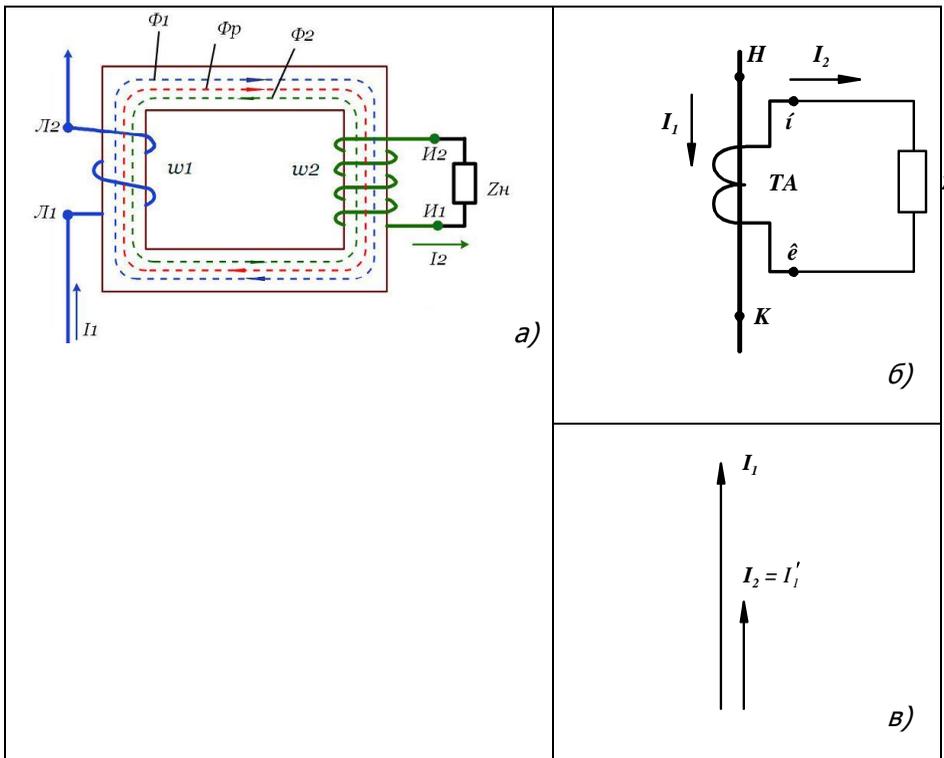


Рисунок 3.2 Устройство трансформатора тока (а), маркировка зажимов ИТТ (б), векторные диаграмма (в)

Зажимы обмоток ТТ маркируются (рис. 3.2, б), так как важно знать одноимённые их выводы. Приняв произвольно за начало H первичной обмотки любой зажим, за начало h вторичной обмотки принимают зажим, из которого мгновенный ток i_2 направляется во внешнюю цепь в тот момент времени, когда первичный ток i_1 направлен от начала H к концу K . Заводы-изготовители обозначают начало и конец первичной обмотки ТТ L_1 и L_2 , а начало и конец вторичной обмотки – I_1 и I_2 .

Уравнения для обмоток ИТТ запишем на основе первого и второго правил Кирхгофа, используя символический метод (рис.3.2, б).



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

$$\left. \begin{aligned} I'_1 &= I_2 + I_0 \\ I_0 Z_0 &= I_2 (Z_2 + Z_{н2}) \end{aligned} \right\}$$

Для практических расчётов пользуются схемами замещения ИТТ, в которых магнитная связь между обмотками заменяется электрической. Наиболее часто используется T -образная схема замещения (рис.3.3). Здесь $Z_0 = \omega M$ - сопротивление ветви намагничивания (в ней протекает ток намагничивания I_0).

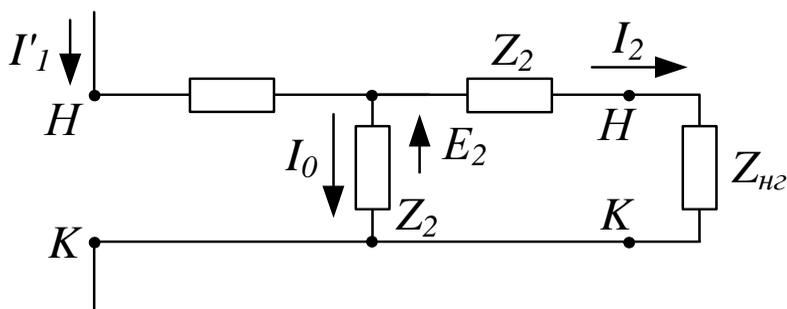


Рисунок 3.3. Схема замещения трансформатора тока

Рассмотрим стационарный режим работы ИТТ при синусоидальном первичном токе.

При протекании по первичной обмотке переменного тока I_1 в магнитопроводе создаётся магнитный поток Φ_1 , который наводит ЭДС E_2 во вторичной обмотке. Если вторичная обмотка замкнута на некоторую нагрузку Z_2 , то в ней будет протекать ток I_2 . Этот ток согласно закону Ленца имеет направление, противоположное направлению первичного тока I_1 . Вторичный ток I_2 создаёт в магнитопроводе магнитный поток Φ_2 , который направлен встречно потоку Φ_1 . В результате геометрического сложения потоков Φ_1 и Φ_2 в магнитопроводе устанавливается



результатирующий магнитный поток $\Phi_p = \Phi_1 - \Phi_2$, составляющий несколько процентов от Φ_1 . Посредством потока Φ_p и осуществляется передача энергии из первичной обмотки во вторичную.

При протекании токов в обмотках создаются магнитодвижущие силы (МДС):

- в первичной обмотке $F_1 = I_1 w_1$,
- во вторичной обмотке $F_2 = I_2 w_2$.

При отсутствии потерь энергии в ИТТ МДС F_1 и F_2 численно равны, но направлены в противоположные стороны. Такой ИТТ называется идеальным.

Для идеального ИТТ справедливо равенство

$$\dot{F}_1 = -\dot{F}_2$$

(3.1)

или

$$I_1 w_1 = I_2 w_2$$

(3.2)

Из равенства (3.2) следует, что $k_I = I_1 / I_2 = w_2 / w_1$

$$k_I = I_1 / I_2 = w_2 / w_1$$

(3.3)

где k_I - коэффициент трансформации идеального трансформатора тока.

На основе равенства (3.3) можно записать

$$I_2 = I_1 / k_I = I_1'$$

(3.4)

здесь ток I_1' - первичный ток, приведенный к вторичной обмотке.

В реальных ИТТ преобразование тока сопровождается потерями энергии, расходуемой на создание магнитного потока в магнитопроводе, на нагрев и перемагничивание магнитопровода, а также на нагрев проводов обмоток. Поэтому в реальных ИТТ первичная МДС должна обеспечить создание необходимой вторичной МДС, а также дополнительной МДС, расходуемой на



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

намагничивание магнитопровода и покрытие других потерь энергии. Следовательно, для реального ИТТ уравнение (3.1) имеет вид

$$\dot{F}_1 = -(\dot{F}_2 + \dot{F}_0),$$

где F_0 – полная МДС намагничивания, затрачиваемая на проведение магнитного потока Φ_0 по магнитопроводу, на перемагничивание и нагрев его.

В соответствии с этим, равенство (3.2) примет вид

$$I_1 w_1 = I_2 w_2 + I_0 w_1, \quad (3.5)$$

где I_0 – ток намагничивания, создающий в магнитопроводе магнитный поток Φ_0 . Разделив выражение (3.5) на w_2 , получим

$$I_2 = (I_1 - I_0) \frac{w_1}{w_2} = (I_1 - I_0) / k_I. \quad (3.6)$$

Сравнивая выражения (3.4) и (3.6), можно отметить, что они отличаются друг от друга слагаемым F_0 (или $I_0 w_1$).

Следовательно, из-за наличия тока намагничивания реальный ИТТ не обеспечивает пропорциональности первичного и вторичного токов, т.е. работает с погрешностью. Качество работы ИТТ характеризуется: полной ε , токовой f и угловой δ погрешностями.

Согласно ГОСТ 7746-78Е в качестве регламентируемой погрешности установлена полная погрешность при синусоидальном первичном токе, которая определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{I_0}{I'_1} 100\%$$

В зависимости от значения допускаемых погрешностей трансформаторы тока подразделяют на пять классов точности: 0,2; 0,5; 1; 3 и 10. Приведенные цифры соответствуют допускаемой для данного класса погрешности при номинальном значении тока. Трансформаторы тока, используемые в релейной защите, имеют два класса точности: 5Р и 10Р. Полная погрешность первых не должна превышать 5%, вторых – 10%. Угловая погреш-



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

ность δ не должна превышать 7 электрических градусов.

Построим векторную диаграмму ИТТ (рис.3.4). Построение начинается с вектора вторичного тока \dot{I}_2 , направление которого выбирается произвольно (в нашем случае по оси ординат). Вторичная ЭДС при вторичной активно-индуктивной нагрузке $\dot{E}_2 = R_2 \dot{I}_2 + jX_2 \dot{I}_2$ опережает вектор тока \dot{I}_2 на угол α ; а ЭДС \dot{E}_2 опережает поток $\dot{\Phi}_0 = \dot{E}_2 / (222w_2)$ – на угол 90 градусов.

Ток намагничивания \dot{I}'_0 , приведенный также к вторичной обмотке, опережает поток на угол потерь в стали γ . Первичный ток \dot{I}'_1 получают путём векторного суммирования векторов токов \dot{I}_2 и \dot{I}'_0

$$\dot{I}'_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}'_0$$

Величина вторичного тока зависит от кратности первично-

го тока $k = I_1 / I_{1ном}$ ($I_{1ном}$ – номинальный первичный ток ИТТ) и сопротивления нагрузки Z_2 .

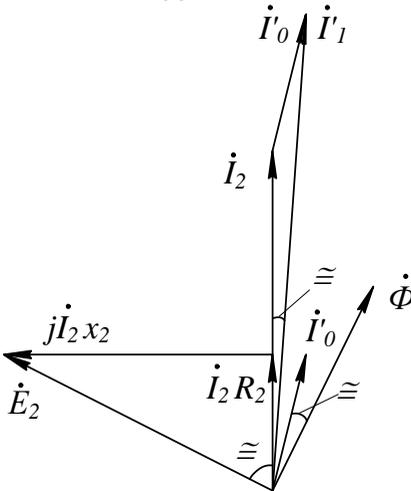


Рисунок 3.4. Векторная диаграмма трансформатора тока с активно-индуктивной вторичной нагрузкой



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

С увеличением k и Z_2 вторичный ток уменьшается по сравнению со значением I'_1 из-за увеличения намагничивающего тока I'_0 . Допустимая погрешность трансформации обеспечивается работой ИТТ в режиме, близком к короткому замыканию вторичной обмотки w_2 , т.е. с небольшим Z_2 . При размыкании вторичной обмотки $I'_1 = I'_0$ поток Φ_0 резко возрастает и мгновенные значения ЭДС во вторичной обмотке e_2 могут оказаться недопустимо большими (рис.3.5), что может вызвать пробой изоляции обмотки w_2 и выход из строя ИТТ.

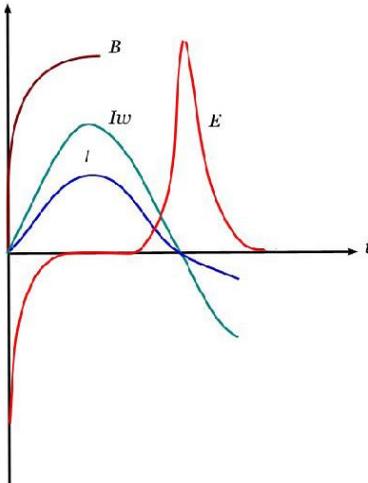


Рисунок 3.5. Кривые изменение во времени тока, ампервитков, индукции и ЭДС у трансформатора тока с разомкнутой вторичной обмоткой

Согласно нормативным требованиям, погрешность трансформаторов тока в режиме работы защиты не должна превышать 10%.

Рекомендуется следующий порядок выбора трансформаторов тока:

1. Определяется рабочий ток защищаемого объекта $I_{раб}$.

Поэтому при протекании тока по первичной обмотке ИТТ вторичную обмотку нельзя размыкать. При необходимости замены измерительного прибора или реле вторичная обмотка ИТТ предварительно накоротко замыкается (или шунтируется обмотка реле, прибора).



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

2. По найденному значению тока и номинальному напряжению выбирается трансформатор тока.

3. Определяется максимально возможное значение тока повреждения защищаемого объекта $I_{k \max}$.

4. Рассчитывается кратность тока короткого замыкания как отношение

$$k = \frac{I_{k \max}}{I_{раб}}$$

5. Заводы–изготовители ТТ приводят кривые предельной кратности $K_{10} = f(Z_{н.доп})$, которые применяются для определения допустимой нагрузки $Z_{н.доп}$. Предельной кратностью K_{10} называется кратность, при которой $\varepsilon = 10\%$ при заданной нагрузке. На основании технической документации поставщика оборудования или справочных материалов и найденной кратности первичного тока определяется допустимая нагрузка $Z_{н.доп}$ для выбранного трансформатора тока.

6. Рассчитывается фактическая нагрузка трансформаторов тока $Z_{н.факт}$ и сравнивается с допустимой.

7. Если $Z_{н.доп} \geq Z_{н.факт}$ считается, что трансформатор тока удовлетворяет требованиям точности и его можно использовать для данной схемы защиты.

Если $Z_{н.доп} < Z_{н.факт}$, то необходимо принять меры для уменьшения нагрузки. В качестве таких мер можно назвать следующие:

- выбор трансформатора тока с увеличенным значением коэффициента трансформации;
- увеличение сечения контрольного кабеля;
- использование вместо одного трансформатора тока группу трансформаторов, соединённых последовательно.

Фактическую нагрузку трансформаторов тока можно считать по выражению:

$$Z_{н.факт} = Z_p + Z_{np} + Z_{каб} + Z_{нер},$$

где Z_p – сопротивление реле; Z_{np} – сопротивление



ние приборов; $Z_{каб}$ – сопротивление контрольного кабеля; $Z_{пер}$ – сопротивление переходных контактов. Сложение полных и активных сопротивлений для упрощения расчётов допускается производить арифметически. В трёхфазной сети необходимо дополнительно учесть схему соединения трансформаторов тока и вид короткого замыкания.

На рис. 3.6 показан внешний вид трансформаторов тока.

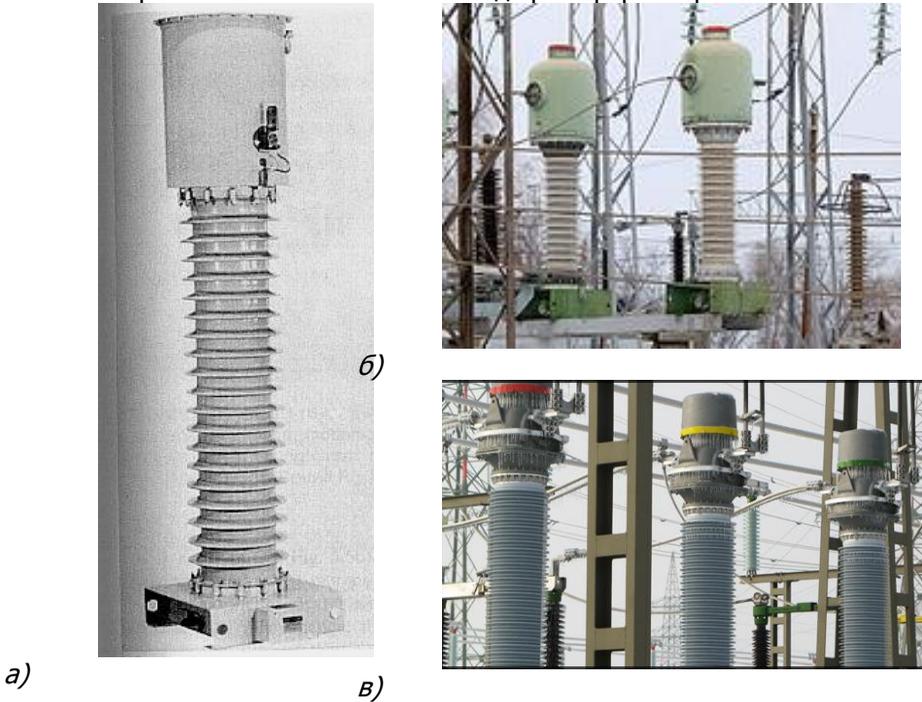


Рисунок 3.6. Трансформаторы тока: а) трансформатор тока на напряжение 220 кВ; б) элегазовые трансформаторы тока ТГФМ-110; в) трансформаторы тока с масляной изоляцией типа AGU от 110 до 750 кВ

Трансформаторы тока для внутренней установки до 35 кВ имеют литую эпоксидную изоляцию.

По типу первичной обмотки различают катушечные (на напряжение до 3 кВ включительно), одновитковые и многovitковые трансформаторы. На рис. 3.7 показано схематическое выполнение сердечников и обмоток, а на рис. 3.8 конструкция трансформатора тока ТПОЛ-10 (проходной, одновитковый с литой изо-

лящей на 10 кВ).

В этих трансформаторах токоведущий стержень, проходящий через сердечники, является одним витком первичной обмотки. Одновитковые трансформаторы изготавливаются на первичные токи 600 А и более; при меньших токах МДС первичной обмотки

$I_1 w_1$ оказывается недостаточной для работы с необходимым классом точности. Трансформатор ТПОЛ-10 имеет два магнитопровода, на каждый из которых намотана своя вторичная обмотка.

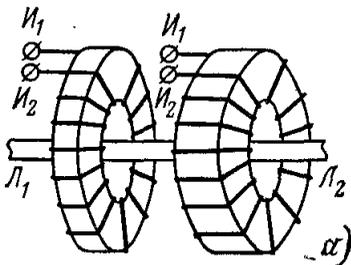


Рисунок 3.7. Трансформатор тока ТПОЛ-10: расположение магнитопровода с обмотками

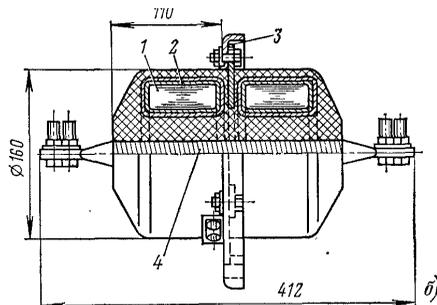


Рисунок 3.8. Трансформатор тока ТПОЛ-10: 1 – магнитопровод, 2 – вторичная обмотка, 4 – стержень первичной обмотки

Рассматриваемый трансформатор тока в распределительном устройстве выполняет одновременно роль проходного изолятора.

На большие номинальные токи применяются трансформаторы тока, у которых, роль первичной обмотки выполняет шина, проходящая внутри трансформатора, например ТТ типа ТШЛ-20 (шинный с литой изоляцией, на 20 кВ и токи 6000 – 18000 А).

В установках 10 кВ на номинальные токи 2000 – 5000 А применяют проходные шинные ТТ типа ТПШЛ.

Для наружной установки выпускаются трансформаторы тока опорного типа в фарфоровом корпусе с бумажно-масляной изоляцией типа ТФН (рис.3.9). В полном фарфоровом изоляторе, заполненном маслом, расположены обмотки и магнитопровод трансформатора. Конструктивно первичная и вторичная обмотки напоминают два звена цепи.

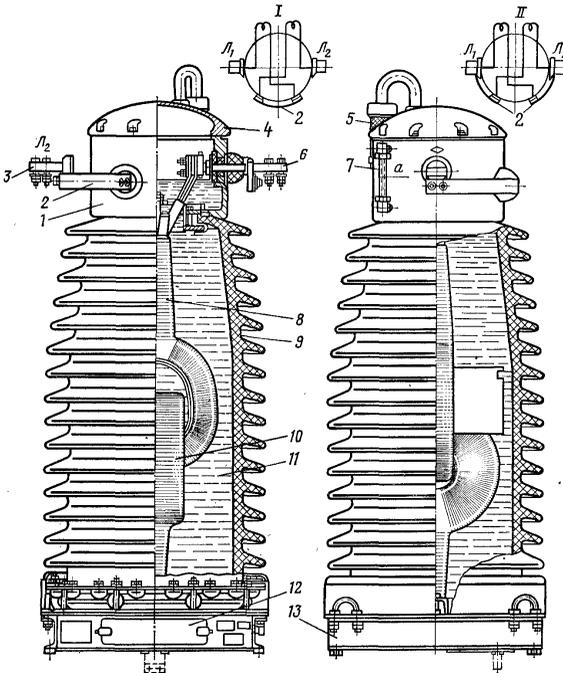
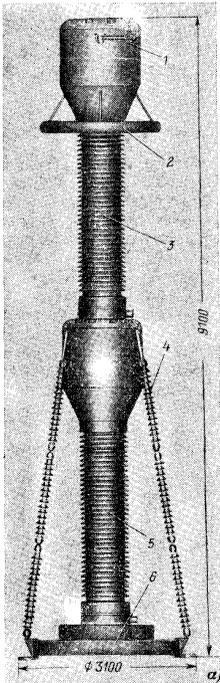


Рисунок 3.9. Трансформатор тока ТФН: 8 – первичная обмотка, 10 – магнитопровод с вторичной обмоткой

Трансформаторы тока ТФН имеют один магнитопровод с одной обмоткой для измерений и два – три магнитопровода с обмотками для релейной защиты.

Чем выше напряжение, тем труднее изготовить изоляцию первичной обмотки, поэтому на напряжение 330 кВ и выше выпускаются трансформаторы каскадного типа. Наличие двух каскадов трансформации (двух сердечников с обмотками) позволяет выполнить изоляцию обмоток каждой ступени не на полное напряжение, а на половину его. На рис.3.10 показаны внешний вид (а) и схема обмоток каскадного (б) ТТ ТРН – 750.



Каждая ступень трансформатора конструктивно самостоятельна. Первичная обмотка верхней ступени состоит из двух секций для изменения коэффициента трансформации.

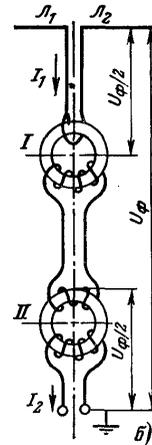


Рисунок 3.10. Трансформатор тока ТРН-750

Вторичных обмоток четыре: одна для измерений и три для релейной защиты.

Двойная трансформация усложняет конструкцию трансформатора тока и приводит к увеличению погрешности работы.

3.3. Схемы соединения трансформаторов тока и цепей тока защиты

При выполнении релейной защиты схемы цепей тока строятся так, чтобы была обеспечена необходимая её чувствительность при использовании наименьшего количества оборудования. По числу фаз, в которые включены используемые в схеме ТТ, различают: трёхфазные схемы (ТТ включены в три фазы) и двухфазные (ТТ включены в две фазы), которые могут использоваться лишь от многофазных КЗ. Для обеспечения безопасности работы обслуживающего персонала вторичную обмотку заземляют.

На рис.3.11. представлены наиболее распространённые схемы соединения обмоток ТТ.

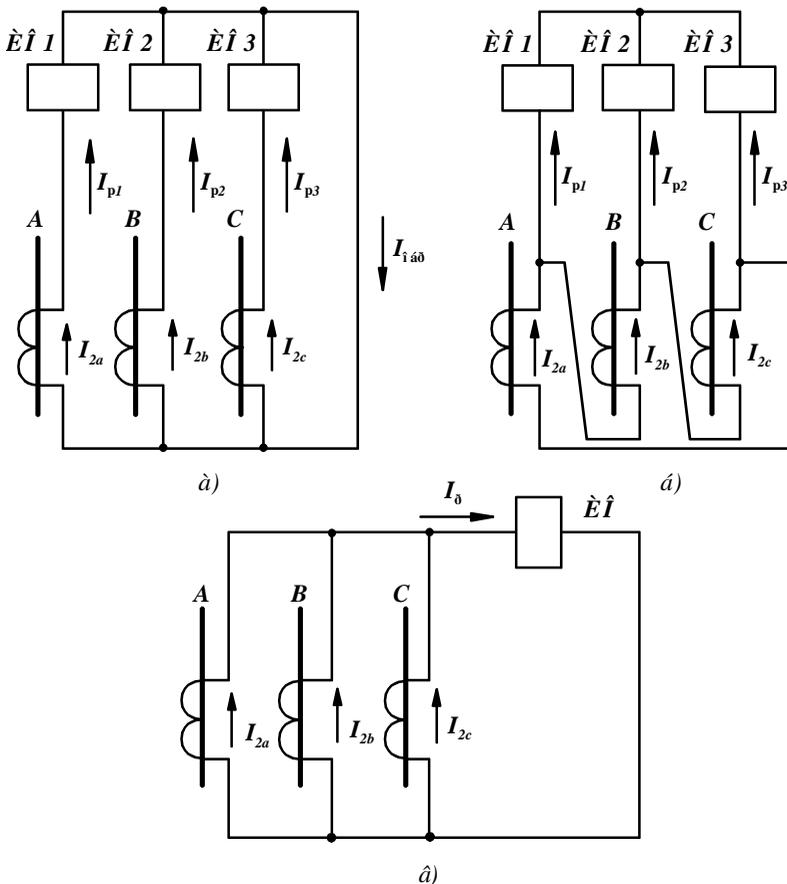


Рис. 3.11. Схемы соединений трансформаторов тока и реле:

а – полная звезда; *б* – полный треугольник с тремя реле; *в* – фильтр тока нулевой последовательности

Схема полной звезды – трёхфазная, трёхрелейная (рис. 3.11, *а*) – может быть использована от всех видов многофазных и однофазных КЗ.

Измерительные органы (ИО) включены на вторичные токи фаз, в обратном проводе проходит ток

$$\dot{I}_{обp} = \dot{I}_{2a} + \dot{I}_{2b} + \dot{I}_{2c},$$

равный $3\dot{I}_0$ при КЗ на землю. Если ТТ и измерительный орган в фазе В не устанавливается, то получаем схему неполной звезды в



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

двухрелейном исполнении.

Данная схема применяется в сетях 6–35 кВ и даёт возможность фиксировать все междуфазные КЗ. Измерительные органы включены на токи фаз

$\dot{I}_{p1} = \dot{I}_{2a}$, $\dot{I}_{p2} = \dot{I}_{2c}$. В обратном проводе проходит ток $\dot{I}_{обп} = \dot{I}_{2a} + \dot{I}_{2c} = -\dot{I}_{2b}$.

Соединение трансформаторов тока полным треугольником – трёхфазная трёхрелейная (рис. 3.11, б). Она может быть использована для фиксации всех многофазных и однофазных КЗ. Измерительные органы схемы включены на разность токов фаз:

$$\dot{I}_{p1} = \dot{I}_{2a} - \dot{I}_{2b}, \quad \dot{I}_{p2} = \dot{I}_{2b} - \dot{I}_{2c}, \quad \dot{I}_{p3} = \dot{I}_{2c} - \dot{I}_{2a}.$$

Данная схема широко применяется в защитах с абсолютной селективностью – дифференциальных защитах силовых трансформаторов. Схема обладает тем свойством, что при КЗ на землю в питающей сети токи нулевой последовательности, обусловленные заземлённой нейтралью силового трансформатора, замыкаются в треугольнике ТТ и отсутствуют в измерительных органах. Это позволяет не отстраивать дифференциальную защиту силового трансформатора от этих токов при внешних КЗ.

Схема соединения трансформаторов тока в фильтр токов нулевой последовательности (рис. 3.11, в). Трансформаторы тока устанавливаются на трёх фазах, одноимённые зажимы вторичных обмоток соединяются параллельно, и к ним подключается обмотка измерительного органа. Ток в измерительном органе равен геометрической сумме вторичных токов трёх фаз:

$$\dot{I}_{p1} = \dot{I}_{2a} + \dot{I}_{2b} + \dot{I}_{2c} = 3\dot{I}_0.$$

Рассмотренная схема является фильтром токов нулевой последовательности. Ток в измерительном органе появляется только при одно- и двухфазных КЗ на землю. Поэтому схема применяется в защитах от КЗ на землю.

3.4. Измерительные трансформаторы напряжения

ИТН выполняют в виде двухобмоточного понижающего трансформатора. Схема подключения однофазного трансформатора напряжения показана на рис. 3.12. Для обеспечения безопасности работы обслуживающего персонала вторичную обмотку заземляют. Условное обозначение трансформатора напряже-



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

ния такое же, как двухобмоточного трансформатора.

Первичная обмотка w_1 , имеющая большое число витков (несколько тысяч), подключается параллельно силовой сети, к вторичной обмотке w_2 подключаются измерительные приборы, цепи защит и сигнализации.

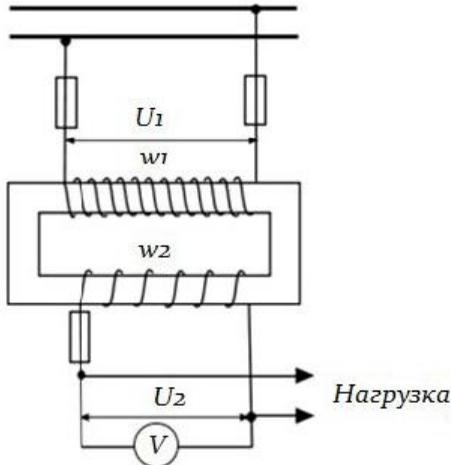


Рисунок 3.12. Схема включения однофазного трансформатора напряжения

Особенностью работы ИТН является режим близкий к холостому ходу его вторичной цепи. Первичная обмотка ИТН с числом витков w_1 включается на напряжение сети U_1 . В режиме холостого хода под действием напряжения U_1 по обмотке w_1 протекает намагничивающий ток I_0 , создающий в магнитопроводе магнитный поток Φ_0 . Магнитный поток, в свою очередь, наводит в первичной w_1 и вторичной w_2 обмотках ЭДС с действительными значениями соответственно

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_0 \quad \text{и} \quad E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_0$$

Откуда получаем следующее отношение:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = k_U,$$

где k_U – коэффициент трансформации ИТН.



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

В режиме холостого хода ток $I_2 = 0$, а ток в первичной обмотке равен току намагничивания $I_1 = I_0$. При этом $U_2 = E_2$ и напряжение U_1 незначительно отличается от ЭДС E_1 . Следовательно,

$$k_U = \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_1}{U_2}.$$

Работа ИТН с нагрузкой Z_2 сопровождается протеканием тока I_2 и увеличением (по сравнению с холостым ходом) тока I_1 . Появление тока во вторичной обмотке увеличивает первичный ток по сравнению с током холостого хода на величину, пропорциональную вторичному току ($I_2 w_2 / w_1$). Вторичный ток как бы проходит через первичную цепь с соответствующим пересчётным множителем w_2 / w_1 .

Эти токи создают падение напряжения ΔU в первичной и вторичной обмотках, вследствие чего $\dot{U}_2 = \dot{U}'_1 - \Delta U$ (U'_1 – напряжение первичной обмотки, приведенное к вторичной). Таким образом, вторичное напряжение U_2 отличается от приведенного первичного U'_1 по значению на ΔU и по фазе на угол δ . Поэтому ИТН характеризуется двумя погрешностями: погрешность напряжения в %

$$f_U = \frac{\Delta U}{U'_1} 100\%$$

и угловую погрешность, которая определяется углом δ между векторами напряжений \dot{U}_1 и \dot{U}_2 .

На рис. 3.13 показана маркировка зажимов ИТН (а), его T-образная схема замещения (б) и векторная диаграмма (в). Векторная диаграмма строится также как, и для однофазного трансформатора.

В зависимости от значения допускаемых погрешностей ИТН по ГОСТ 1983 – 77Е установлены четыре класса точности:



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

0,2; 0,5; 1 и 3 соответственно погрешностям напряжения f_U в процентах. Обозначение класса соответствует значению относительной погрешности при номинальном напряжении $U_{НОМ}$. Номинальная мощность трансформатора отнесена к определённому классу точности. Однако по условиям нагрева он может допускать перегрузки в несколько раз, выходя при этом из заданного класса точности.

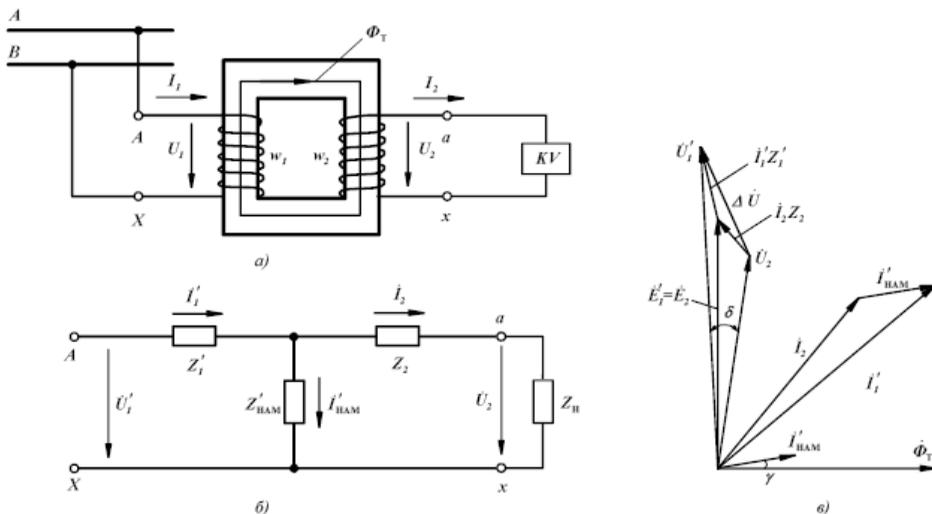


Рисунок 3.13. Маркировка зажимов ИТН (а), его T-образная схема замещения (б) и векторная диаграмма (в)

На рис. 3.14 показан внешний вид трансформаторов напряжения.



а)



б)

Рисунок 3.14. Трансформаторы напряжения: а) трансформатор напряжения серии НТМИ-6, НТМИ-10; б) трёхфазные антирезонансные группы трансформаторов напряжения 3хЗНОЛ.06

На подстанциях с напряжениями 110-500 кВ применяются каскадные трансформаторы напряжения серии НКФ. В каскадном трансформаторе напряжения обмотка ВН делится на части, размещаемые на разных стержнях одного или нескольких магнитопроводов, что облегчает её изоляцию. Так, у трансформатора напряжения типа НКФ-110 обмотка ВН разделена на две части (ступени), каждая из которых размещается на противоположных стержнях двухстержневого магнитопровода. Магнитопровод соединён с серединой обмотки BH и находится по отношению к земле под потенциалом $U_{\phi}/2$, благодаря чему обмотка BH изолируется от магнитопровода только на $U_{\phi}/2$, что существенно уменьшает размеры и массу трансформатора.

Наряду с обычными электромагнитными трансформаторами напряжения для питания измерительных приборов и релейной защиты применяют ёмкостные делители напряжения. Они получили распространение на линиях электропередачи напряжением 500 кВ и выше.

Делитель (рис.3.15) представляет два конденсатора C_1 и C_2 . Напряжение на конденсаторах делится обратно пропорционально величинам их ёмкостей. Ёмкость конденсатора C_2 примерно на порядок больше ёмкости конденсатора C_1 . Поэтому ток текущий по цепочке, будет определяться величиной ёмкости конденсатора C_1 . Напряжение снимается с C_2 . Величина напряжения 10...15, кВ. Оно подаётся на трансформатор, имеющий две вторичные обмотки. Обмотки соединяются по такой же схеме, как и у трансформаторов НКФ или ЗНОМ.



Для увеличения точности измерения в цепь первичной обмотки трансформатора включается дроссель. Если трансформатор включить на конденсатор C_2 без дросселя, то с увеличением нагрузки уменьшится входное сопротивление трансформатора, и, соответственно, уменьшится напряжение. Следовательно, напряжение на нагрузке зависит от её величины. Поэтому дроссель настраивается на резонанс с ёмкостью $C_1 + C_2$ при частоте $f = 50$ Гц. В результате выходное напряжение будет мало зависеть от величины нагрузки. Такое устройство получило название ёмкостного трансформатора напряжения НДЕ. При соответствующем выборе всех элементов настройки схемы устройства НДЕ могут быть выполнены на класс точности 0,5 и выше.

В НДЕ фазное напряжение между конденсаторами последовательной цепи распределяется пропорционально их ёмкостным сопротивлениям. К последнему конденсатору со стороны заземления параллельно части фазного напряжения подключается ИТН.

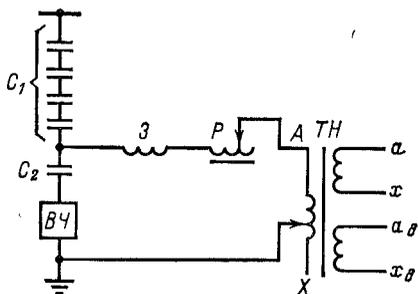


Рисунок 3.15. Схема ёмкостного трансформатора напряжения

В конструкциях баковых выключателей в качестве НДЕ используется конденсаторный ввод ВН, к обкладкам которого со стороны заземления подключается навешиваемый снаружи на аппарат ПИН (прибор измерения напряжения).

Для установок 750 и 1150 кВ применяются трансформаторы НДЕ-750 и НДЕ-1150.

3.5. Схемы соединения обмоток трансформаторов напряжения

Измерительные органы, в частности реле напряжения, включаются на фазные и междуфазные напряжения, а также на напряжения нулевой и обратной последовательностей. Для получения этих напряжений применяются однофазные или трёхфазные ТН.

В зависимости от требуемой информации однофазные трансформаторы могут соединяться в различные схемы

(рис.3.16).

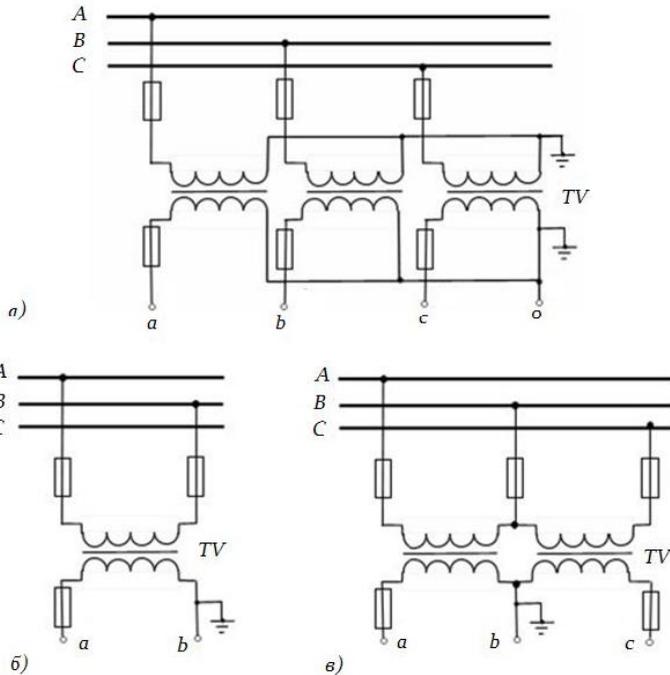


Рисунок 3.16. Схемы соединения однофазных трансформаторов напряжения

На рис.3.16, *а* приведено соединение трёх трансформаторов напряжения в схему звезды. Эта схема используется для получения информации о фазных или междуфазных напряжениях.

Для получения одного междуфазного напряжения используется схема, представленная на рис.3.16, *б*; для получения двух или трёх междуфазных напряжений применяется схема неполной звезды (рис.3.16, *в*).

Типовая схема соединений обмоток однофазных трёхобмоточных трансформаторов напряжения показана на рис. 3.17.

Для измерения фазных и междуфазных напряжений первичные обмотки этих ТН соединены в звезду с заземлением нейтрали, которое называется рабочим заземлением. Основные вторичные обмотки ТН также соединены в звезду с заземлением нейтрали. Данное заземление нейтрали называется защитным.

Напряжения отдельных последовательностей можно выделить из полных фазных напряжений посредством фильтров напряжений симметричных составляющих. Так, для получения напряжения нулевой последовательности первичные обмотки ТН



должны соединяться в звезду с заземлённой нейтралью.

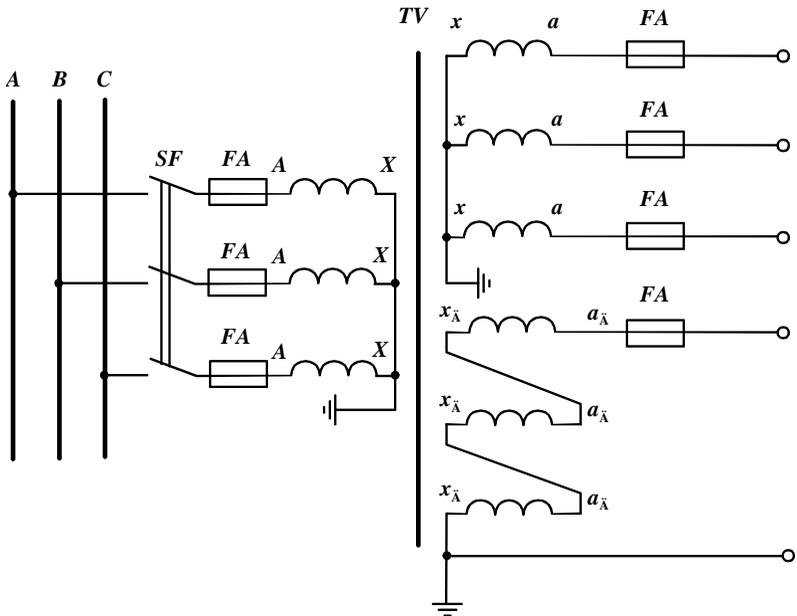


Рисунок 3.17. Типовая схема соединений обмоток однофазных трёхобмоточных трансформаторов напряжения

Полученные при этом вторичные фазные напряжения суммируются путём соединения дополнительных вторичных обмоток в разомкнутый треугольник с выполнением защитного заземления.

Напряжение на обмотке реле составит:

$$\dot{U}_p = (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) / K_U = 3\dot{U}_0 / K_U$$

При отсутствии в полных фазных напряжениях составляющих нулевой последовательности напряжение на выходе разомкнутого треугольника близко к нулю. Отметим, что напряжение небаланса не превышает $U_{нб} = 3 - 4$ В, а максимальное напряжение на зажимах фильтра $3U_{0\max} = 100$ В.

В системах с заземлённой нейтралью напряжение на зажимах разомкнутого треугольника при замыкании на землю не



превышает фазное U_{ϕ} , а в системах с изолированной нейтралью оно может достигать $3U_{\phi}$. Поэтому номинальное вторичное фазное напряжение обмоток, соединённых в разомкнутый треугольник, принимается равным $U_{2ном} = 100$ В, если ТН устанавливается в системе с заземлённой нейтралью, и равным $U_{2ном} = 100/\sqrt{3}$ В, если ТН устанавливается в системе с изолированной нейтралью.

Исходя из требований техники безопасности помимо защитных заземлений вторичных обмоток с первичной и вторичной сторон ТН устанавливаются предохранители FA .

3.6. Фильтры симметричных составляющих

Для повышения чувствительности релейной защиты, а также для уменьшения количества измерительных органов (реле) применяются фильтры симметричных составляющих тока и напряжения. Это могут быть как фильтры отдельных последовательностей (прямой, обратной, нулевой), так и комбинированные фильтры, выходное напряжение (ток) которых пропорционально некоторой комбинации симметричных составляющих (обычно двух).

Реализация фильтров симметричных составляющих основана на применении активно-реактивных звеньев, выбранных с таким расчётом, чтобы при номинальной частоте напряжение (ток) на выходе было пропорционально напряжению (току) какой-либо последовательности одной из фаз и сдвинуто относительно него на постоянный угол. Исключение составляют фильтры токов или напряжений нулевой последовательности, которые осуществляют простое алгебраическое сложение фазных токов или напряжений, и поэтому их выходные величины не зависят от частоты сети.

В устройствах релейной защиты с электромеханическими и полупроводниковыми реле наибольшее распространение получили активно-ёмкостные фильтры напряжения обратной последовательности (ФНОП) и активно-индуктивные фильтры тока обратной последовательности (ФТОП).

Схема фильтра напряжения обратной последовательности показана на рис. 3.18.

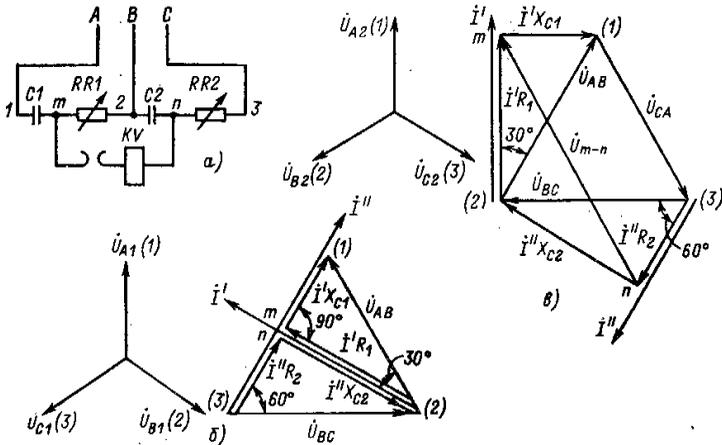


Рисунок 3.18. Схема фильтра напряжения обратной последовательности:

a – схема фильтра; *б* – векторная диаграмма фильтра при подаче на вход напряжения прямой последовательности; *в* – векторная диаграмма фильтра при подаче на вход напряжения обратной последовательности

Рассмотрим поведение данного фильтра при подаче на его входные зажимы напряжений разных последовательностей. Анализ работы фильтра обычно проводится в режиме холостого хода, когда нагрузка к его выходным зажимам не подключена. Если фильтр напряжения будет правильно работать в режиме холостого хода, то подключение нагрузки приведёт лишь к изменению абсолютного значения выходного напряжения, не искажая основных соотношений, характеризующих его работу.

Напряжение нулевой последовательности имеет одинаковую величину и направление векторов во всех фазах. Поэтому все входные зажимы фильтра, к которым в порядке электрического чередования подключены фазы напряжений *A*, *B*, *C*, будут иметь одинаковый потенциал. Таким образом, напряжение на выходе ФНОП, определяемое разностью потенциалов на зажимах реле, при подаче на вход фильтра напряжения нулевой последовательности будет равно нулю.

Под действием системы напряжений прямой последовательности $\dot{U}_{A1}, \dot{U}_{B1}, \dot{U}_{C1}$, подведённым соответственно к входным зажимам фильтра *1*, *2*, *3*, по его резисторам и конденсаторам будут протекать токи. Соотношения между элементами



ФНОП определяются выражениями

$$R_1 = \sqrt{3}X_{C1}; \quad R_2 = \frac{X_{C1}}{\sqrt{3}}.$$

Векторная диаграмма токов и напряжений для этого случая показана на рис. 3.18, б. Как видно из диаграммы, выходные зажимы фильтра m и n имеют одинаковый потенциал. Таким образом, при подаче на вход ФНОП напряжения прямой последовательности, напряжение на выходе фильтра равно нулю.

Векторная диаграмма, характеризующая работу фильтра при подаче на его вход напряжения обратной последовательности, показана на рис. 3.18, в. В этом случае векторная диаграмма напряжений изменяется, так как изменяется чередование фазных

напряжений на входе фильтра $\dot{U}_{A2}, \dot{U}_{B2}, \dot{U}_{C2}$, подведённых соответственно к зажимам $1, 2, 3$. При этом между зажимами m и n появляется большое напряжение, пропорциональное значению напряжению обратной последовательности на входе ФНОП.

Таким образом, при подаче на входные зажимы ФНОП напряжений прямой и нулевой последовательностей напряжение на выходе фильтра равно нулю (в действительности будет незначительное напряжение небаланса), а при подаче на вход напряжения обратной последовательности – величина напряжения на выходе фильтра пропорциональна входному напряжению. Следовательно, ФНОП выделяет из полного напряжения, поданного на его вход, напряжения обратной последовательности, не пропуская напряжений других последовательностей.

Схема фильтра тока обратной последовательности, используемого в реле РТФ-1М, приведена на рис. 3.19, а. В отличие от напряжения, для протекания тока всегда должен быть замкнутый путь, поэтому на рисунке показан не только фильтр тока, но и его нагрузка.

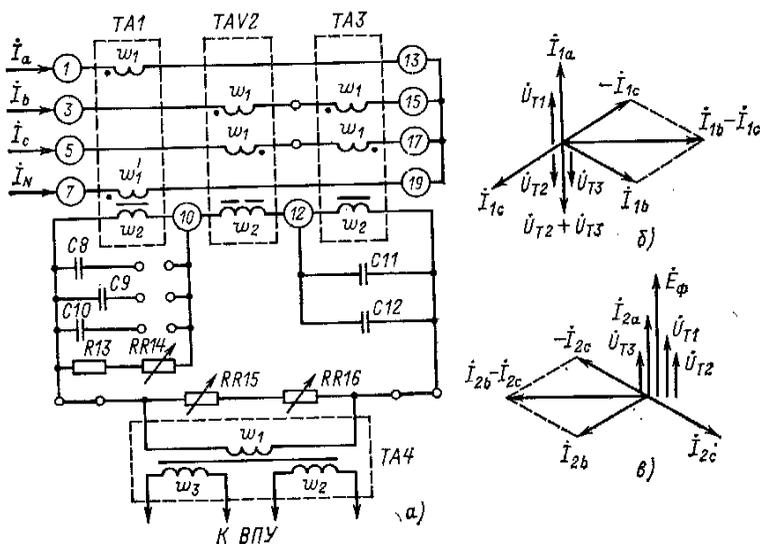


Рисунок 3.19. Схема фильтра тока обратной последовательности:

а – схема фильтра; *б* – векторная диаграмма фильтра при подаче на вход тока прямой последовательности; *в* – векторная диаграмма фильтра при подаче на вход тока обратной последовательности

Реле состоит из активно–трансформаторного фильтра, выпрямительного моста и исполнительного органа. В фильтр входят трансформатор тока *ТА* и трансреактор *ТАУ*, каждый из них имеет по две первичные обмотки, включаемые для компенсации токов нулевой последовательности на разность токов двух фаз.

По первичным обмоткам *ТА* проходит разность токов $\dot{I}_c - \dot{I}_a$, по первичным обмоткам *ТАУ* – разность токов $\dot{I}_b - \dot{I}_c$. К вторичной обмотке *ТА* подключён регулируемый резистор *RR15*, падение напряжения на котором пропорционально разности токов и совпадает с ней по фазе:

$$\dot{U}_{R1} = k_I (\dot{I}_c - \dot{I}_a) R_{15},$$

где k_I – коэффициент трансформации *ТА*.

Вторичная обмотка также замкнута на регулируемы резистор *RR16*, падение напряжения на котором про-



порционально разности токов $\dot{I}_b - \dot{I}_c$ и опережает её по фазе на угол 60 градусов.

Поскольку токи нулевой последовательности во всех фазах одинаковы по величине и направлению, разность токов нулевой последовательности двух фаз будет равна нулю. Поэтому во вторичных обмотках TA и TAV могут проходить только токи прямой и обратной последовательностей.

На рис.3.19, б приведена векторная диаграмма токов и напряжений при подаче на вход фильтра системы токов прямой последовательности. Как видно из диаграммы напряжения

\dot{U}_{R1} и \dot{U}_{R2} противоположны по фазе и равны по величине. Ток на выходе ФТОП при этом будет равен нулю.

Векторная диаграмма фильтра при подаче на его вход системы токов обратной последовательности приведена на рис.3.19, в. В этом случае равные значения напряжений на резисторах $RR15$ и $RR16$ сдвинуты по фазе на угол 60 градусов, а

их сумма равна \dot{E}_ϕ , пропорциональная значению тока обратной последовательности на входе ФТОП.

Для современных полупроводниковых защит используются активные фильтры симметричных составляющих на основе операционных усилителей, для микропроцессорных – осуществляется программная реализация таких фильтров.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Измерительные трансформаторы тока, назначение.
2. Конструкция ИТТ.
3. Основные характеристики ИТТ. Погрешности работы. Классы точности трансформатора напряжения.
4. Схемы включения ИТТ.
5. Векторная диаграмма ИТТ.
6. Каскадные трансформаторы тока.
7. Измерительные трансформаторы напряжения, назначение.
8. Конструкция ИТН. Векторная диаграмма.
9. Основные характеристики ИТН. Погрешности работы. Классы точности трансформатора напряжения.
10. Каскадные трансформаторы напряжения.



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

11. Ёмкостные делители напряжения.
12. Схемы включения ИТН. Основные характеристики.
13. Фильтры симметричных составляющих. Назначение и принципы построения.
14. Фильтры напряжений и токов нулевой последовательности.
15. Фильтр напряжений обратной последовательности.
16. Фильтр токов обратной последовательности.
17. Определение предельной кратности тока K_{10} . При каких условиях допускается полная погрешность $\varepsilon = 10\%$?
18. Почему трансформатор тока должен работать в режиме, близком к короткому замыканию его вторичной обмотки?
19. Почему трансформатор напряжения должен работать в режиме близком к холостому ходу?



4. МАКСИМАЛЬНЫЕ ТОКОВЫЕ ЗАЩИТЫ

4.1. Принцип действия защиты

Принцип действия максимальной токовой защиты основан на фиксации увеличения тока при возникновении короткого замыкания. Структурная схема максимальной токовой защиты, выполняющей функции защиты линии показана на рис.4.1.

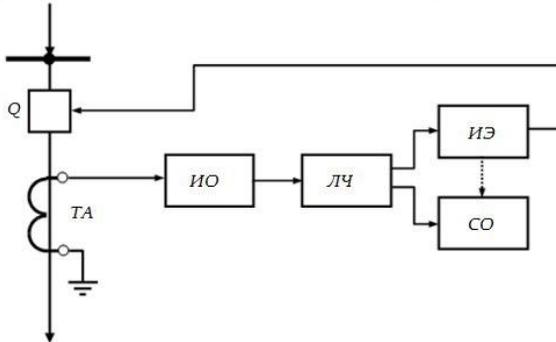


Рисунок 4.1. Структурная схема максимальной токовой защиты

Ток защищаемого объекта контролируется измерительным (пусковым) органом защиты *ИО*. Пусковой орган срабатывает, если

контролируемая величина тока $I_{\text{контр}}$ становится больше максимально возможного рабочего значения $I_{\text{раб\max}}$

$$I_{\text{контр}} > I_{\text{раб\max}}$$

Хотя любое короткое замыкание сопровождается увеличением тока, фиксация данного признака не позволяет сделать однозначного вывода о повреждении объекта.

Пусть линии сетевого участка, представленного на рис.4.2, оборудованы максимальной токовой защитой.



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

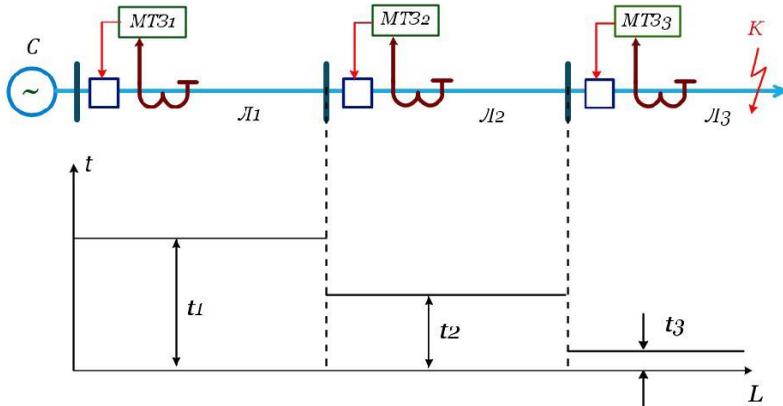


Рисунок 4.2. Выбор выдержек времени МТЗ

При возникновении короткого замыкания на линии $L3$ в точке K ток повреждения проходит по всем линиям и вызывает срабатывание пусковых органов всех трёх защит. Однако по условию селективности должна быть подана команда только на отключение выключателя Q^3 ($MTЗ3$). Требование селективности обеспечивает логическая часть $ЛЧ$ путём создания задержки на срабатывание, выбираемой по следующему правилу. Защита, ближайшая к месту повреждения, должна иметь минимальное время срабатывания. По мере удаления от места повреждения выдержки времени защит увеличиваются на величину Δt , называемую ступенью селективности. Для приведенной схемы

$$t_3 \approx 0; \quad t_2 = t_3 + \Delta t; \quad t_1 = t_2 + \Delta t.$$

Степень селективности учитывает время отключения выключателей, погрешности элемента задержки на срабатывание; обычно Δt принимается равной, 0,5 с.

Исполнительный элемент $ИЭ$ воспринимает сигнал логической части и формирует команду на отключение выключателя. Сигнальный орган $СО$ фиксирует срабатывание защиты. Элементы максимальной токовой защиты – пусковой, логический, исполнительный, сигнальный выполняются на реле. Реле могут выполняться на электромагнитной, полупроводниковой или микропроцессорной элементной базе.



4.2. Схемы построения максимальной токовой защиты

Все электроэнергетические объекты выполняются в трёхфазном исполнении. Это обстоятельство должно быть учтено при проектировании устройств релейной защиты и, в частности, при выборе схем соединения обмоток трансформаторов тока и измерительных органов реле. Наиболее распространённые схемы рассмотрены ниже.

Для расширения зоны действия МТЗ её токовые реле включаются на ТТ, установленные ближе к шинам. Если выключатель имеет встроенные ТТ, то защита включается на ТТ, встроенные во вводы выключателя со стороны шин.

Схема полной звезды. При таком способе соединения трансформаторы тока устанавливаются на все три фазы. Во вторичную цепь каждого трансформатора тока подключаются реле, кроме того, одно реле ставится в нулевом проводе (рис.4.3).

При трёхфазном замыкании (рис.4.3, *б*) срабатывают три реле: KA_1, KA_2, KA_3 ; при двухфазном (рис.4.3, *в*) – два реле; при однофазном, (рис.4.3, *г*) – два реле.

Достоинства схемы полной звезды:

- схема полной звезды реагирует на все виды замыканий;
- схема одинаково чувствительна ко всем видам повреждений;
- схема является достаточно надёжной, так как при любом замыкании срабатывают, по крайней мере, два реле.



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

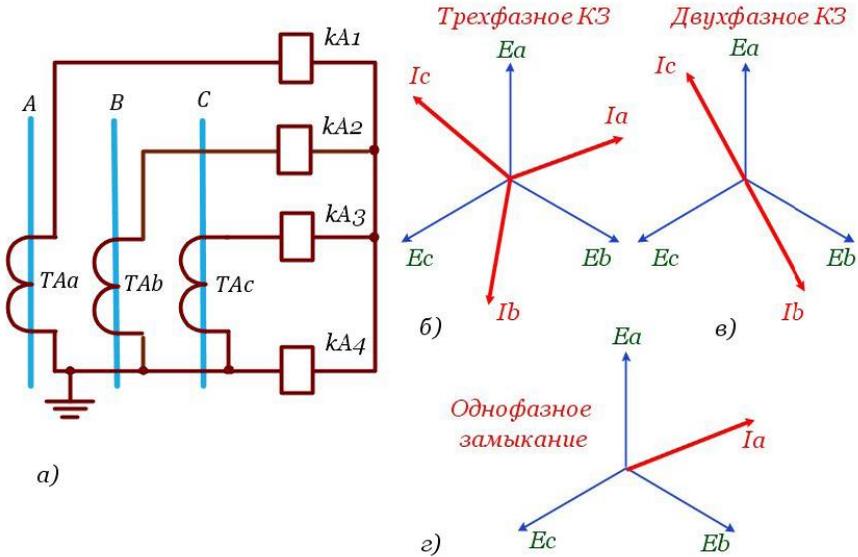


Рисунок 4.3. Соединение трансформаторов тока и реле по схеме полной звезды: а); векторные диаграммы: б) при трёхфазном замыкании; в) при замыкании фаз А и С; г) при замыкании фазы А на землю

Схема неполной звезды. Трансформаторы тока устанавливаются в двух фазах, обычно в фазах А и С (к ним подключаются реле); дополнительно, в нулевой провод устанавливается ещё одно реле (рис.4.4, а).

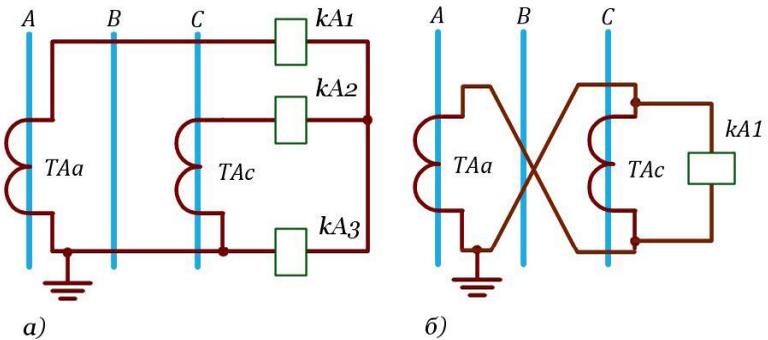


Рисунок 4.4. Соединение трансформаторов тока и реле: а) в неполную звезду; б) на разность токов двух фаз

Анализируя поведение защиты при различных видах замыканий, можно установить, что при трёхфазном замыкании ра-



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

ботают три реле, при двухфазном – два; при замыкании фазы *B* на землю защита не работает.

Особенности схемы неполной звезды:

- схема неполной звезды реагирует на все виды междуфазных замыканий;
- схема достаточно надёжна – при любом междуфазном замыкании срабатывают, по крайней мере, два реле;
- для отключения однофазных замыканий требуется установка дополнительной защиты.

Схема включения реле на разность токов двух фаз. Для реализации этой схемы трансформаторы тока устанавливаются в двух фазах, начало каждой обмотки трансформатора тока соединяется с концом другой, и параллельно обмоткам подключается реле (рис.4.4, б). Анализ поведения схемы при различных повреждениях показывает, что такое соединение позволяет выполнить защиту от всех видов междуфазных замыканий. Схема отличается экономичностью, но в то же время обладает сравнительно невысокой надёжностью – отказ реле ведёт к отказу защиты. Защита имеет разную чувствительность к различным видам междуфазных замыканий.

Схема включения реле в фильтр токов нулевой последовательности. Трансформаторы токов устанавливаются во всех трёх фазах, их вторичные обмотки соединяются между собой параллельно (рис. 4.5).

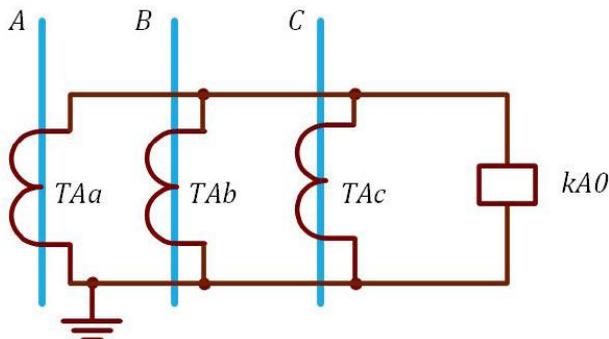


Рисунок 4.5. Соединение трансформаторов тока и реле в фильтр токов нулевой последовательности

При возникновении трёхфазного замыкания – реле не сработает. При двухфазном замыкании, например фаз *A* и *B* – ре-



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

ле не сработает. При возникновении однофазного короткого замыкания, например, фазы *A* на землю – реле сработает.

Особенности:

- схема работает только при замыканиях на землю;
- схема находит применение для защиты от замыканий на землю в сетях с глухозаземлённой нейтралью.

Пример 4.1. Выполнение схемы максимальной токовой защиты.

Полная схема максимальной токовой защиты на постоянном оперативном токе с электромеханическими токовыми реле показана на рис.4.6. Трансформаторы тока и реле соединены по схеме неполной звезды.

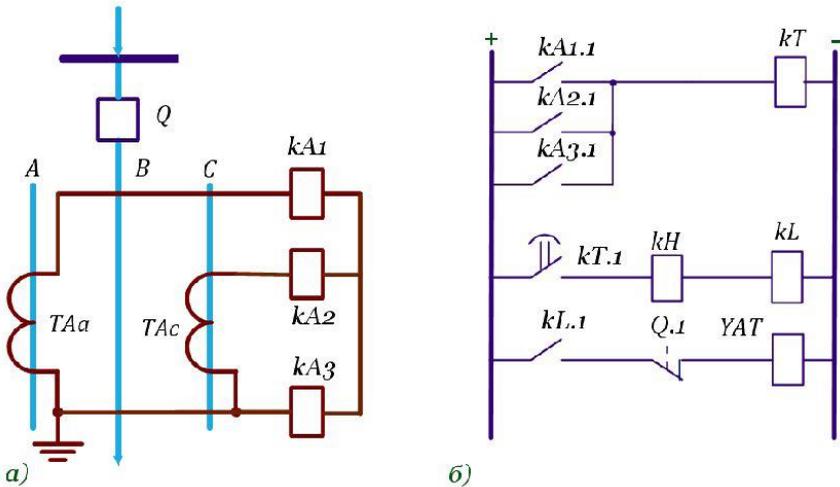


Рисунок 4.6. Схема максимальной токовой защиты:

а) схема цепей переменного тока; б) схема цепей постоянного тока

Оперативный ток используется для питания реле в схемах релейной защиты, сигнализации, управления выключателями. В качестве источников оперативного тока применяются аккумуляторные батареи, трансформаторы тока и напряжения, трансформаторы собственных нужд. Аккумуляторные батареи используются на крупных энергетических объектах, так как их применение требует специально оборудованных помещений и наличие обслуживающего персонала.

При возникновении короткого замыкания срабатывают два или три токовых реле и подают питание на реле времени *kT*.



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

Реле времени, отработав установленную выдержку, подаёт «плюс» на выходное промежуточное реле KL . Срабатывание выходного реле приводит к подаче питания через блок-контакт выключателя $Q.1$ на электромагнит отключения $УАТ$. Указательное реле $КН$ сигнализирует о срабатывании защиты.

В общем виде, без учёта конкретной элементной базы, принцип и

алгоритм работы максимальной токовой защиты можно проиллюстрировать с помощью алгебры логики (рис.4.7).

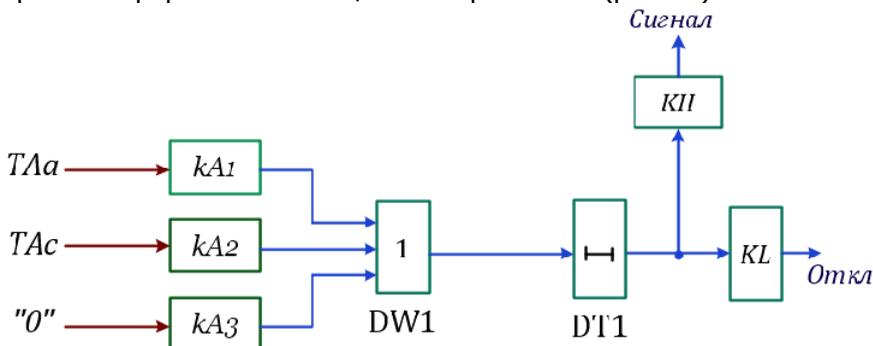


Рисунок 4.7. Алгоритм работы максимальной токовой защиты с использованием алгоритмов логики

Если поведение защиты представить в виде логической функции T , то условие срабатывания можно записать в виде

$$T = (kA_1 \vee kA_2 \vee kA_3) \wedge DT_1 \uparrow = 1$$

где kA_1, kA_2, kA_3 – логические сигналы на выходах токовых измерительных органов защиты; $DT_1 \uparrow$ – оператор временной задержки.

Пример 4.2. Расчёт параметров срабатывания максимальной токовой защиты.

Расчёт параметров максимальной токовой защиты сводится к выбору тока срабатывания (уставки срабатывания) и выдержки времени и оценке чувствительности защиты.

Выбор тока срабатывания. При выборе тока срабатывания

$I_{сз}$ нужно выполнить следующие условия:

1. Защита не должна работать от максимально возможного рабочего тока



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

$$I_{сз} > I_{раб.мах}$$

2. После отключения внешнего короткого замыкания пусковые органы

защиты должны вернуться в исходное состояние

$$I_{сз} = \frac{I_{раб.мах}}{k_{\epsilon}}$$

$$k_{\epsilon} = \frac{I_{\epsilon p}}{I_{ср}}$$

где $I_{\epsilon p}$ – коэффициент возврата реле; $I_{\epsilon p}$ – ток

возврата реле; $I_{ср}$ – ток срабатывания реле.

3. При выборе тока срабатывания необходимо учесть увеличение тока при пуске двигателей:

$$I_{сз} = \frac{k_{сз}}{k_{\epsilon}} I_{раб.мах}$$

$$k_{сз} = \frac{I_{пуск \partial}}{I_{ном \partial}}$$

где $I_{пуск \partial}$ – коэффициент самозапуска, равный отношению пускового тока двигателя $I_{пуск \partial}$ к его номинальному значению $I_{ном \partial}$. Обычно значение $k_{сз}$ находится в пределах $1 \div 4$. Точное значение определяется расчётом или задаётся в качестве исходных данных.

4. Учитывая погрешности расчёта, погрешности трансформаторов тока

и реле, выражение для тока срабатывания защиты окончательно запишется в виде:

$$I_{сз} = \frac{k_n k_{сз}}{k_{\epsilon}} I_{раб.мах}$$

где k_n – коэффициент надёжности;

$k_n = 1,15 \div 1,3$ – для полупроводниковых реле;

$k_n = 1,2 \div 1,3$ – для электромагнитных реле;



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

$k_n = 1,5$ – для индукционных реле.

Для того чтобы определить ток срабатывания реле, достаточно учесть коэффициент трансформации трансформаторов тока и схему соединения трансформаторов тока и реле:

$$I_{cp} = \frac{k_n k_{c3} k_{cx}}{k_{\epsilon} k_{mm}} I_{paб. max}$$

где k_{mm} – коэффициент трансформации трансформаторов тока; k_{cx} – коэффициент схемы, равный отношению тока в реле к вторичному току трансформатора тока.

Выбор времени срабатывания. Максимальные токовые защиты могут иметь независимую и зависимые характеристики срабатывания.

Максимальные токовые защиты с независимой характеристикой срабатывания. Для обеспечения правильной работы защит время срабатывания защиты, наиболее удалённой от источника питания, принимается минимальным. Выдержка времени каждой предыдущей увеличивается на ступень селективности Δt

$$t_n = t_{n-1} + \Delta t$$

Ступень селективности должна учитывать тип установленных выключателей и элементную базу, на основании которой выполняется задержка на срабатывание защиты и обычно составляет $\Delta t = 0,4 \div 0,6$ с.

Максимальные токовые защиты с зависимой характеристикой срабатывания. Наличие зависимой от значения тока выдержки времени позволяет повысить быстродействие и эффективность максимальной токовой защиты, например, при необходимости учёта перегрузочной характеристики оборудования (рис.4.8).

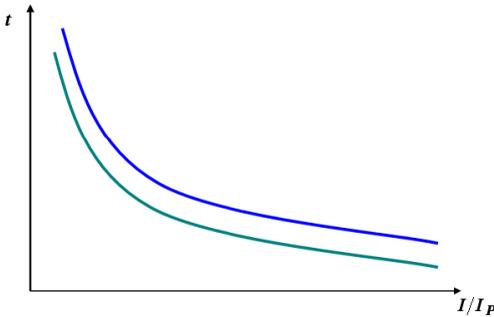


Рисунок 4.8. Характеристика времени срабатывания максимальной токовой защиты с зависимой выдержкой времени

Структура защиты практически совпадает со схемой, представленной на рис. 4.6, с заменой элемента с независимой выдержкой времени элементом с зависимым временем работы. В соответствии со стандартами *IEC* и *ANSI/IEEE* основные характеристики можно описать выражением

$$t = \left[\frac{G}{\left(\frac{I_{кз}}{I_p} \right)^\alpha - 1} + H \right] D$$

где G , α , H – коэффициенты, определяющие форму требуемой характеристики; $I_{кз}$ – ток короткого замыкания; I_p – уставка реле; D – постоянная времени.

Расчёт выдержек времени защит с зависимыми выдержками времени для сети можно проиллюстрировать на примере радиальной сети (рис.4.9).

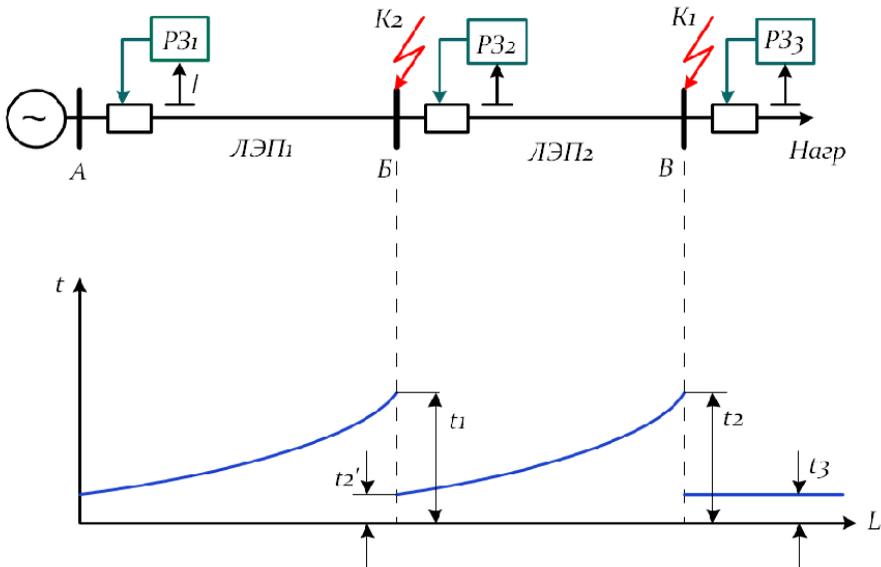


Рисунок 4.9. Согласование защит с зависимыми выдержками срабатывания

1. Рассчитывается время срабатывания защиты $PЗ_2$ исходя из условия отстройки от времени работы защиты $PЗ_3$

$$t_2 = t_3 + \Delta t$$

2. Рассчитывается значение тока трёхфазного короткого замыкания I_{K1} в точке K_1 .

3. Выбирается требуемая характеристика срабатывания измерительного органа защиты $PЗ_2$, которая бы проходила че-

рез точку с координатами $\left\{ t_2, I_{K1} / I_p \right\}$.

4. Рассчитывается значение тока трёхфазного короткого замыкания I_{K2} в точке K_2 и по выбранной характеристике определяется время t'_2 .

5. Рассчитывается время срабатывания защиты $PЗ_1$ исхо-



для из условия отстройки от времени работы защиты PZ_2

$$t_1 = t'_2 + \Delta t$$

6. Выбирается требуемая характеристика срабатывания измерительного органа защиты PZ_1 , которая бы проходила через

$$\left\{ t_1; \frac{I_{K2}}{I_p} \right\}$$

точку с координатами

Оценка чувствительности защиты. Чувствительность защиты оценивается значением коэффициента чувствительности:

$$k_u = \frac{I_{кз \min}^{(2)}}{I_{сз}}$$

где $I_{кз \min}^{(2)}$ – минимальное значение тока двухфазного короткого замыкания.

Чувствительность проверяется для двух режимов – основного и режима резервирования (рис.4.10).

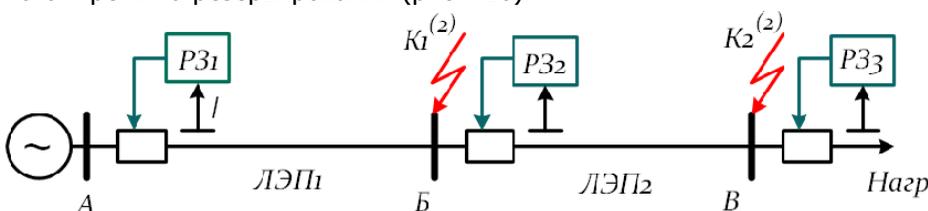


Рисунок 4.10. Оценка чувствительности защиты

Если защита PZ_1 работает как основная, то её чувствительность проверяется по короткому замыканию в конце защищаемой линии, точка K_1 .

Для максимальных токовых защит значение коэффициента чувствительности должно быть больше или равно 1.5

$$k_u = \frac{I_{кз \min(K1)}^{(2)}}{I_{сз}} \geq 1,5$$

Если защита PZ_1 работает в режиме дальнего резервирования, то чувствительность проверяется по короткому замыканию

в конце резервируемой линии, точка K_2 :



$$k_u = \frac{I_{\kappa 3}^{(2)} \min(K^2)}{I_{сз}} \geq 1,2$$

Значение коэффициента чувствительности должно быть больше или равно 1.2.

4.3 Токовая отсечка

Токовая отсечка относится к токовым защитам, реагирующим на увеличение тока. Основное её отличие от максимальной токовой защиты заключается в способе обеспечения селективности. В качестве примера рассмотрим участок сети, состоящий из двух линий с односторонним питанием (рис.4.11).

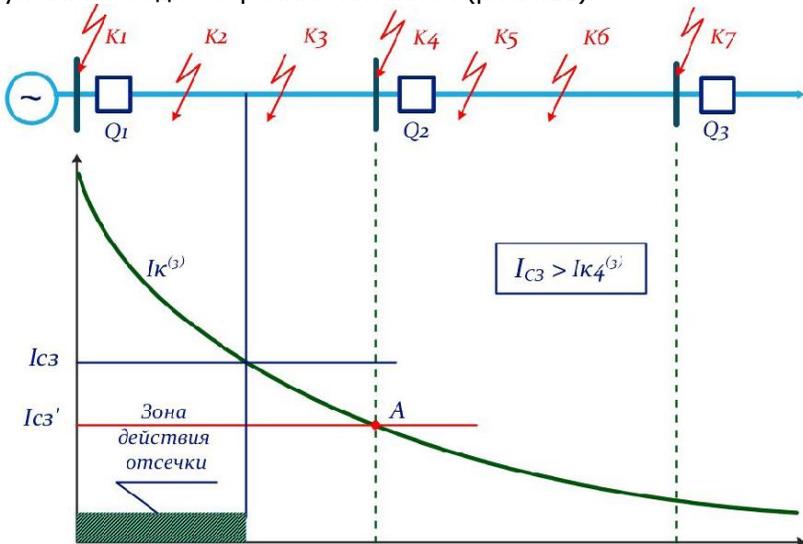


Рисунок 4.11. Принцип действия токовой отсечки на линии с односторонним питанием

На этом же рисунке кривая показывает изменение тока трёхфазного короткого замыкания в зависимости от расстояния до точки короткого замыкания. Кривая построена на основании выражения



$$I_k^{(3)} = \frac{E_c}{\sqrt{3}(X_c + X_{noz}l)},$$

где E_c – ЭДС системы; X_c – сопротивление системы; X_{noz} – погонное сопротивление линии; l – расстояние до места короткого замыкания.

Для того чтобы защита работала при коротких замыканиях на своей линии и не работала на смежной линии, достаточно выполнить условие отстройки защиты от тока трехфазного короткого замыкания в конце линии:

$$I_{c3} \geq I_{k4}^{(3)}.$$

Приняв во внимание погрешности трансформаторов тока, реле и расчёта, получим:

$$I_{c3} = k_n I_{k4}^{(3)},$$

где $k_n = 1,2 \div 1,3$ – коэффициент надёжности.

Таким образом, по принципу действия токовая отсечка не требует выдержки времени, селективность работы достигается за счёт ограничения её зоны действия. Графическая иллюстрация зоны действия отсечки показана на рис.4.11.

Из-за того, что зона работы отсечки не охватывает всю линию, отсечка не может быть использована в качестве единственной защиты.

Токовые ступенчатые защиты. Токовые ступенчатые защиты представляют собой сочетание токовых отсечек и максимальной токовой защиты, что позволяет выполнить полноценную защиту с высоким быстродействием.

Обычно токовые ступенчатые защиты выполняются в виде трёх ступеней:

первая ступень – отсечка мгновенного действия, защищает начальный участок линии;

вторая ступень – отсечка с выдержкой времени, предназначена для надёжной защиты оставшегося участка линии;

третья ступень – максимальная токовая защита, выполняет функции ближнего и дальнего резервирования.

Принцип действия токовой ступенчатой защиты рассмотрим на примере участка сети, представленного на рис.4.12. На



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

линии AB установлена трёхступенчатая токовая защита, на линии BC – двухступенчатая.

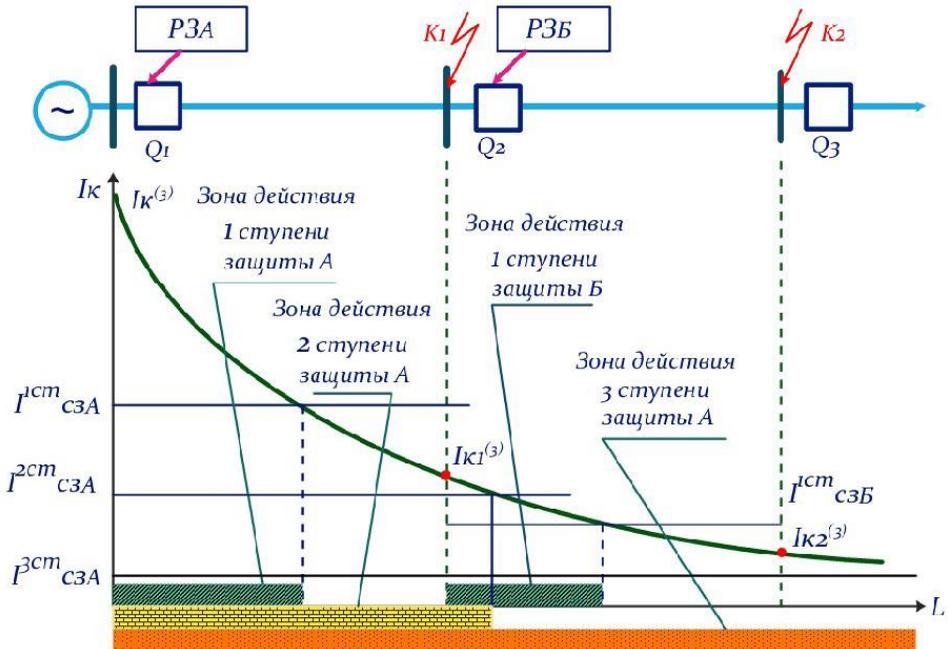


Рисунок 4.12. Принцип действия токовой ступенчатой защиты

Токи срабатывания первых ступеней защит A и B , соответственно $I_{с3A}^I$ и $I_{с3B}^I$, отстраиваются от токов трёхфазных коротких замыканий на шинах противоположных подстанций:

$$I_{с3A}^I = k_n I_{K2}^{(3)}; \quad I_{с3B}^I = k_n I_{K3}^{(3)}$$

Пример 4.3. Схема выполнения токовой ступенчатой защиты. Схема токовой ступенчатой защиты на электромеханических реле с включением измерительных органов по схеме неполной звезды представлена на рис.4.13.

Работа защиты. При коротком замыкании в зоне действия первой ступени срабатывают пусковые органы первой, второй и третьей ступеней. Реле первой ступени $kA1$, $kA2$ и $kA3$ сраба-

Основы релейной защиты элементов энергетических систем

тывают и подают плюс питания на выходное реле kL , реле второй ступени $kA4$, $kA5$ и $kA6$ – на реле времени $kT1$, реле третьей ступени $kA7$, $kA8$ и $kA9$ – на реле времени $kT2$. Времена срабатывания kL , $kT1$, $kT2$ соотносятся между собой следующим соотношением:

$$t_{kL} < t_{kT1} < t_{kT2}.$$

Следовательно, первым сработает выходное реле kL , и короткое замыкание отключится без выдержки времени.

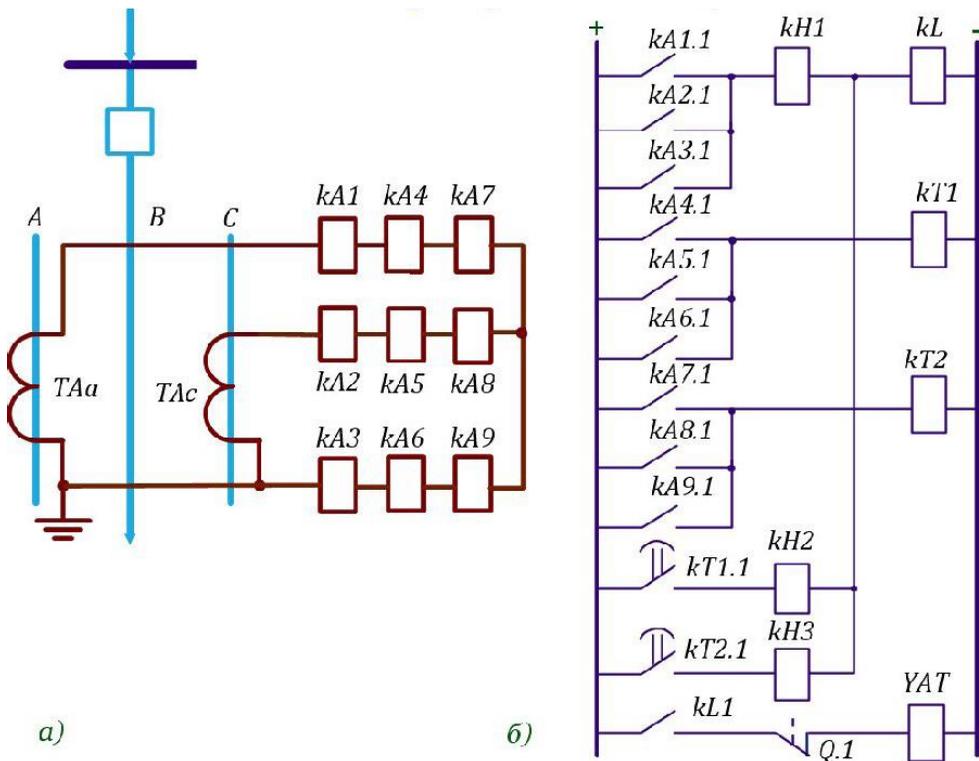


Рисунок 4.13. Схема трёхступенчатой токовой защиты:

а) схема цепей переменного тока; б) схема цепей постоянного тока



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

При коротком замыкании в зоне действия второй ступени сработают пусковые органы второй и третьей ступени и подадут питание на реле $kT1$ и $kT2$. Первым сработает $kT1$, и короткое замыкание отключится с выдержкой времени, равной 0,5 с.

Третья ступень срабатывает при отказе первой или второй ступени или при отказе защиты смежного участка.

Принцип и алгоритм работы токовых ступенчатых защит показан на рис.4.14 с помощью элементов логики.

Контролируемый сигнал от трансформаторов тока TA подаётся на токовые реле первой ступени $kA1, kA2, kA3$, второй ступени $kA4, kA5, kA6$ и третьей ступени $kA7, kA8, kA9$. При возникновении короткого замыкания сработавшие токовые реле формируют на выходе единицу. Сигнал на выходе логических элементов или $DW1, DW2, DW3$ становится равным единице, если хотя бы один входной сигнал равен единице. Элементы $DT1, DT2$ реализуют выдержки времени, необходимые для обеспечения требований селективности защиты, KL – выходной орган защиты, $KH1, KH2, KH3$ – элементы сигнализации.

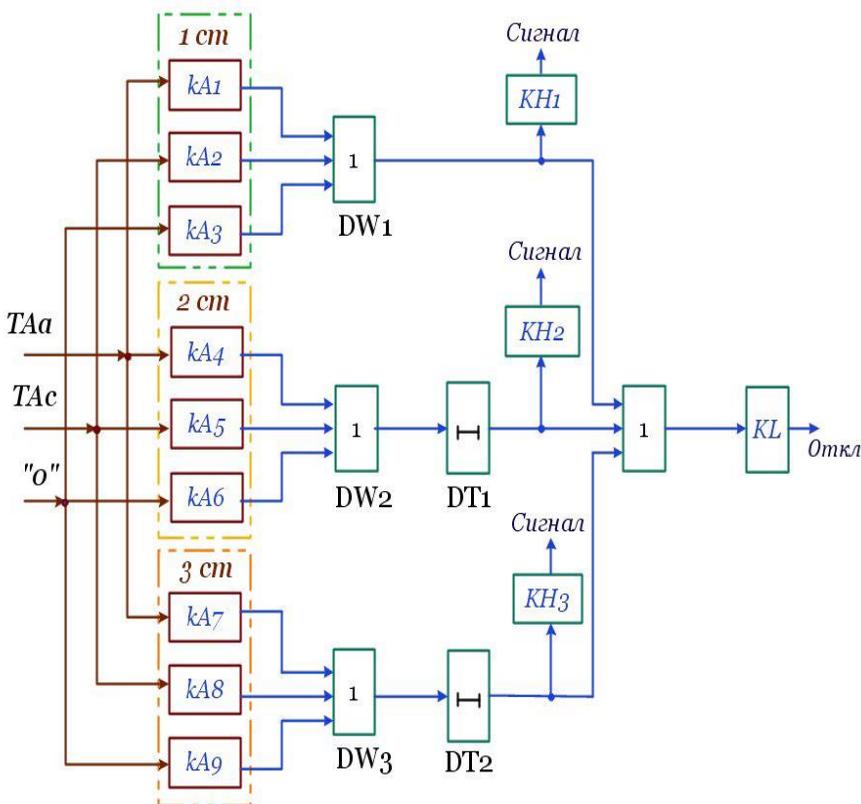


Рисунок 4.14. Алгоритм работы токовой ступенчатой защиты с использованием логических элементов

Если поведение защиты представить в виде логической функции T , то условие срабатывания можно записать в виде

$$T = (kA1 \vee kA2 \vee kA3) \vee ((kA4 \vee kA5 \vee kA6) \wedge DT1) \vee ((kA7 \vee kA8 \vee kA9) \wedge DT2) = 1$$

где $kA1, kA2, kA3, kA4, kA5, kA6, kA7, kA8, kA9$ – логические сигналы на выходах токовых измерительных органов защиты; $DT1, DT2$ – операторы временной задержки.

Чувствительность первой ступени определяется графически по величине защищаемой зоны при двухфазном коротком замыкании или по выражению



$$k_{\text{ч}}^I = \frac{I_{\text{кз min}}^{(2)}}{I_{\text{сз}}^I},$$

где $I_{\text{кз min}}^{(2)}$ – ток двухфазного короткого замыкания в начале защищаемой линии.

Чувствительность второй ступени проверяется по минимальному току двухфазного короткого замыкания в конце линии. Значение коэффициента чувствительности должно быть не менее 1,2 .

Чувствительность третьей ступени проверяется, как для обычной максимальной токовой защиты.

4.4.Токвая отсечка на линиях с двухсторонним питанием

Для селективного действия отсечек на ЛЭП с двухсторонним питанием (рис.4.15) их токи срабатывания должны определяться по формуле

$$I_{\text{с.з}} = k_{\text{н}} I_{\text{К max}}^{(3)}$$

по большему значению тока КЗ, проходящему по ЛЭП при КЗ на шинах одной и другой подстанции (точки К1 и К2).

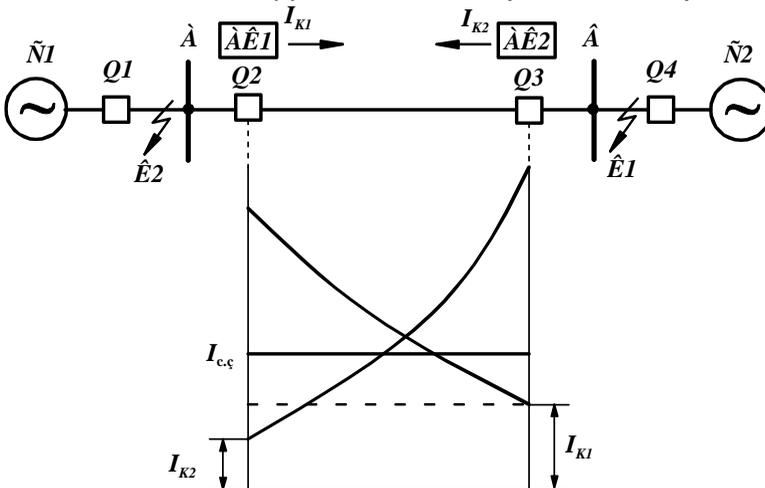


Рисунок 4.15. Отсечка на линии с двухсторонним питанием

Для рассматриваемого случая большим является ток



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

$I_{K1\max}^{(3)}$ проходящий по ЛЭП при КЗ в точке K_1 . Поэтому токи срабатывания обеих отсечек $AK1$ и $AK2$ должны быть равными и определяться как

$$I_{c.зA} = I_{c.зB} = k_n I_{K1\max}^{(3)}$$

или

$$I_{cp} = \frac{k_n k_{cз} k_{cx}}{k_b k_{mm}} I_{K1\max}^{(3)}$$

Зоны действия отсечек определяются графически как точки пересечения прямой, соответствующей току срабатывания $I_{c.з}$ с кривыми изменения токов КЗ.

Рассмотренное условие выбора тока срабатывания отсечек для ЛЭП с двухсторонним питанием не является единственным.

Для ЛЭП, по которым могут проходить токи качаний, вызванные нарушением устойчивости или несинхронным включением, вторым условием выбора тока срабатывания отсечек является отстройка от максимального тока качаний, возникающего при расхождении ЭДС параллельно работающих электрических станций на 180° и $E = 1,05U_{cp.ном}$:

$$I_{кач\max} = \frac{2E}{\sqrt{3}X_{экр\min}} = \frac{2,1U_{cp.ном}}{\sqrt{3}X_{экр\min}},$$

где $X_{экр\min}$ – эквивалентное минимальное сопротивление связи между параллельно работающими электрическими станциями, включая сверхпереходное сопротивление генераторов и сопротивление линии связи.

В данном случае оно определяется по следующему выражению:

$$X_{экр\min} = X_{cA} + X_{cB} + X_{AB}.$$

Тогда ток срабатывания отсечки по условию отстройки от максимального тока качаний определяется по следующему выражению:

$$I_{c.зA} = k_n I_{кач\max}$$

или



$$I_{cp} = \frac{k_n k_{cз} k_{cx}}{k_e k_{mm}} I_{качmax}$$

Ток срабатывания отсечки выбирается по наибольшему из полученных значений токов.

4.5. Токовая направленная защита

В радиальной сети с несколькими источниками питания, а также в кольцевой сети с одним источником питания, максимальная токовая защита не может обеспечить селективность работы. При коротком замыкании на линии *БВ* (точка *К1* на рис.14.6) время срабатывания защиты *2* должно быть больше времени срабатывания защиты *3*, а при коротком замыкании на линии *АВ* (точка *К2*) для селективного отключения повреждённого объекта защита *2* должна срабатывать раньше защиты *3*. Максимальная токовая защита в такой сети может быть селективной только при наличии, кроме измерительного органа тока, органа направления мощности, который разрешает защите срабатывать только при направлении мощности короткого замыкания от шин в линию (стрелки на рис. 4.16).

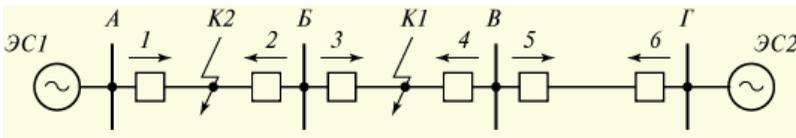


Рисунок 4.16. Радиальная электрическая сеть с двухсторонним питанием: ЭС1, ЭС2 – питающие энергосистемы, 1,2; 3,4; 5,6 – токовые направленные защиты линий электропередачи АВ, БВ, ВГ соответственно

Для обеспечения селективности действия максимальных токовых защит в кольцевых сетях с односторонним и радиальных сетях с двухсторонним питанием пусковой орган защиты выполняется в виде двух реле – реле тока и реле направления мощности, контакты которых соединены последовательно. Реле направления мощности (или орган направления мощности) замыкает свой контакт при положительном направлении тока. Условились за положительное направление тока считать направление тока от шин в линию.

Наличие органа направления мощности подразделяет защиты сети на две группы – нечётную (1, 3, 5) и чётную (2, 4,



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

б). Селективность защиты будет обеспечена, если $t_{сз1} > t_{сз3} > t_{сз5}$ и $t_{сз6} > t_{сз4} > t_{сз2}$.

Принцип работы токовой направленной защиты рассмотрим на примере однолинейной схемы на рис.4.17.

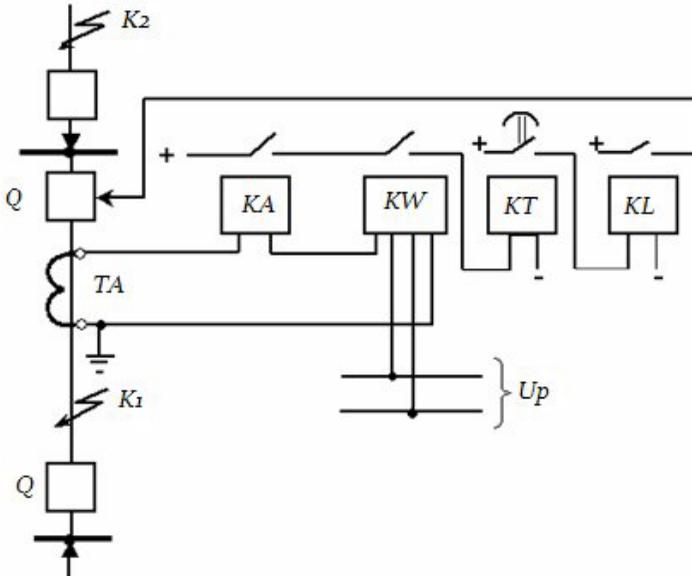


Рисунок 4.17. Схема максимальной токовой направленной защиты

При возникновении короткого замыкания на линии, в точке K_1 , срабатывают токовое реле K_2 и реле направления мощности KW , и защита запускается. При коротком замыкании вне линии, в точке K_2 , ток направлен из линии к шинам, реле направления мощности не работает и блокирует действие защиты. Введение задержки на срабатывание обеспечивает выполнение требования селективности.

Расчёт параметров срабатывания. Расчёт параметров срабатывания (уставок) заключается в выборе тока срабатывания, выдержки времени и оценке чувствительности.

Выбор тока срабатывания. Ток срабатывания токовых направленных защит выбирается так же, как для обычных максимальных токовых защит по условиям отстройки от максимальных нагрузочных режимов. При этом отстройка производится от токов, направленных от шин в линию.



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

Выбор выдержек времени. Выбор выдержек времени производится по встречно–ступенчатому принципу, применение которого показано на рис.4.18.

Стрелками на рисунке показано направление тока, при котором срабатывают пусковые органы защит. При коротком замыкании в точке K_2 сработают пусковые органы защит 1, 3, 5, 6. Наиболее удалённой защитой от источника питания в этом режиме является защита 5, поэтому принимается $t_5 = 0$.

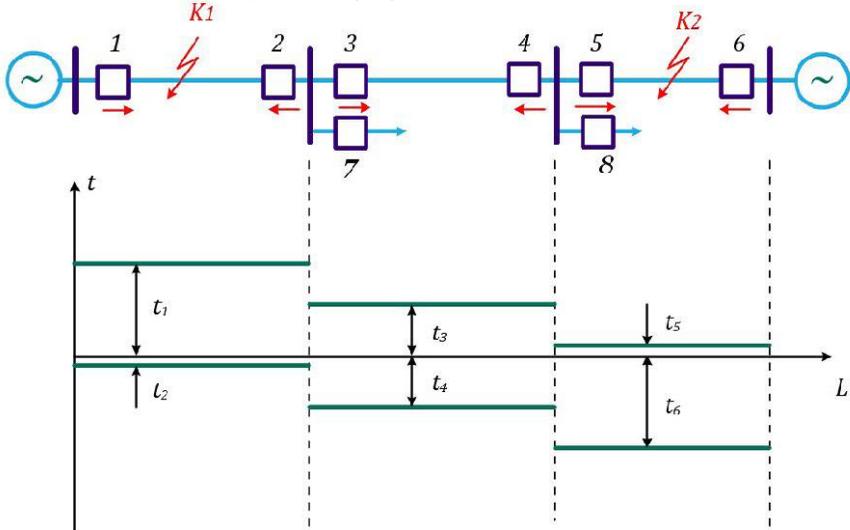


Рисунок 4.18. Выбор выдержек времени токовых направленных защит

Для других защит:

$t_3 = t_5 + \Delta t$, $t_3 = t_7 + \Delta t$ – из двух значений выбирается большее;

$t_1 = t_3 + \Delta t$, $t_1 = t_8 + \Delta t$ – из двух значений выбирается большее.

При коротком замыкании в точке K_1 сработают пусковые органы защит 1, 2, 4, 6. Наиболее удалённой защитой от источника питания в этом режиме является защита 2, поэтому принимается $t_2 = 0$.

Для других защит:



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

$t_4 = t_2 + \Delta t$, $t_4 = t_8 + \Delta t$ – из двух значений выбирается большее;

$t_6 = t_4 + \Delta t$, $t_6 = t_7 + \Delta t$ – из двух значений выбирается большее.

Оценка чувствительности. Чувствительность токовых пусковых органов максимальной направленной защиты оценивается по току двухфазного короткого замыкания в конце защищаемой линии и в конце резервируемых участков.

При оценке поведения защиты следует учесть возможность возникновения двух режимов – режима каскадного действия и отказа защиты из-за наличия «мёртвой зоны» по напряжению.

При коротком замыкании вблизи источника в кольцевой сети с односторонним питанием (рис.4.19) ток короткого замыкания, проходящий через защиту, установленную на противоположных шинах, может оказаться недостаточным для её срабатывания. В этом случае, независимо от соотношения выдержек времени, первым сработает комплект, установленный вблизи источника.

После отключения линии защитой *б* ток в месте установки защиты *5* увеличивается и становится достаточным для её срабатывания. Такое действие защиты называется каскадным. Участок линии, в пределах которого защита работает каскадно, называется зоной каскадного действия защиты.

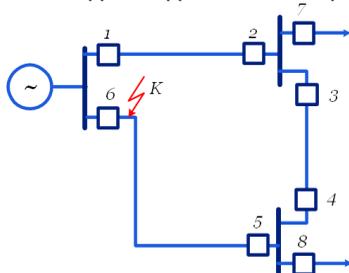


Рисунок 4.19. Схема кольцевой сети

При трёхфазном коротком замыкании вблизи места установки защиты напряжение, подводимое к реле направления мощности, может оказаться недостаточным для срабатывания реле, и защита отказывает. Участок линии, в пределах которого при трёхфазных коротких замыканиях защита не работает, называется мёртвой зоной.

Схемы максимальных направленных защит. Схемы максимальных направленных защит выполняются в различных вариан-



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

тах, отличающихся друг от друга в основном схемой включения органа направления мощности. Под схемой включения реле направления мощности понимается сочетание фаз токов и напряжений, подводимых к реле. Схемы включения должны обеспечивать правильное определение направления мощности в условиях короткого замыкания.

Наибольшее распространение получили две схемы: 30° – градусная и 90° – градусная (рис.4.20). Сочетания токов и напряжений для этих схем приведены в табл.4.1.

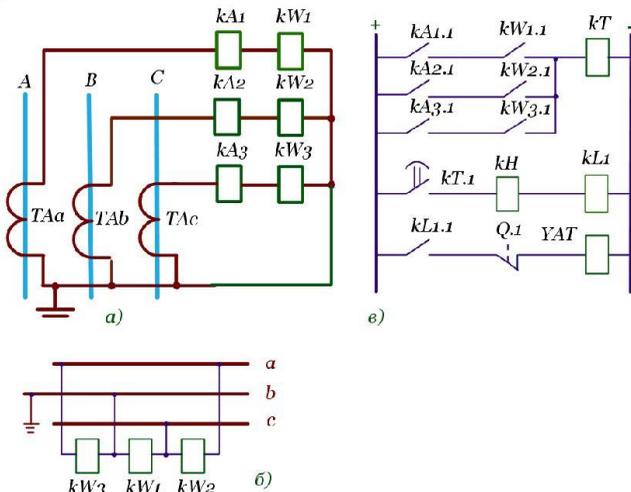


Рисунок 4.20. Схема максимальной токовой направленной защиты с реле мощности, включенными по 90-градусной схеме: а) схема цепей переменного тока; б) схема цепей переменного напряжения; в) схема цепей постоянного тока

Таблица 4.1

30 – градусная схема		90 – градусная схема	
фаза тока	фаза напряже- ния	фаза тока	фаза напряже- ния
<i>IA</i>	<i>UAC</i>	<i>IA</i>	<i>UBC</i>
<i>IB</i>	<i>UBA</i>	<i>IB</i>	<i>UCA</i>
<i>IC</i>	<i>UCB</i>	<i>IC</i>	<i>UAB</i>

На рис.4.21 представлен алгоритм работы максимальных токовых направленных защит.



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

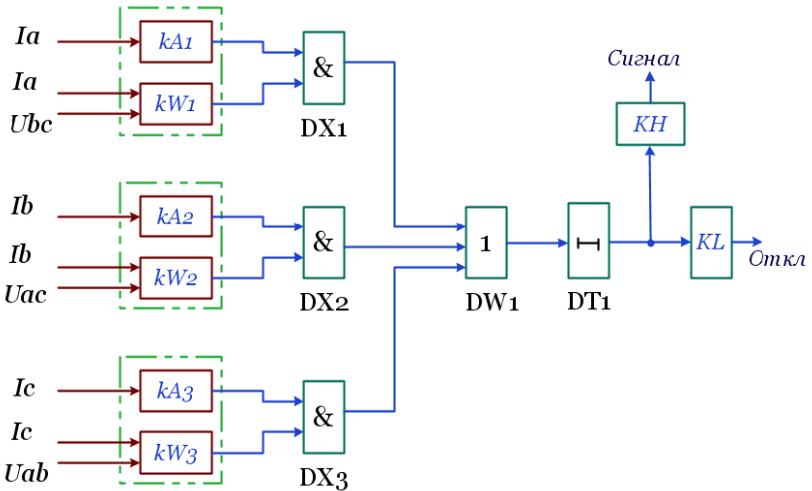


Рисунок 4.17. Алгоритм работы максимальных токовых направленных защит

Условие срабатывания рассматриваемой защиты

$$T = ((kA_1 \wedge kW_1) \vee (kA_2 \wedge kW_2) \vee (kA_3 \wedge kW_3)) \wedge DT_3 = 1$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как обеспечивается селективность максимальной токовой защиты?
2. Выбор выдержек времени МТЗ.
3. Схемы построения максимальной токовой защиты.
4. Схема МТЗ для полной звезды.
5. Схема МТЗ для неполной звезды.
6. Схема МТЗ при включения реле на разность токов двух фаз.
7. Схема МТЗ при включения реле в фильтр токов нулевой последовательности.
8. Оценка чувствительности МТЗ.
9. Максимальные токовые защиты с зависимой характеристикой срабатывания.
10. Согласование МТЗ с зависимыми выдержками срабатывания.
11. Принцип работы токовой отсечки.
12. Обеспечение селективности работы токовой отсечки на линии с односторонним питанием.
13. Токовая отсечка на линиях с двухсторонним питанием.



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

Обеспечение селективности работы.

14. Назначение и принцип действия токовой направленной защиты.

15. Схемы токовой направленной защиты.

16. Обеспечение селективности токовой направленной защиты.

17. Алгоритм работы максимальных токовых направленных защит.



5. ДИСТАНЦИОННАЯ ЗАЩИТА

5.1. Принцип действия защиты

Принцип действия дистанционной защиты основан на контроле изменения сопротивления защищаемого объекта. Если защищаемым объектом является линия электропередачи (рис.5.1), то в нормальном режиме параметры напряжения на шинах и тока

в линии близки к номинальным: $U_{раб}$, $I_{раб}$, отношение

$Z_n = \frac{U_{раб}}{I_{раб}}$ соответствует нормальному режиму.

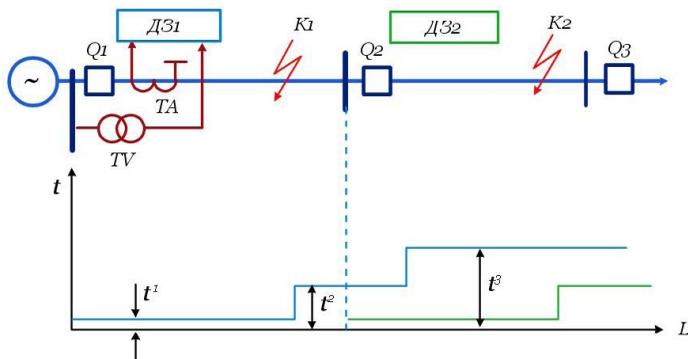


Рисунок 5.1. Принцип построения дистанционной защиты

При возникновении короткого замыкания напряжение на шинах уменьшается, ток в линии увеличивается, контролируемое сопротивление уменьшается

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} < Z_n$$

В свою очередь,

$$Z_k = Z_{ног} l_k,$$

где $Z_{ног}$ – погонное сопротивление линии (сопротивление

1 км линии); l_k – длина линии, км.

Следовательно, контролируя изменение сопротивления, можно определить факт возникновения короткого замыкания и оценить удалённость места короткого замыкания.



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

Обычно дистанционная защита выполняется в виде трёх ступеней, характеристика её времени срабатывания представлена на рис.5.1. Первая ступень предназначена для работы при коротких замыканиях на защищаемой линии $Z_{сз} < Z_{л}$, то есть сопротивление срабатывания защиты должно быть меньше сопротивления линии.

Для идеальных трансформаторов тока и трансформаторов напряжения и при отсутствии погрешностей измерительных органов в последнем выражении должен стоять знак равенства, однако наличие погрешностей может привести к ложной работе защиты при коротком замыкании на смежных присоединениях.

Как правило, первая ступень охватывает 85 % длины защищаемой линии. При коротких замыканиях в зоне действия первой ступени защита работает без выдержки времени, $t^1 = 0$.

Вторая ступень предназначена для надёжной защиты всей линии. Её зона действия попадает на смежную линию, поэтому для исключения неселективного срабатывания защиты при коротком замыкании на отходящей линии в точке K_2 , вводится замедление на срабатывание, $t^2 = (0,4 \div 0,5) t_c$.

Третья ступень выполняет функции ближнего и дальнего резервирования.

5.2. Принципы построения измерительных органов реле сопротивления

В настоящее время реле сопротивления выпускаются на аналоговых интегральных микросхемах или на цифровой электронике.

Рассмотрим, в качестве примера, принцип действия дистанционных органов блок реле сопротивления БРЭ 2801, выполненный на интегральной микроэлектронике. Блок БРЭ 2801 содержит три реле сопротивления и выходной блок. В зависимости от требований к защите реле сопротивления позволяют получить следующие характеристики срабатывания с углом максимальной чувствительности равным 65 или 85 градусов.

В схеме реле предусмотрена возможность изменять круговую характеристику на эллиптическую с отношением малых и

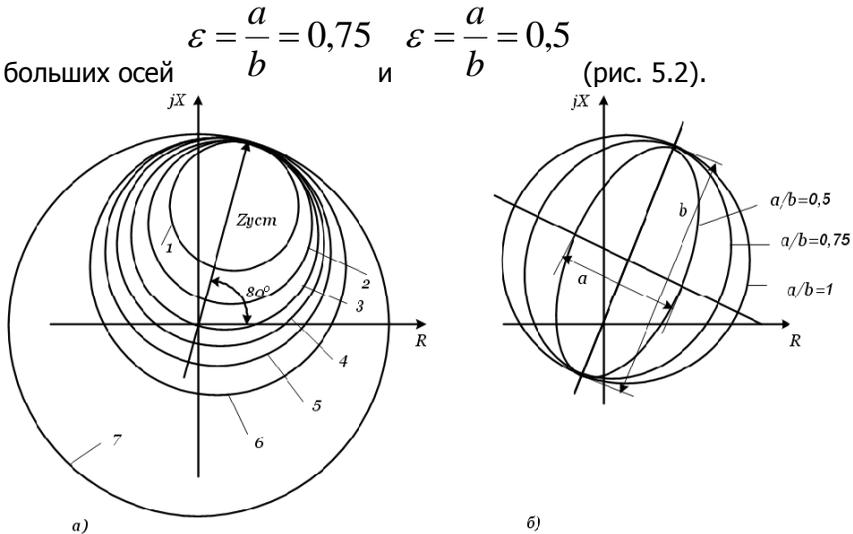


Рисунок 5.2 Характеристики срабатывания реле сопротивления блока БРЭ2801:

1 – направленная окружность, смещённая в первый квадрант, с плавной уставкой смещения от 5 до 50% уставки; 2 – направленная окружность с нерегулируемым смещением в первый квадрант на 5% уставки; 3 – направленная окружность, проходящая через начало координат; 4, 5, 6 – направленная окружность с заданным смещением в третий квадрант, соответственно на 5%, 12% или 20% уставки; 7 – ненаправленная окружность с центром в начале координат.

Следует отметить, что регулировка характеристики смещения реле не влияет на значение выбранной уставки срабатывания и угла максимальной чувствительности.

Рассмотрим принцип работы реле на примере характеристики, имеющей вид смещённой в третий квадрант (рис.5.3). На окружности отметим точки 1 и 2, а вспомогательные векторы, соединяющие начало координат с этими точками, обозначим, как \underline{Z}_1 и \underline{Z}_2 .

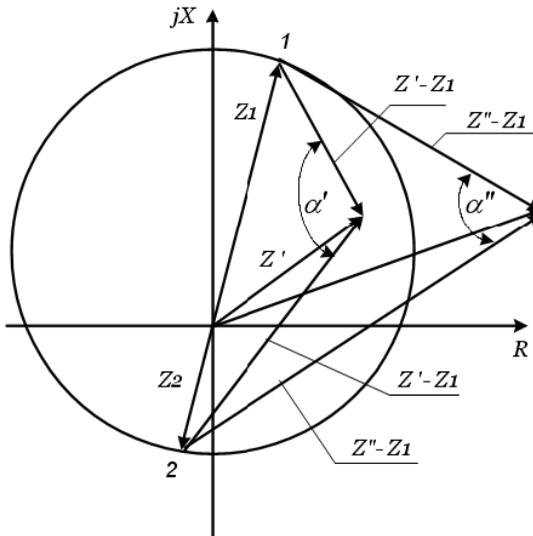


Рисунок 5.3 Пояснение принципа работы реле сопротивления

При внешнем коротком замыкании вектор $\underline{Z} = \underline{Z}''$ расположен вне окружности и α'' между разностными векторами $\underline{Z}'' - \underline{Z}_1$ и $\underline{Z}'' - \underline{Z}_2$ будет меньше $\pi/2$. При коротком замыкании в зоне работы реле вектор $\underline{Z} = \underline{Z}'$ расположен внутри окружности, а угол α' между векторами $\underline{Z}' - \underline{Z}_1$ и $\underline{Z}' - \underline{Z}_2$ становится больше $\pi/2$. Учитывая это обстоятельство, можно различить нахождение вектора \underline{Z} в зоне или вне зоны срабатывания.

Граничным условием срабатывания реле является выполнение равенства $\alpha_{сз} = \pi/2$.

Эллиптическая характеристика реле имитируется двумя соприкасающимися дугами окружностей. В этом случае угол срабатывания реле будет больше чем $\pi/2$.



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

В схеме реле, структурная схема которого приведена на рис.5.4, реализация рассмотренного алгоритма организована следующим образом. Сигналы, пропорциональные линейному напряжению U и соответствующей разности фазных токов I , поступают на измерительную часть реле.

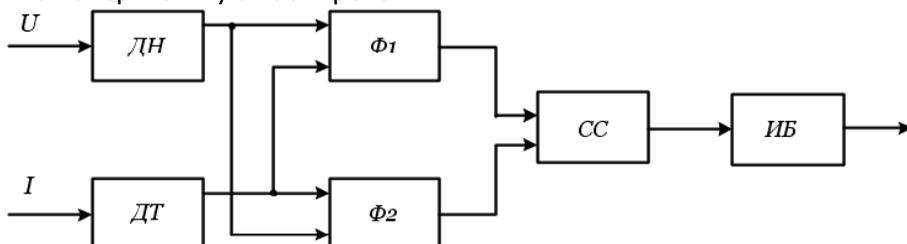


Рисунок 5.4 Структурная схема реле сопротивления

С датчиков тока DT и напряжения DN сигналы подаются в узел формирования, содержащий фильтры-сумматоры $\Phi 1$ и $\Phi 2$. Узел формирования обеспечивает формирование двух величин \underline{E}_1 и \underline{E}_2 , каждая из которых является линейной функцией тока и напряжения контролируемой цепи и пропорциональна векторам $\underline{Z} - \underline{Z}_1$ и $\underline{Z} - \underline{Z}_2$:

$$\underline{E}_1 = \underline{k}_{11}\underline{U} + \underline{k}_{12}\underline{I}, \quad \underline{E}_2 = \underline{k}_{11}\underline{U} + \underline{k}_{22}\underline{I}$$

или

$$\underline{E}_1 = \underline{k}_{11}\left(\frac{\underline{U}}{\underline{I}} + \frac{\underline{k}_{12}}{\underline{k}_{11}}\right) = \underline{k}_{11}\underline{I}(\underline{Z} - \underline{Z}_1);$$

$$\underline{E}_2 = \underline{k}_{11}\left(\frac{\underline{U}}{\underline{I}} + \frac{\underline{k}_{22}}{\underline{k}_{11}}\right) = \underline{k}_{11}\underline{I}(\underline{Z} - \underline{Z}_2)$$

$$\frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \underline{Z}$$

В этих выражениях $\frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \underline{Z}$ является приведенным значением сопротивления до места короткого замыкания, а отноше-

ния комплексных коэффициентов $\frac{\underline{k}_{12}}{\underline{k}_{11}} = \underline{Z}_1$, $\frac{\underline{k}_{22}}{\underline{k}_{11}} = \underline{Z}_2$ – значениями вспомогательных векторов, проведенных из начала координат к особым точкам 1 и 2 на характеристике реле.

Сформированные напряжения \underline{E}_1 и \underline{E}_2 поступают в узел сравнения CC . В нормальном режиме и при внешнем коротком



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

замыкании угол между напряжениями не достигает угла срабатывания, и реле не работает. При коротком замыкании в зоне срабатывания фазовый сдвиг между сигналами возрастает и стано-

вится больше $\frac{\pi}{2}$, что приводит к срабатыванию реле.

Исполнительный блок *ИБ* выполнен на электромагнитном реле с двумя контактами.

Блок *БРЭ 2801* позволяет осуществлять дистанционную защиту линий и трансформаторов напряжением (110-500) кВ. Погрешность реле по сопротивлению составляет не более 10%. Время срабатывания в основной части характеристики не превышает 70 мс. Коэффициент возврата может меняться от 1.07 до 1.15 и зависит от значения угла максимальной чувствительности.

5.3. Структурная схема дистанционной защиты

Один из типичных вариантов выполнения трёхступенчатой дистанционной защиты представлен на рис.5.2.

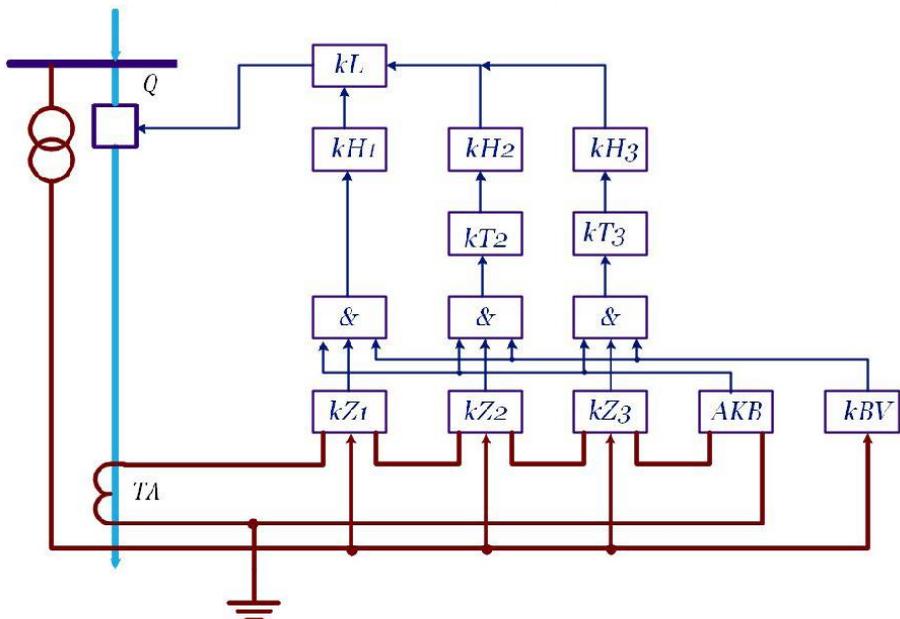


Рисунок 5.2. Структурная схема дистанционной защиты

При возникновении короткого замыкания в зоне действия первой ступени срабатывают дистанционные органы первой



kZ_1 , второй kZ_2 и третьей kZ_3 ступеней. Сигналы от реле сопротивлений каждой ступени поступают на схемы логического умножения. Одновременно на другие входы схем подаются сигналы блокировки от качаний AKB и блокировки от нарушения цепей напряжения kBV .

Блокировка от нарушения цепей напряжения kBV запрещает работу защиты при неисправности цепей напряжения. В случае срабатывания автоматических выключателей или предохранителей цепей трансформатора напряжения напряжение, подводимое к реле сопротивления, может оказаться недопустимо мало, что приведёт к ложному действию защиты.

Блокировка от качаний AKB запрещает работу защиты при нарушении устойчивости в энергосистеме.

Сигналы с выходов схем логического умножения подаются на выходное реле kL и реле времени kT_2 и kT_3 . Первым срабатывает реле kL , подавая команду на отключение выключателя без выдержки времени.

При коротком замыкании в зоне действия второй ступени срабатывают дистанционные органы второй kZ_2 и третьей ступени kZ_3 . Реле времени kZ_2 , отработав выдержку порядка 0.4 – 0.5 с, формирует команду на отключение выключателя.

Третья ступень работает при отказе первой или второй ступеней защит или несрабатывании защит смежных присоединений.

5.4. Принципы выполнения блокировки от качаний

При нарушении параллельной работы энергосистемы нарушается синхронная работа электростанций и возникает асинхронный ход, сопровождающийся периодическими изменениями (качаниями) тока и напряжения (Рис.5.3). В этих условиях реле сопротивления может замерить сопротивление меньше уставки и ложно сработать.

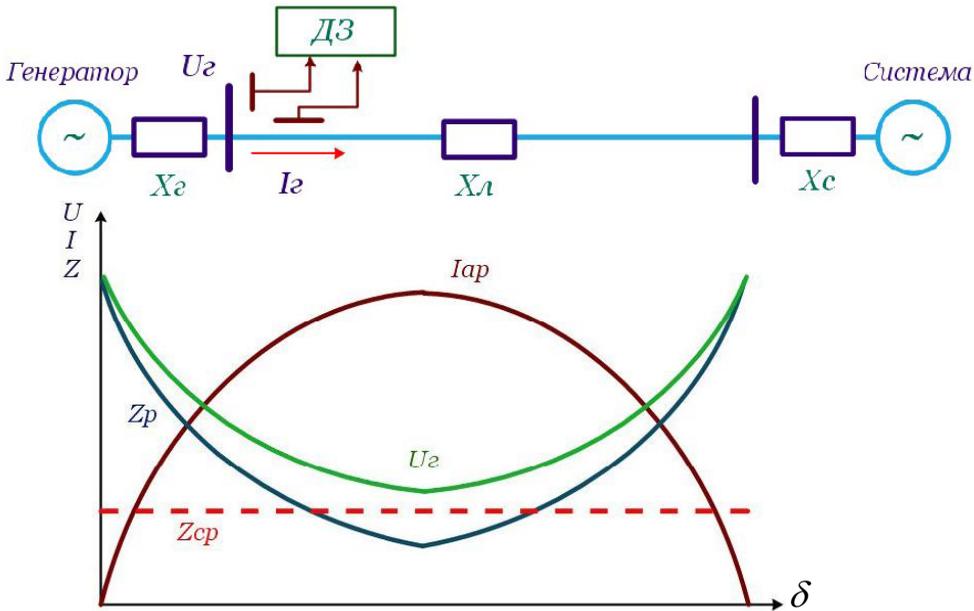


Рисунок 5.3. Схема работы электростанции на приёмную энергосистему:

$I_{г}$ - ток в линии; $X_{г}$ - сопротивление генераторов электростанции; $X_{л}$ - сопротивление линии связи; $X_{с}$ - сопротивление системы; $U_{г}$ - напряжение в месте установки защиты;

I_{ap} - ток асинхронного режима; δ - угол между ЭДС генератора и системы

По принципу действия устройства блокировки от качаний могут быть разделены на две группы:

- короткие замыкания и качания различают по хотя бы кратковременному наличию аварийных составляющих, например, токов обратной последовательности;
- короткие замыкания и качания различают по скорости изменения токов и напряжений.



5.5. Выбор параметров срабатывания дистанционной защиты

Первичное сопротивление срабатывания первой ступени выбирается из условия отстройки от коротких замыканий на шинах противоположной подстанции:

$$Z_{сз}^1 = k_n Z_{л},$$

где $k_n = (0,8 \div 0,85)$ – коэффициент надёжности, учитывающий погрешности трансформаторов тока и трансформаторов напряжения, реле сопротивления и погрешности расчёта; $Z_{л}$ – сопротивление защищаемой линии.

Первичное сопротивление срабатывания второй ступени определяется по следующим условиям:

1. Отстройка от конца зоны действия первой ступени дистанционной защиты смежной линии

$$Z_{сз}^2 = k_n \left(Z_{л1} + \frac{k_n}{k_{ток}} + Z_{л2} \right),$$

где $Z_{сз}^2$ – первичное сопротивление срабатывания второй ступени дистанционной защиты линии $Л1$ (рис.5.1); $Z_{л1}$ – сопротивление защищаемой линии; $Z_{л2}$ – сопротивление смежной линии; $k_{ток}$ – коэффициент токораспределения, учитывающий отношение тока короткого замыкания в месте установки защиты к току в линии, с защитой которой проводится согласование. Например, для дистанционной защиты, представленной на

Рис.5.4, $k_{ток} = Ik1 / Ik2$.

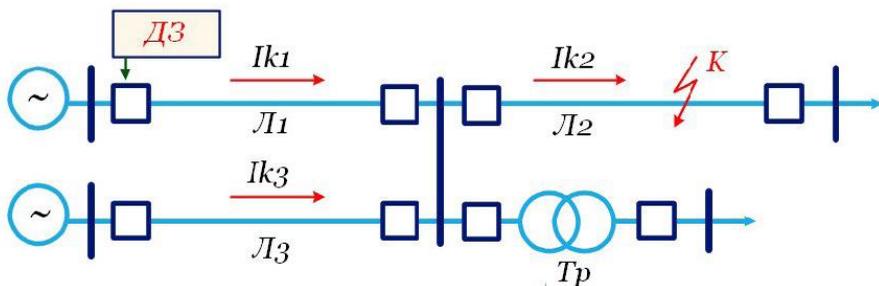


Рисунок 5.3. К расчёту параметров срабатывания дистанционной защиты

2. Отстройка от короткого замыкания за трансформатором приёмной подстанции

$$Z_{сз}^2 = k_n \left(Z_{л1} + \frac{Z_T}{k_{ток}} \right),$$

где Z_T – сопротивление трансформатора.

Из рассчитанных значений сопротивлений срабатывания выбирается меньшее. Коэффициент чувствительности второй ступени определяется по выражению:

$$k_{ч} = \frac{Z_{сз}^2}{Z_{л1}} \geq 1,25$$

Выдержка времени для второй ступени принимается равной 0,4 – 0,5 с.

Сопротивление срабатывания третьей ступени выбирается из условия отстройки от нагрузочного режима:

$$Z_{сз}^3 = \frac{U_{\min} \sin \varphi_{нагр.расч}}{\sqrt{3} I_{н.макс} k_n k_{ток} \varphi_{мч}},$$

где U_{\min} – минимальное рабочее напряжение на шинах подстанции; $I_{н.макс}$ – максимальный ток нагрузки;

$k_n = (1,2 \div 1,25)$ – коэффициент надёжности; k_{ϵ} – коэффициент

возврата; $\varphi_{нагр.расч}$ – расчётный угол нагрузки; $\varphi_{мч}$ – угол максимальной чувствительности реле.



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

Требуемый коэффициент чувствительности оценивается по короткому замыканию в конце зоны резервирования. Его значение должно быть не менее 1.2.

Пересчёт первичного сопротивления срабатывания защиты на сопротивление срабатывания реле производится по выражению

$$Z_{cp} = Z_{cz} \frac{k_I}{k_U},$$

где Z_{cp} – сопротивление срабатывания реле; Z_{cz} – первичное сопротивление срабатывания защиты; k_I – коэффициент трансформации трансформатора тока; k_U – коэффициент трансформации трансформатора напряжения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назначение и принцип действия дистанционной защиты.
2. Как изменяется измеряемое сопротивление в энергосистеме при возникновении короткого замыкания?
3. Почему дистанционная защита выполняется трёхступенчатой? Зоны действия (назначение) каждой ступени.
4. Характеристики реле сопротивления.
5. Принцип действия дистанционных органов блок реле сопротивления БРЭ 2801.
6. Структурная схема дистанционной защиты.
7. Принципы выполнения блокировки от качаний.
8. Выбор параметров срабатывания дистанционной защиты.
9. Область применения дистанционных защит.



6. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА

6.1 Продольная дифференциальная токовая защита

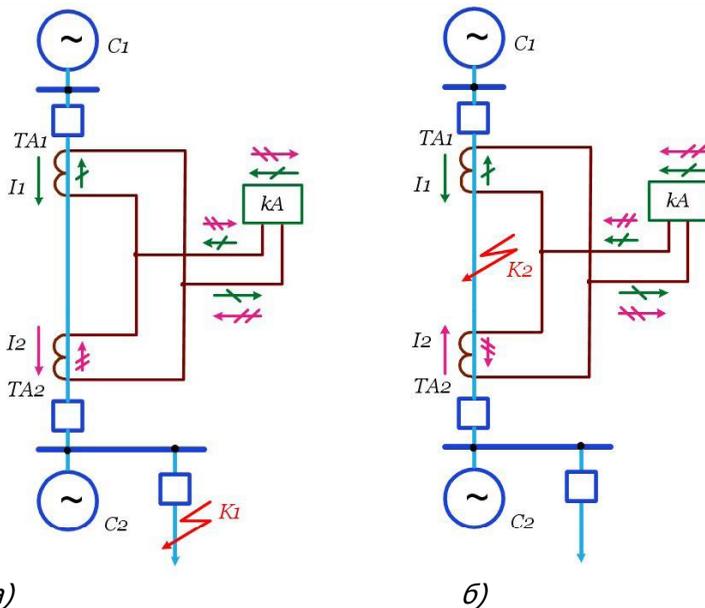
Дифференциальные токовые защиты – это защиты с абсолютной селективностью. Для работы абсолютно селективной защиты, которая должна достоверно различать КЗ в защищаемом элементе и вне его, необходима информация о значениях электрических величин одновременно во всех присоединениях элемента к электрической сети. Поэтому абсолютно селективные защиты, в отличие от относительно селективных, например МТЗ со ступенчатым выбором выдержек времени, используют специальные каналы связи, объединяющие все стороны защищаемого элемента. В качестве каналов применяются проводные (вспомогательные или соединительные провода), высокочастотные и радиоканалы. Здесь рассматриваются лишь дифференциальные токовые защиты с соединительными проводами. В пределах электрической станции или подстанции такими проводами являются жилы контрольных кабелей.

Дифференциальными токовыми защитами называются защиты, в измерительных органах которых непосредственно сравниваются электрические данные в двух (или более) присоединениях защищаемого элемента. В дифференциальных токовых защитах с проводными каналами определяется геометрическая сумма или разность токов всех сторон защищаемого элемента: всех концов защищаемой линии, всех сторон защищаемого силового трансформатора (автотрансформатора), двух сторон (в нейтрали и на выводах) генератора, в полной дифференциальной защите шин.

Принцип действия продольной дифференциальной защиты рассмотрим на примере линии с двухсторонним питанием (рис.6.1).



Основы релейной защиты элементов энергетических систем



а)

б)

Рисунок.6.1 Схема продольной дифференциальной защиты: **а** – режим внешнего короткого замыкания; **б** – короткое замыкание в зоне действия защиты

Для выполнения защиты по концам линии ставятся трансформаторы тока с одинаковыми коэффициентами трансформации. Вторичные обмотки соединяются между собой, параллельно обмоткам включается токовое реле.

В нормальном режиме работы или при внешнем коротком замыкании в точке KI , в обоих трансформаторах тока проходит одинаковый первичный ток. Ток в реле, определяемый как разность вторичных токов, примерно равен нулю:

$$I_p = \frac{I_1}{k_I} - \frac{I_2}{k_I} \approx 0$$

При коротком замыкании в защищаемой зоне, точка $K2$, в реле протекает сумма вторичных токов, и реле сработает:

$$I_p = \frac{I_1}{k_I} + \frac{I_2}{k_I} \neq 0$$

В режиме внешнего замыкания ток в реле равен нулю только для идеальных трансформаторов тока. Реальные транс-



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

форматоры тока обладают погрешностями, и через реле протекает ток небаланса. Причина возникновения тока небаланса пояснена на рис.6.2.

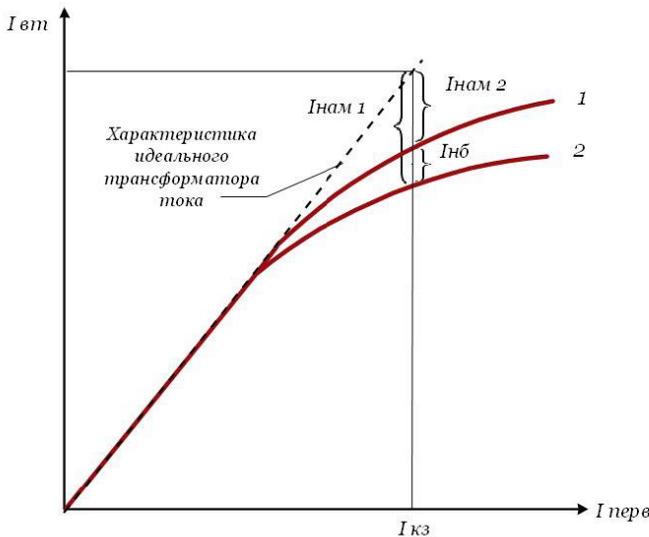


Рисунок.6.2 Ток небаланса дифференциальной защиты: $I_{перв}$ - первичный ток; $I_{вт}$ - вторичный ток трансформатора тока; $I_{кз}$ - ток короткого замыкания; $I_{нам1}$ и $I_{нам2}$ - токи намагничивания трансформаторов тока $TA1$ и $TA2$; $I_{нб}$ - ток небаланса дифференциальной защиты

Из сопоставления характеристик 1 и 2 следует, что ток небаланса $I_{нб} = I_{нам1} - I_{нам2}$ будет равен нулю только при полном совпадении характеристик, что реально никогда не бывает. Поэтому, чтобы защита не сработала ложно при внешних замыканиях, её ток срабатывания должен быть больше максимально возможного тока небаланса:

$$I_{сз} = k_n I_{нб \max}$$

Для определения тока небаланса пользуются приближённой зависимостью

$$I_{нб} = k_a k_{одн} f_i I_{кз \text{ в н } \max},$$

где k_a - коэффициент, учитывающий наличие апериодической составляющей в токе короткого замыкания; $k_{одн} = (0,5 \div 1)$ - коэффициент однотипности условий работы



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

трансформаторов тока. Значение 0.5 принимается при примерно одинаковых вторичных токах; $f_i = 0,1$ – допустимая токовая погрешность трансформаторов тока; $I_{кз\text{ в н}ма\text{к}}$ – максимальное значение тока внешнего короткого замыкания.

6.2. Поперечная дифференциальная защита

Принцип действия поперечной дифференциальной защиты рассмотрим на примере сети, представленной на рис.6.3.

По концам каждой из параллельных линий ставятся трансформаторы тока с одинаковыми коэффициентами трансформации. Вторичные обмотки трансформаторов тока соединяются между собой на разность токов. Параллельно вторичным обмоткам включается пусковой орган, выполненный на реле тока и реле мощности.

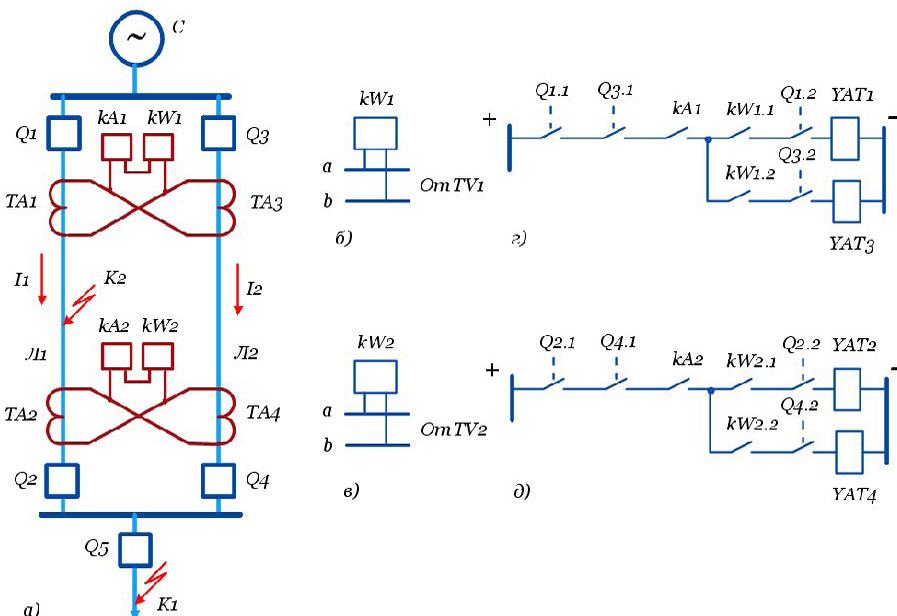


Рисунок.6.3 Поперечная дифференциальная токовая защита параллельных линий: а – токовые цепи; б, в – цепи напряжения; г, д – цепи постоянного тока

В нормальном режиме и при внешнем коротком замыкании в точке K1



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

ток в реле практически отсутствует:

$$I_{p1} = \left(\frac{I_1}{k_I} - I_{нам1} \right) - \left(\frac{I_2}{k_I} - I_{нам1} \right) = I_{нб}$$

$$I_{p1} = \left(\frac{I_1}{k_I} - I_{нам1} \right) - \left(\frac{I_2}{k_I} - I_{нам1} \right) = I_{нб}$$

так как токи I_1 и I_2 , протекающие по параллельным линиям, равны между собой. Через реле проходит лишь ток небаланса, вызываемый погрешностью трансформаторов тока, и защита не работает.

При коротком замыкании на одной из защищаемых линий, например, в

точке $K2$, через первый комплект проходит ток

$$I_{p1} = \frac{I_1}{k_I} - \frac{I_2}{k_I} \neq 0$$

а так как ток $I_1 > I_2$, комплект 1 сработает. Одновременно сработает комплект 2, поскольку через реле протекает ток

$$I_{p2} = \frac{I_2}{k_I} - \left(-\frac{I_2}{k_I} \right) = \frac{2I_2}{k_I}$$

При отключении одной из параллельных линий блок-контактами сработавших выключателей защита выводится из работы для устранения возможности её неселективного действия при внешнем коротком замыкании.

По принципу действия поперечная дифференциальная защита не требует введения замедления на срабатывание, и при коротких замыканиях на защищаемых линиях оба комплекта срабатывают одновременно и практически мгновенно. Однако при коротких замыканиях в начале или конце линии защита работает каскадно (рис.6.4).

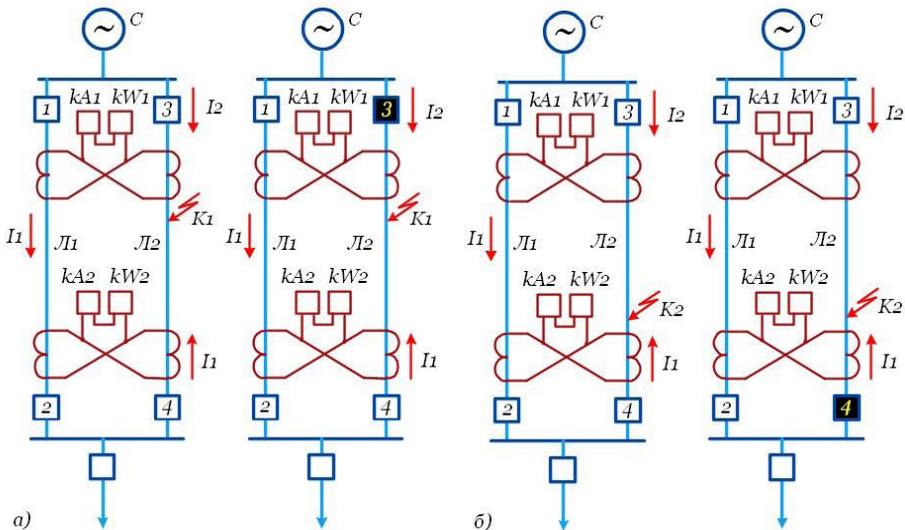


Рисунок.6.4 Каскадная работа поперечной дифференциальной защиты: а) короткое замыкание в начале линии; б) короткое замыкание в конце линии

При повреждении в начале линии, точка $K1$, ток $I_1 \ll I_2$, и ток I_1 недостаточен для срабатывания комплекта 2, поэтому выключатель 4 отключится только после отключения выключателя 3, когда весь ток повреждения начинает протекать через второй комплект.

При повреждении в конце линии, точка $K2$, токи, протекающие по линиям, будут примерно одинаковы, поэтому первым работает комплект 2, подаст команду на отключение выключателя 4, и только после этого комплект 1 отключит выключатель 2.

Ток срабатывания поперечной дифференциальной защиты выбирается по двум условиям:

- защита не должна работать от максимально возможного тока небаланса при внешних коротких замыканиях;
- защита не должна работать при отключении одной из параллельных линий, если по второй протекает максимальный рабочий ток.

Чувствительность защиты определяется по коротким замыканиям на границе зоны каскадного действия и в точке равной чувствительности. За точку равной чувствительности принимается точка короткого замыкания, при замыкании в которой токи в реле



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

обоих комплектов равны. Защита удовлетворяет требованиям чувствительности при $k_u > 2$.

6.3. Дифференциальная токовая защита генераторов

Основной защитой генераторов от многофазных КЗ в обмотке статора является дифференциальная токовая защита. Эта защита подключается к ТТ, установленным со стороны выводов и со стороны фаз к нулевой точке генератора (рис. 6.5.). На современных генераторах мощностью более 30 МВт с целью повышения надёжности ДТЗ всегда выполняется в трёхфазном исполнении (токовые реле $KA1-KA3$) с соединением групп ТТ в полную звезду.

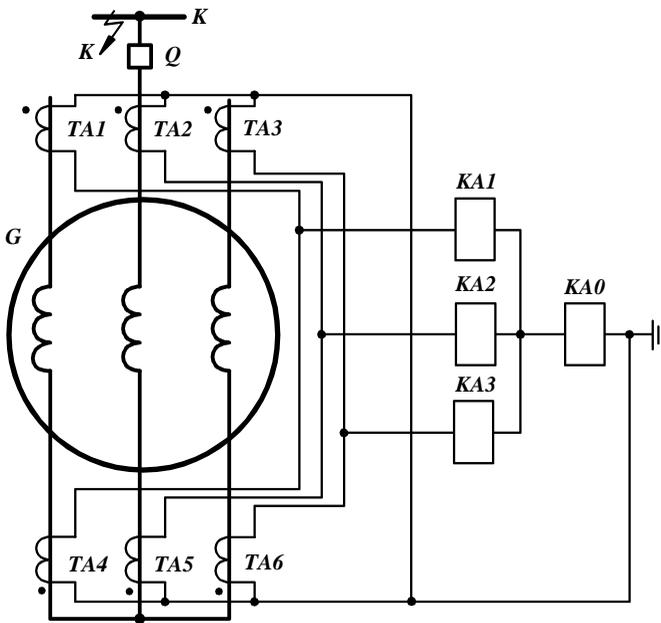


Рисунок 6.5. Принципиальная схема дифференциальной защиты генератора

На рис. 6.6. приведена схема цепей оперативного тока защиты. При внутренних повреждениях и срабатывании токовых реле защиты одного, двух или трёх подаётся плюс оперативного тока через указательное реле KH на обмотку промежуточного реле KL . Промежуточное реле KL срабатывает, и своими контактами $KL.1$ и $KL.2$ подаёт плюс оперативного тока через вспомога-



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

ный контакт SQ на катушку YAT выключателя Q и на автомат гашения поля (АГП). Для сигнализации обрыва соединительных проводов ДТЗ в нулевой провод токовых цепей включается токовое реле $KA0$, ток срабатывания которого устанавливается равным $(20 \div 30\%)I_{ном.г}$.

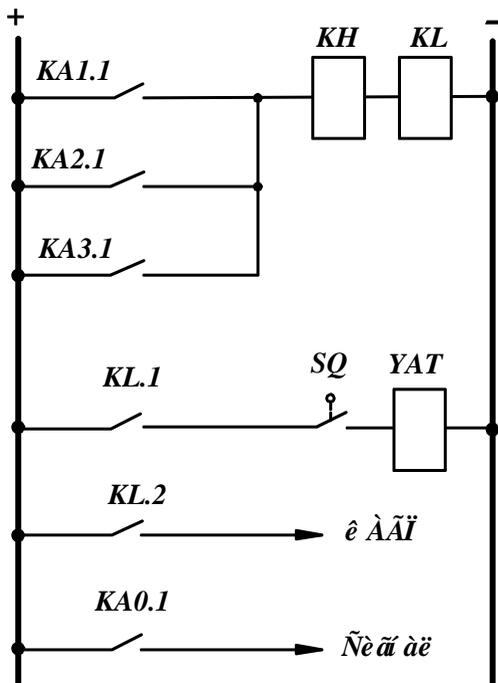


Рисунок 6.6. Схема цепей оперативного тока

Ток срабатывания ДТЗ выбирается по условию отстройки от тока небаланса, проходящего в токовых реле при внешнем трёхфазном КЗ в точке K :

$$I_{сз} = k_{отс} k_a k_{одн} \varepsilon I_{к\max}^{(3)}, \tag{6.1}$$

где $k_{отс}$ – коэффициент отстройки, принимаемый равным 1,3; k_a – коэффициент, учитывающий переходный режим (для реле РНТ-565 может быть принят равным 1); $k_{одн}$ – коэффициент



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

однотипности условий работы ТТ, принимаемый равным 0,5; ε – относительное значение полной погрешности ТТ, равное 0,1;

$I_{\kappa \max}^{(3)}$ – ток внешнего трехфазного КЗ на шинах генераторного напряжения в точке K , который проходит по ТТ защиты.

Коэффициент чувствительности дифференциальной токовой защиты генератора, определяемый по выражению

$$k_u = \frac{I_{\kappa \min}}{I_{c3}}$$

(6.2)

должен быть не менее двух при минимальном токе двухфазного КЗ на выводах генератора (в зоне защиты), когда последний отключён от сети. Применение в качестве токовых реле РНТ-565 позволяет иметь ток срабатывания защиты по формуле

(6.1) не более $0,6I_{ном.г}$.

6.4. Дифференциальная токовая защита трансформаторов

В соответствии с ПУЭ дифференциальная токовая защита обязательно устанавливается на одиночно работающих трансформаторах (автотрансформаторах) мощностью $S_T \geq 6,3$ МВ·А и на параллельно работающих трансформаторах (автотрансформаторах) мощностью $S_T \geq 4,0$ МВ·А.

ДТЗ применяется в качестве основной быстродействующей защиты трансформаторов (автотрансформаторов). С учётом замыкания внутри обмоток, а также витковых КЗ, когда токи в защите могут быть малы, желательно, чтобы ток срабатывания защиты был как можно меньшим. В настоящее время для мощных дорогостоящих трансформаторов (63 МВ·А и больше) считается

необходимым иметь $I_{c3} = 0,3I_{ном.г}$; для трансформаторов меньшей мощности $I_{c3} = (1,5 \div 2,0)I_{ном.г}$, а в некоторых случаях для маломощных трансформаторов при достаточном коэффициенте чувствительности допустим $I_{c3} = (3 \div 4)I_{ном.г}$.

В настоящее время применяется общая продольная дифференциальная токовая защита. Однако при её выполнении необ-



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

ходимо учитывать схемы соединения обмоток защищаемого трансформатора. Рассмотренные в п.6.1 соотношения токов в схеме ДТЗ справедливы только для трансформаторов, имеющих одинаковые схемы соединения обмоток: Y/Y или Δ/Δ . При неодинаковых схемах соединения обмоток, например Y/Δ , эти соотношения несправедливы. Рассмотрим соотношения токов для наиболее распространенной схемы соединения обмоток Y/Δ -11 (рис. 6.7, а), принимая, как и в п. 6.1, коэффициент трансформации трансформатора равным единице.

В симметричном нагрузочном режиме, например для фазы A , первичный \dot{I}_{1T} и вторичный \dot{I}_{2T} токи на стороне треугольника трансформатора T опережают на угол $\pi/6$ соответствующие токи \dot{I}_{1Az} и \dot{I}_{2az} на стороне звезды (рис. 6.7, б). Угловой сдвиг токов создает большие токи небаланса в ДТЗ, что может привести к ложным или излишним ее срабатываниям. Фазовый сдвиг токов на стороне звезды и треугольника трансформатора T исключают за счёт различных схем соединения групп ТТ с разных сторон. На стороне звезды трансформатора T вторичные обмотки ТТ $TA1$ - $TA3$ соединены в треугольник по 11-й группе, а на стороне треугольника – в звезду (рис. 6.7, а). При этом ток в цепи циркуляции (в плече защиты) на стороне звезды $\dot{I}_{Ц.З}$ оказывается смещенным на $\pi/6$ относительно \dot{I}_{2az} и совпадает по фазе с током в цепях циркуляции на стороне треугольника $\dot{I}_{Ц.Т}$ (рис. 6.7, б).

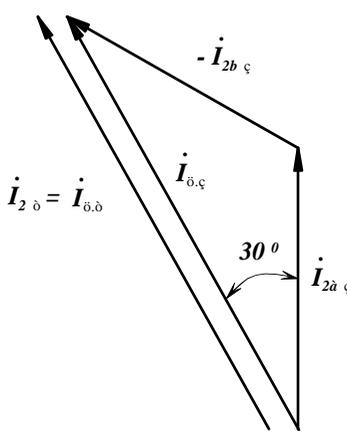
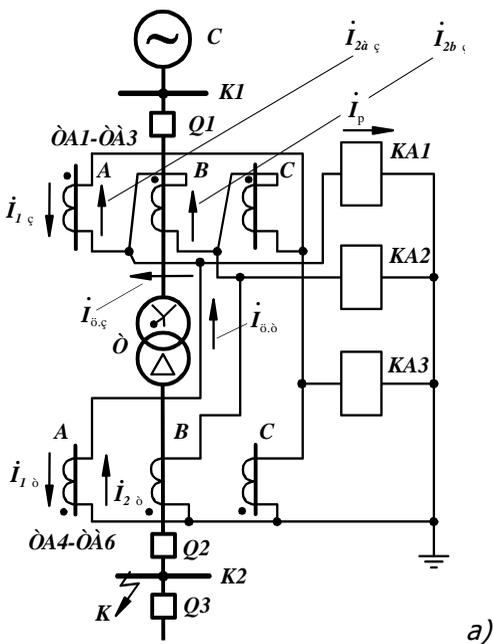


Рисунок 6.7. Принципиальная схема дифференциальной защиты трансформатора а), векторная диаграмма токов б)

Так как в схеме на рис. 6.7 в симметричном режиме ток в



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

цепи циркуляции и вторичный ток ТТ на стороне звезды трансформатора T связаны соотношением $\dot{I}_{Ц.З} = \sqrt{3}\dot{I}_{2аз}$, то для получения в цепях циркуляции равных токов ($\dot{I}_{Ц.З} = \dot{I}_{Ц.Т}$) коэффициенты трансформации ТТ следует выбирать с учётом следующих соотношений:

$$I_{1з.ном} = \frac{S_T}{\sqrt{3}U_{з.ном}}, \quad K_{Iз} = \frac{\sqrt{3}I_{1з.ном}}{I_{2ном}}$$

$$I_{1т.ном} = \frac{S_T}{\sqrt{3}U_{т.ном}}, \quad K_{Iз} = \frac{\sqrt{3}I_{1т.ном}}{I_{2ном}}$$

где $U_{з.ном}$, $U_{т.ном}$, $I_{1з.ном}$, $I_{1т.ном}$ – номинальные значения напряжений и токов на стороне звезды и треугольника трансформатора T ; $I_{2ном}$ – номинальный вторичный ток ТТ (1 или 5 А).

На рис. 6.8 приведена схема цепей оперативного тока ДТЗ. При внутренних повреждениях и срабатывании одного, двух или трёх реле KA подаётся плюс оперативного тока на обмотку промежуточного реле KL . Промежуточное реле KL срабатывает и подаёт своими контактами $KL.1$ и $KL.2$ плюс оперативного тока на отключающие катушки $YAT1$ и $YAT2$ приводов выключателей $Q1$ и $Q2$ через указательные реле $KH1$ и $KH2$ и вспомогательные контакты $SQ1$ и $SQ2$.

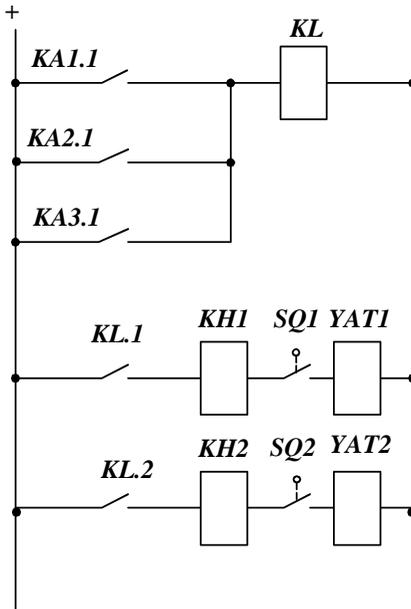


Рисунок 6.8. Схема цепей оперативного тока

Ток срабатывания ДТЗ трансформатора выбирается по следующим условиям:

1. Намагничивающий ток в нормальном режиме составляет примерно $1 \div 5\%$ номинального тока трансформатора и поэтому вызывает лишь некоторое увеличение тока небаланса. При включении трансформатора на холостой ход из-за переходного процесса в обмотке со стороны источника питания может возникать бросок намагничивающего тока, который в первый момент времени в $5 \div 8$ раз может превышать номинальный ток трансформатора. При расчётах ДТЗ ток срабатывания по условию отстройки от броска намагничивающего тока определяется по формуле

$$I_{сз} = k_{отс} I_{номТ} \quad (6.3)$$

где $I_{номТ}$ – номинальный ток трансформатора; $k_{отс}$ – коэффициент отстройки, который принимается равным $1 \div 1,3$ для реле РНТ-565 и 0,3 для реле ДЗТ-21.

2. Для отстройки ДТЗ от тока небаланса при внешнем трёх-



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

фазном КЗ её ток срабатывания должен удовлетворять условию

$$I_{сз} = k_{отс} k_a k_{одн} \varepsilon I_{к\max}^{(3)}, \quad (6.4)$$

где $k_{отс}$ – коэффициент отстройки, принимаемый равным 1,3; k_a – коэффициент, учитывающий переходный режим (для реле РНТ-565 может быть принят равным 1); $k_{одн}$ – коэффициент однотипности условий работы ТТ, принимаемый равным 0,5 в тех случаях, когда ТТ обтекаются близкими по значению токами, и равным 1 – в остальных случаях; $\varepsilon = 0,1$ – относительное значение полной погрешности ТТ, удовлетворяющее 10%-й кратности; $I_{к\max}^{(3)}$ – наибольший ток внешнего трёхфазного КЗ.

Ток срабатывания ДТЗ трансформатора принимается равным большему из двух значений токов срабатывания, определённых по выражениям (6.3) и (6.4). Коэффициент чувствительности ДТЗ трансформатора, определяемый по выражению (6.2), должен быть не менее двух.

6.5. Дифференциальная токовая защита сборных шин

Специальные защиты шин предназначены для отключения без выдержки времени повреждений, возникающих на сборных шинах. На шинах могут возникать такие же повреждения, как и на ЛЭП: однофазные и многофазные КЗ в сетях с заземлённой нейтралью, многофазные в сетях с изолированной нейтралью. Дифференциальная токовая защита сборных шин в настоящее время устанавливается практически на всех электрических станциях и подстанциях напряжением 110 кВ и более, работающих в режиме многостороннего питания.

ДТЗ сборных шин выполняется на тех же принципах, что и рассмотренные выше ДТЗ трансформаторов и генераторов. Токовое реле КА (рис. 6.9, рис.6.10) подключается к соединённым параллельно вторичным обмоткам ТТ, установленным на каждом присоединении. Коэффициенты трансформации всех ТТ равны.

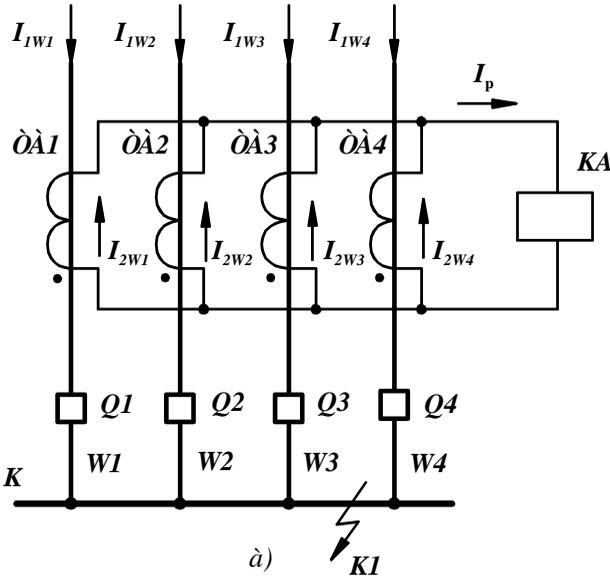


Рисунок 6.9. Распределение токов в цепях дифференциальной защиты шин при КЗ на шинах

При КЗ на шинах в зоне действия защиты шин по всем ЛЭП ток подтекает к месту повреждения в точку $K1$, в обмотке реле протекает сумма токов от всех ТТ, которая пропорциональна

току КЗ I_{K1} (рис. 6.9):

$$\begin{aligned} \dot{I}_p &= \dot{I}_{2W1} + \dot{I}_{2W2} + \dot{I}_{2W3} + \dot{I}_{2W4} = \\ &= (\dot{I}_{1W1} + \dot{I}_{1W2} + \dot{I}_{1W3} + \dot{I}_{1W4}) / K_I = \dot{I}_{K1} / K_I. \end{aligned}$$

При внешнем КЗ на ЛЭП $W1$ (рис.6.10) в точке $K2$ сумма токов, подтекающих к шинам по трём ЛЭП $W2$, $W3$ и $W4$, равна току, оттекающему от шин по повреждённой ЛЭП $W1$.

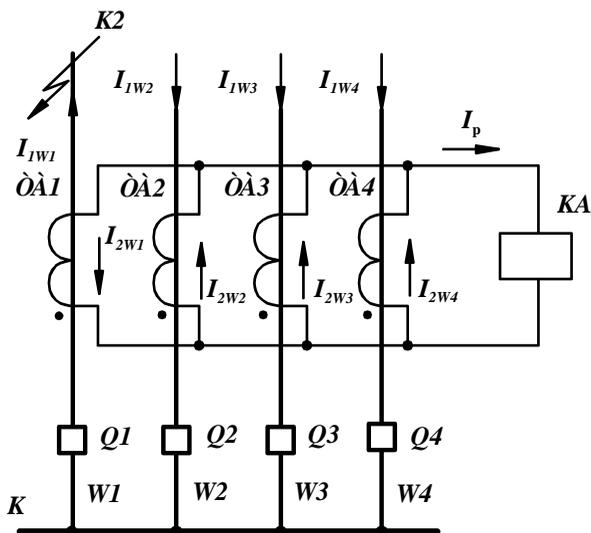


Рисунок 6.10. Распределение токов в цепях дифференциальной защиты шин при внешнем КЗ

При допущении работы ТТ без погрешности сумма токов в реле KA равна нулю, и реле не действует:

$$\begin{aligned} \dot{I}_p &= -\dot{I}_{2W1} + \dot{I}_{2W2} + \dot{I}_{2W3} + \dot{I}_{2W4} = \\ &= (-\dot{I}_{1W1} + \dot{I}_{1W2} + \dot{I}_{1W3} + \dot{I}_{1W4})/K_I = 0. \end{aligned}$$

На самом деле при внешнем КЗ в реле KA проходит ток небаланса, обусловленный разной погрешностью ТТ, включённых в схему защиты. Как уже отмечалось в п.3, погрешность ТТ обусловлена намагничивающим током. Окончательно получаем следующее:

$$\dot{I}_p = \dot{I}'_{1нам} - \dot{I}'_{2нам} - \dot{I}'_{3нам} - \dot{I}'_{4нам} = \dot{I}_{нб}.$$

В отличие от ДТЗ генератора ток небаланса в ДТЗ шин определяется не только и не столько различием магнитных характеристик и различием нагрузок Z_n ТТ, но главным образом разными значениями токов, проходящих по повреждённому и неповреждённому присоединениям при внешнем КЗ. Например, при внешнем КЗ в точке $K2$ по ЛЭП $W1$ проходит полный ток КЗ I_{K2} , поэтому намагничивающий ток и, следовательно, погрешность ТТ



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

$TA1$ будет существенно выше погрешностей ТТ $TA2-TA4$, через которые проходят определённые доли полного тока КЗ I_{K2} . В результате ток небаланса может достичь большого значения, и его необходимо учитывать в расчётах тока срабатывания реле KA .

Ток срабатывания токового тока KA в схеме ДТЗ шин выбирается по двум условиям:

1. Отстройка от максимального тока нагрузки наиболее нагруженного присоединения, что необходимо для предотвращения ложного срабатывания защиты при обрыве токовых цепей:

$$I_{cз} = k_{omc} I_{n \max}, \quad (6.5)$$

где k_{omc} – коэффициент отстройки, равный 1,2; $I_{n \max}$ – максимальный ток нагрузки наиболее нагруженного присоединения.

2. Отстройка от тока небаланса при внешнем КЗ:

$$I_{cз} = k_{omc} k_a \varepsilon I_{\kappa \max}^{(3)}, \quad (6.6)$$

где k_{omc} – коэффициент отстройки, равный 1,5; k_a – коэффициент, учитывающий переходный режим (при использовании реле РНТ принимается равным 1); ε – относительное значение

полной погрешности ТТ, равное 0,1; $I_{\kappa \max}^{(3)}$ – максимальный ток внешнего трехфазного КЗ, проходящий через ТТ защиты. К установке принимается больший из двух токов срабатывания, определённых по формулам (6.5) и (6.6).

Коэффициент чувствительности дифференциальной токовой защиты шин, определяемый по выражению (6.2), должен быть не менее двух.



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Принцип действия и характеристика продольной дифференциальной защиты.
2. Выбор уставки срабатывания продольной дифференциальной защиты.
3. Коэффициент чувствительности продольной дифференциальной защиты.
4. Поперечная дифференциальная защита.
5. Дифференциальная токовая защита генераторов.
6. Дифференциальная токовая защита трансформаторов.
7. Дифференциальная токовая защита сборных шин.



7. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЗАЩИТЫ

7.1. Назначение и виды высокочастотных защит

На линиях электропередач напряжением 110 кВ и выше средней и большой протяжённости (несколько сотен километров) в качестве основной защиты применяются высокочастотные (ВЧ) защиты. Они предназначены для быстрого отключения ЛЭП при КЗ в любой её точке с целью обеспечения устойчивости параллельной работы электрических станций и энергосистем в целом, а также в связи с ростом требований со стороны потребителей для сохранения устойчивости технологического процесса.

ВЧ защиты состоят из двух полукомплектов, расположенных по концам защищаемой ЛЭП. Особенность ВЧ защиты заключается в том, что для их селективного действия необходима связь между полукомплектами защиты, осуществляемая по защищаемой ЛЭП с помощью специального высокочастотного канала.

По принципу своего действия ВЧ защиты не реагируют на КЗ вне защищаемой ЛЭП и поэтому, так же как и дифференциальные токовые защиты, не имеют выдержки времени и являются защитами с абсолютной селективностью. В отечественных энергосистемах применяются два вида ВЧ защит:

- направленные защиты с высокочастотной блокировкой, основанные на сравнении направления полной мощности КЗ по концам защищаемой ЛЭП;
- дифференциально-фазные высокочастотные защиты, основанные на сравнении фаз токов КЗ по концам защищаемой ЛЭП.

Особенностью перечисленных ВЧ защит является наличие двух частей: релейной и высокочастотной.

7.2. Принципы выполнения и работа высокочастотной части защиты

Высокочастотные каналы, как правило, выполняются с использованием проводов защищаемой ЛЭП. На рис. 7.1 показана схема организации высокочастотного канала по ЛЭП *И*. Ток высокой частоты (ВЧ) в этой схеме передаётся по одной из фаз ЛЭП и возвращается через землю. Для высокочастотных каналов ВЧ защиты используются частоты в пределах $40 \div 500$ Гц.

Каждый комплект содержит высокочастотный приёмопе-



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

редатчик 1, состоящий из генератора высокочастотных сигналов ГН и приёмника ПР. Приёмопередатчик через фильтр присоединения 2 и конденсатор связи C соединяется с линией. Ток от высокочастотного генератора в этой схеме подаётся на одну из фаз линии. Для того чтобы токи высокой частоты не выходили за пределы линии, по концам линии устанавливаются специальные высокочастотные заградители 3.

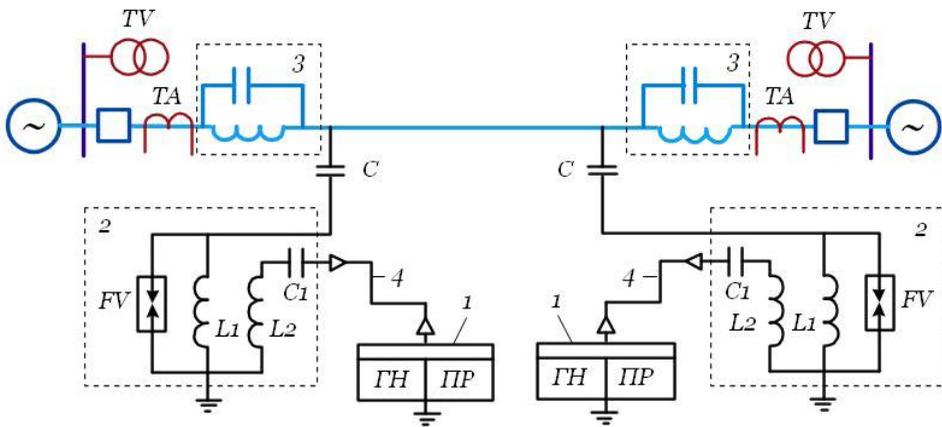


Рисунок 7.1. Принципиальная схема высокочастотного канала

Заградители устанавливаются за выключателями, а также ТТ защиты (TA), что препятствует выходу токов ВЧ за пределы защищаемой ЛЭП W .

Заградитель представляет собой резонансный контур из параллельно соединённых индуктивной катушки и элемента настройки в виде регулируемого конденсатора. Такой индуктивно-ёмкостный фильтр, обладающий малым сопротивлением для токов промышленной частоты, не пропускает токи высокой частоты за пределы защищаемой линии. Контур настраивается в резонанс

токов на принятую высокую частоту f_p и представляет для токов этой частоты очень большое сопротивление. При этом резонансное сопротивление заградителя должно быть не меньше 1000 Ом. Индуктивность катушки, по которой проходят рабочий ток и возможные токи КЗ, выбирается малой, практически не влияющей на работу ЛЭП.

Конденсаторы связи C включаются за заградителями в сторону ЛЭП. Сопротивление конденсатора связи, через который приёмопередатчик подключается к ЛЭП, зависит от частоты



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

проходящего через него тока. Для токов промышленной частоты 50 Гц оно велико (больше 1 МОм) и поэтому ток утечки весьма мал. При высоких частотах (больших 10 кГц) сопротивление конденсатора C очень мало. В результате ток высокой частоты, проходящий по ЛЭП, будет ответвляться в конденсатор C и дальше через фильтр присоединения проходить в приёмопередатчик. Одновременно конденсатор C изолирует приёмопередатчик от рабочего напряжения ЛЭП.

Фильтры присоединения 2 представляют собой воздушные трансформаторы с индуктивностями обмоток $L1$ и $L2$, во вторичную обмотку которых включён конденсатор $C1$. Фильтр совместно с конденсатором связи, около которого он устанавливается, образует полосовой фильтр, пропускающий только токи необходимой полосы частот приёмопередатчика. С помощью фильтра согласовывается (уравнивается) входное сопротивление высокочастотного кабеля 4 и ЛЭП. В качестве высокочастотного кабеля используется одножильный концентрический экранированный кабель с малым затуханием ВЧ сигналов (кордельный или радиокабель). Параллельно обмотке с индуктивностью $L1$ фильтра подключён разрядник FV , который срабатывает и создаёт надёжный путь для отвода в землю токов КЗ в случае пробоя конденсатора связи или перекрытия его изоляции.

Приёмопередатчики 1 генерируют и принимают сигналы токов ВЧ. Передатчики (генераторы) $ГН$ пускаются в работу и останавливаются сигналами релейной части ВЧ защиты. Сигналы, получаемые на выходе приёмников $ПР$, вводятся в релейные части ВЧ защиты для их правильного функционирования. Рабочая частота приёмопередатчиков обеих сторон ЛЭП, как правило, выбирается одинаковой. Приёмники $ПР$ могут принимать ВЧ сигналы как передатчика $ГН$ противоположной стороны ЛЭП, так и своей, если это требуется.

7.3. Направленная защита с высокочастотной блокировкой

Направленной защитой с высокочастотной блокировкой называется защита с косвенным сравнением направлений полной мощности КЗ по концам защищаемой ЛЭП, использующая ВЧ канал, по которому при внешних КЗ передаются блокирующие сигналы (БС), обеспечивающие в этих режимах её несрабатывание.

Работа защиты иллюстрируется на рис. 7.2. При КЗ в точке K срабатывают органы направления мощности защиты 1, 3, 4,



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

а защиты 2 не срабатывает, так как направление мощности короткого замыкания на этом конце линии от линии к шинам. Защита 2 посылает высокочастотный сигнал, запрещающий (блокирующий) срабатывание защиты 1, а защиты 3 и 4 срабатывают и отключают повреждённую линию.

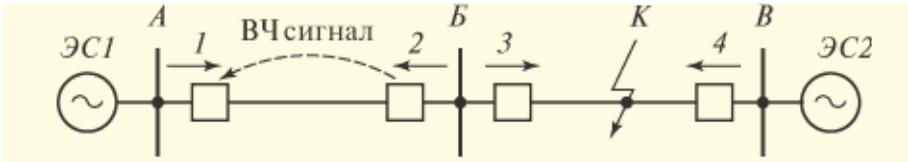


Рисунок 7.2. Принцип работы направленной защиты с высокочастотной блокировкой:

1,2; 3,4 – направленные защиты линий *АВ* и *ВВ* соответственно

радиальной сети с двухсторонним питанием; ЭС1, ЭС2 – энергосистемы

Однолинейная схема защиты приведена на рис. 7.3, где показан полукомплект защиты на стороне *А* ЛЭП *W*. Аналогичный полукомплект защиты устанавливается и на стороне *В* ЛЭП *W*. Органом направления мощности является реле направления мощности (РНМ) *КВ* двухстороннего действия. Оно включается на

\dot{U}_p и \dot{I}_p и при направлении полной мощности КЗ от шин в ЛЭП замыкает свой контакт *КВ.2* и действует через пусковой орган *КА1* на отключение через реле *КЛ1* и *КЛ2*. При направлении полной мощности КЗ к шинам РНМ замыкает свой контакт *КВ.1* и действует через второй пусковой орган *КА2* на пуск передатчика *ГМ*.

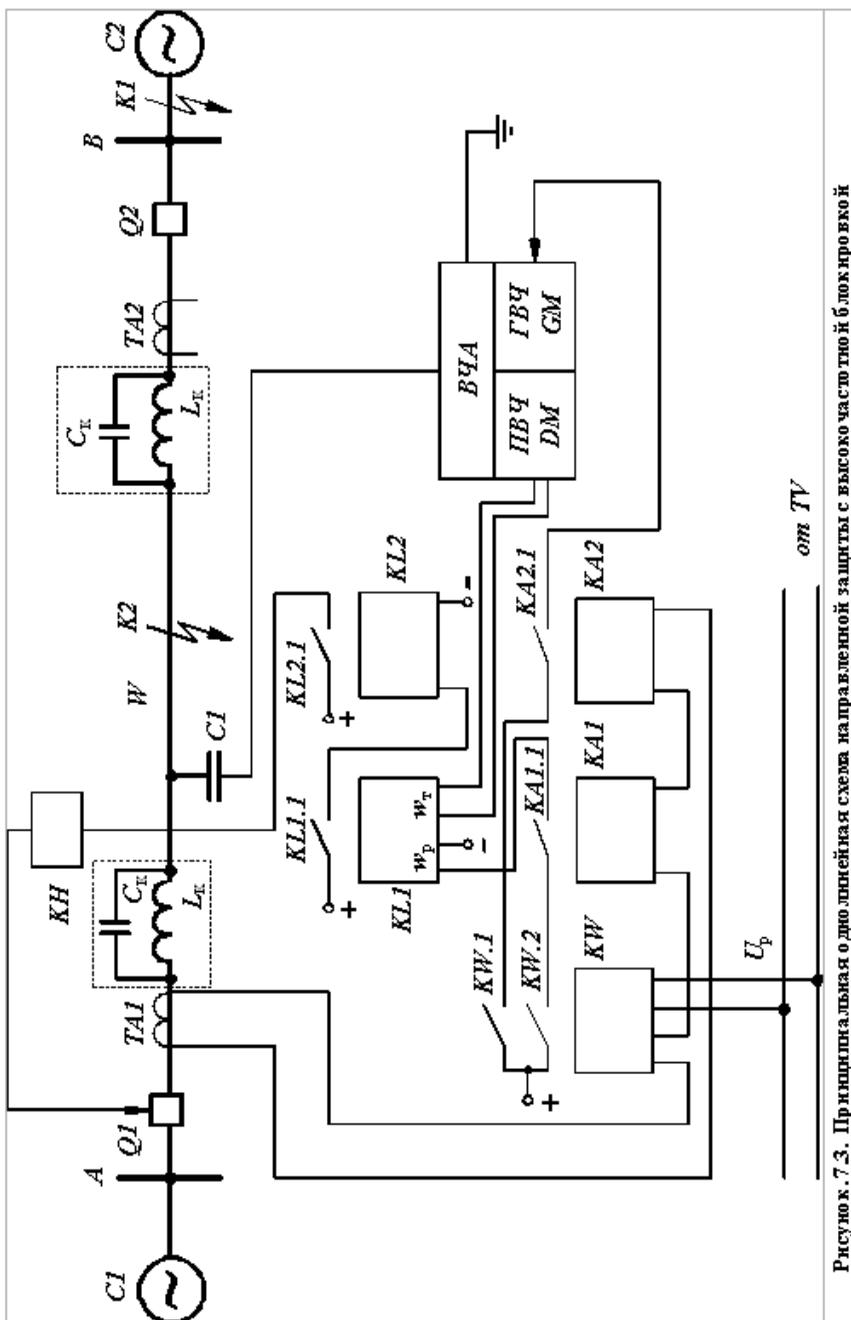


Рисунок 7.3. Принципиальная схема направленной защиты с высоко частотной блокировкой



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

Пусковые органы $KA1$ и $KA2$ имеют разную чувствительность. Более чувствительным (меньший ток срабатывания – $I_{с.р}$) должен быть пусковой орган $KA2$, через который пускается передатчик GM .

Реле $KL1$, обычно поляризованное, предназначается для блокировки защиты при внешних КЗ. Рабочая обмотка W_p реле $KL1$ получает питание оперативным током при срабатывании реле KW и $KA1$ и замыкании их контактов $KW.2$ и $KA1.1$ своего полуккомплекта защиты. Тормозная обмотка W_T питается выпрямленным током от приёмника DM при поступлении в него БС.

Реле $KL1$ действует только при токе в рабочей обмотке, а при наличии тока в тормозной обмотке или в обеих обмотках оно не действует. Поэтому реле $KL1$ даёт возможность срабатывать защите только при КЗ на защищаемой ЛЭП W , когда отсутствует блокирующий сигнал (БС). Защита действует на отключение выключателей $Q1$ и $Q2$ через выходное промежуточное и указательное реле $KL2$ и KN . Ниже рассматривается работа защиты при внешнем и внутреннем КЗ.

Внешнее КЗ в точке $K1$. Срабатывают KW , $KA1$ и $KA2$ обоих полуккомплектов защиты. В полуккомплекте защиты со стороны А РНМ KW замкнёт свой контакт $KW.2$ и через замкнутый контакт $KA1.1$ будет подано питание оперативным током рабочей обмотки W_p реле $KL1$. В полуккомплекте защиты со стороны В РНМ KW замкнёт свой контакт $KW.1$ и через замкнутый контакт $KA2.1$ будет подано оперативное питание на пуск передатчика GM . Передатчик GM полуккомплекта защиты со стороны В посылает БС на сторону А.

Приёмник DM полуккомплекта защиты со стороны А принимает БС, выпрямляет его и подаёт на тормозную обмотку W_T реле $KL1$. В результате у реле $KL1$ полуккомплекта защиты со стороны А оказываются с током обе обмотки. Поэтому полуккомплект защиты со стороны А, как и защита в целом, не действует.

Внутреннее КЗ в точке $K2$. Срабатывают РНМ KW (замыкаются их контакты $KW.2$), $KA1$ и $KA2$ (последнее не определяет работу схемы) обоих полуккомплектов защиты. Передатчики GM не пускаются, приёмники DM не принимают БС, реле $KL1$ действуют на отключение, так как с током оказываются только их рабочие



обмотки W_p .

Выбор параметров срабатывания пусковых органов. Токи внешних КЗ могут оказаться близкими к токам срабатывания пусковых органов. При этом за счёт неодинаковых погрешностей ТТ и уставок реле двух полуккомплектов защиты может сработать пусковой орган только с одной стороны, например, со стороны *A*, где полная мощность КЗ направлена от шин в ЛЭП.

В этом случае в ВЧ канале отсутствует БС, так как не сработал пусковой орган со стороны *B*, где полная мощность КЗ направлена к шинам. При этом защита излишне отключит ЛЭП. При наличии двух пусковых органов разной чувствительности в этом случае не сработает более грубое реле *КА1*, действующее на отключение. Это исключит срабатывание защиты даже при отсутствии БС. Токи срабатывания пусковых органов защиты выбираются по следующим выражениям:

$$I_{cKA2} = k_{omc} I_{nmax} / (k_B k_I),$$

$$I_{cKA1} = 1,5 k_{omc} I_{cKA2},$$

где $k_{omc} = 1,1$ – коэффициент отстройки; $k_B = 0,85$ –

коэффициент возврата реле; I_{nmax} – наибольший ток нагрузки, принимаемый по длительно допустимому току ЛЭП; k_I – коэффициент трансформации ТТ ЛЭП.

Чувствительность пусковых органов, управляющих отключением, проверяется по КЗ на противоположном конце ЛЭП, коэффициент чувствительности должен быть не менее $1,5 \div 2,0$.

На аналогичном принципе действия основана работа серийно выпускаемой электротехнической промышленностью панели на микроэлектронной элементной базе типа ПДЭ-2802.

7.4. Дифференциально-фазная высокочастотная защита

Дифференциально-фазной высокочастотной защитой называется защита с косвенным сравнением фаз тока КЗ по концам защищаемой ЛЭП, использующая ВЧ канал для передачи информации о комплексах сравниваемых токов.



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

Свойства защиты рассматриваются применительно к её выполнению, приведенному на рис. 7.4. Здесь, как и в случае направленной защиты с ВЧ блокировкой, показан только полукомплект защиты на стороне А ЛЭП *И*.

Пусковой орган выполняется для каждого полукомплекта защиты с помощью реле тока; *КА1–КА4*. Реле *КА1* и *КА2* включены на полный ток одной из фаз, *КА3* и *КА4* – на слагающую I_2 через фильтр обратной последовательности *ЗА2*. Пусковые органы предназначены для действия защиты соответственно при $K^{(3)}$ (*КА1* и *КА2*) и любых несимметричных $KЗ – K^{(1)}, K^{(2)}, K^{(1,1)}$ (*КА3* и *КА4*). Реле с одинаковым включением, например, *КА1* и *КА2*, имеют разную чувствительность. Более чувствительные *КА1* и *КА3* пускают передатчик *ГМ* через вспомогательное реле *КЛ1*, а менее чувствительные *КА2* и *КА4* через вспомогательное реле *КЛ2* подготавливают цепи отключения. Этим, как и у направленных защит с ВЧ блокировкой, исключается возможность излишнего срабатывания защиты при внешних КЗ с токами, близкими к токам срабатывания пусковых органов.

Измерительный орган фаз определяет угол сдвига фаз между током в месте установки полукомплекта защиты и током в полукомплекте защиты противоположного конца ЛЭП. Информация о фазе тока с противоположного конца ЛЭП передается ВЧ сигналами. Для этого в полукомплекте защиты каждой стороны ЛЭП имеется орган управления передатчиком *ГМ*, называемый органом манипуляции (ОМ) (манипуляция – частный случай фазовой модуляции).



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

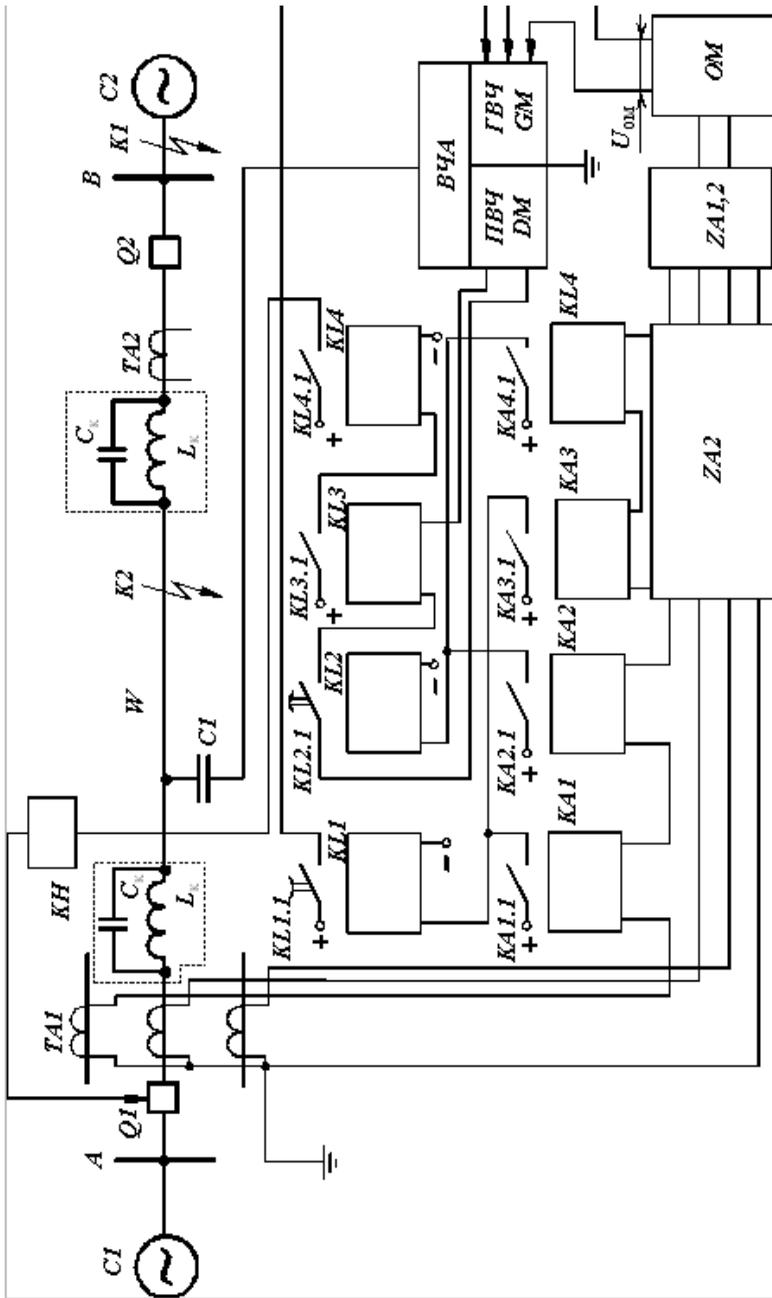


Рис. 7.4. Принципиальная схема дифференциально-фазной высоко частотной защиты



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

Орган манипуляции разрешает работу передатчика GM лишь в положительные полупериоды токов промышленной частоты 50 Гц. Поэтому передатчик GM посылает в ВЧ канал манипулированный сигнал - пакеты ВЧ сигналов. Длительность и отсутствие каждого из этих ВЧ сигналов равна половине периода промышленной частоты (0,01 с), а их фазы соответствуют фазе тока КЗ со стороны рассматриваемого полуккомплекта защиты.

Для того чтобы фаза одного тока с каждой стороны ЛЭП несла информацию о фазах токов трёхфазной сети, используются симметричные составляющие токов. На ОМ каждого полуккомплекта защиты подаются напряжения с выходов комбинированных

фильтров токов прямой \dot{I}_1 и обратной \dot{I}_2 последовательностей $Z_{A1,2}$. На выходе фильтра $Z_{A1,2}$ напряжение будет равно:

$$\dot{U}_{Z_{A1,2}} = \omega M (\dot{I}_1 + k \dot{I}_2)$$

где M – коэффициент взаимоиנדукции фильтра $Z_{A1,2}$.

Следовательно, в защите определяется угол между напряжениями $\dot{U}_{Z_{A1,2}}$ с двух сторон ЛЭП. Сравнение фаз $\dot{U}_{Z_{A1,2}}$ в полуккомплектах защиты производится в приёмниках DM , подающих сигналы на реагирующие элементы – поляризованные реле $KL3$. Приёмники DM , принимающие ВЧ сигналы как со своего передатчика GM , так и с другой стороны защищаемой ЛЭП, работают (на их выходе появляются напряжение \dot{U}_{DM} и ток \dot{I}_{DM}) только при отсутствии принимаемых ВЧ сигналов. Работа защиты при внешнем и внутреннем КЗ поясняется на рис. 7.5.

Внешнее КЗ для защиты ЛЭП $W1$ в точке К (рис. 7.5). Срабатывают $KA1$ и $KA2$ при $K^{(3)}$, $KA3$ и $KA4$ при несимметричных КЗ, $KL1$ и $KL2$. Токи по концам неповреждённой ЛЭП $W1$ при принятых положительных направлениях от шин в ЛЭП, сдвинуты на угол 180° . Поэтому передатчики GM полуккомплектов защиты $AK1$ и $AK2$ работают не одновременно и посылают ВЧ сигналы, сдвинутые на полпериода. Складываясь, они дают непрерывные блокирующие ВЧ сигналы в приёмниках DM полуккомплектов защиты $AK1$ и $AK2$.

При этом выходные напряжения приёмников DM равны нулю и защита ЛЭП $W1$ не срабатывает. Для обеспечения блокирования передатчики GM пускаются до начала сравнения фаз, а останавливаются только после отключения внешнего КЗ. Первое



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

обеспечивается реле $KL2$, имеющим замедление при действии, второе – реле $KL1$, имеющим замедление при отпуске.

Внутреннее КЗ для защиты ЛЭП $W2$ в точке К. Вначале срабатывают те же реле, что и в предыдущем случае. Токи по концам ЛЭП $W2$ принимаются совпадающими по фазе (рис. 7.5). Поэтому передатчики GM полукомплектов защиты $AK3$ и $AK4$ работают одновременно и посылают ВЧ сигналы, совпадающие по фазе. Результирующие ВЧ сигналы в приемниках DM полукомплектов защиты $AK3$ и $AK4$ имеют скважности. Поэтому на выходе приемников DM появляются импульсы напряжения \dot{U}_{DM} и ток \dot{I}_{DM} , проходящий через реле $KL3$ и вызывающий его срабатывание, а через промежуточное реле $KL4$ и указательное реле KH происходит срабатывание защиты в целом.



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

Выбор параметров срабатывания пусковых органов. Параметры срабатывания выбираются одинаковыми для обоих полукомплектов защиты. При симметричных повреждениях ток срабатывания реле пуска передатчика *GM* отстраивается от максимального тока нагрузки ЛЭП по следующему выражению:

$$I_{cKA1} = k_{omc1} I_{n\max} / (k_B k_I).$$

Здесь в правой части выражения величины и их значения аналогичны направленной защите с ВЧ блокировкой.

Ток срабатывания реле подготовки цепи отключения выбирают по условию согласования с током срабатывания реле пуска передатчика *GM* по следующему выражению:

$$I_{cKA2} = k_{c1} I_{cKA1},$$

где $k_{c1} = 1,4 \div 1,5$ – коэффициент согласования цепей пуска передатчика *GM* и подготовки отключения полукомплектов защиты при симметричных повреждениях.

При несимметричных повреждениях ток срабатывания фильтр–реле обратной последовательности пуска передатчика *GM* отстраивается от тока небаланса в максимальном нагрузочном режиме по следующему выражению:

$$I_{cKA3} = k_{omc2} (I_{2нб.н} + I_{2нес.н}) / (k_B k_I),$$

где $k_{omc2} = 1,2$ – коэффициент отстройки;
 $k_B = 0,4 \div 0,5$ – коэффициент возврата фильтра-реле;

$I_{2нб.н} = k_{2нб} I_{n\max}$ – приведенный к первичной цепи ток небаланса фильтра обратной последовательности *ZA2*;

$k_{2нб} = 0,02 \div 0,03$ – коэффициент небаланса фильтра обратной последовательности *ZA2*, $I_{2нес.н}$ – ток обратной последовательности при несимметричной нагрузке, приведенный к первичной цепи.

Ток срабатывания фильтр–реле обратной последовательности подготовки цепи отключения выбирается по следующему выражению:



$$I_{cKA4} = k_{c2} I_{cKA3},$$

где $k_{c2} = 2$ – коэффициент согласования цепей пуска передатчика *GM* и подготовки отключения полукомплектов защиты при несимметричных повреждениях.

Чувствительность пусковых органов проверяется по КЗ на противоположном конце ЛЭП, коэффициент чувствительности должен быть не менее 1,5-2.

На аналогичном принципе действия основана работа серийно выпускаемых электротехнической промышленностью панелей ДФЗ-201 для ЛЭП 110-220 кВ и ДФЗ-501,503,504 для ЛЭП 330-500 кВ.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назначение и виды высокочастотных защит.
2. Принципы выполнения и работа высокочастотной части защиты.
3. Направленная защита с высокочастотной блокировкой.
4. Дифференциально-фазная высокочастотная защита.
5. Принцип работы панели типа ПДЭ-2802.
6. Принцип работы панелей ДФЗ-201 и ДФЗ-501.



ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ЗАЩИТА ГЕНЕРАТОРОВ

П.1. Синхронные генераторы относятся к наиболее ответственному оборудованию, работающему в режиме интенсивных электрических и механических нагрузок. Их выход из работы может привести к возникновению системной аварии, поэтому устройства релейной защиты должны в полном объёме обеспечивать требования быстродействия, селективности, чувствительности и надёжности.

П.1.1. Виды повреждений и ненормальных режимов работы генераторов

Повреждения генераторов

Витковые замыкания являются опасным видом повреждения и характеризуются протеканием больших токов в замкнутых витках при незначительном изменении тока в неповреждённой части обмотки.

Замыкания на землю – наиболее часто возникающий режим повреждения. В месте замыкания на землю возникает дуга, которая может привести к значительным разрушениям стали статора.

Многофазные короткие замыкания. Наиболее вероятной причиной их возникновения являются однофазные замыкания при нарушении изоляции в лобовых частях обмотки. Возникающие токи могут привести к значительным разрушениям генератора, поэтому требуют немедленного отключения.

Повреждения обмотки ротора. Обмотки ротора генератора находятся под невысоким напряжением 300 – 500 В, поэтому их изоляция обладает значительным запасом прочности. Однако из-за тяжёлых механических условий работы относительно часто возникают замыкания на землю в одной или двух точках. Замыкание на землю в одной точке ротора не влияет на работу генератора, но при этом возникает возможность замыкания в другой точке возбуждения. При его появлении часть обмотки ротора шунтируется. Искажение магнитного поля машины приводит к возникновению вибрации и разрушению подшипников и уплотнений вала генератора, обгоранию изоляции и оплавлению меди



обмотки.

Аномальные режимы работы генераторов

Внешние короткие замыкания должны ликвидироваться защитами смежных присоединений. Однако в случае отказа защиты или выключателя этого элемента ток короткого замыкания должен быть отключён защитой генератора.

Перегрузки генератора возникают в результате отключения или отделения части параллельно работающих генераторов, при работе форсировки возбуждения, самозапуске двигателей, потере возбуждения и т. д.

Перегрузки вызывают перегрев обмоток, старение изоляции и, как следствие, её повреждение. При возникновении перегрузки защита должна действовать на сигнал и только в тех случаях, когда разгрузка генераторов не даёт результатов, по истечении допустимого времени генераторы должны отключаться.

Несимметрия фазных токов возникает при внешних однофазных и двухфазных замыканиях, при большой несимметричной нагрузке близких потребителей, при неполнофазных режимах работы энергосистемы.

Несимметрия сопровождается появлением в обмотке статора токов обратной последовательности. При этом в роторе возникают токи двойной частоты, вызывающие его повышенный нагрев и вибрацию вращающихся частей машины.

Повышение напряжения возникает в результате неисправности системы возбуждения. Защита от повышения напряжения обязательна к установке на гидрогенераторах и турбогенераторах мощностью 160 мВт и более.

Асинхронный режим возникает при потере возбуждения и в результате

нарушения устойчивости и сопровождается потреблением из сети значительного реактивного тока, понижением напряжения на зажимах генератора, увеличением частоты вращения ротора, возникновением местных перегревов ротора и повышенным нагревом крайних пакетов статора. Из-за повышенных значений тока статора работа генератора в асинхронном режиме ограничивается по времени. Для турбогенераторов мощностью 63 – 500 мВт длительность асинхронного режима допускается до 15 минут,



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

для турбогенераторов мощностью 800 мВт и более асинхронный режим недопустим.

П.1.2 Защита генераторов от внутренних повреждений

Для защиты генераторов от внутренних повреждений применяются следующие защиты:

- продольная дифференциальная защита;
- поперечная дифференциальная защита;
- защита от замыканий на землю.

П.1.2.1 Продольная дифференциальная защита

Продольная дифференциальная защита является основной защитой генератора от многофазных коротких замыканий. Защита присоединяется к трансформаторам тока, установленным со стороны фазных и нулевых выводов генератора (рис.П.1.1).

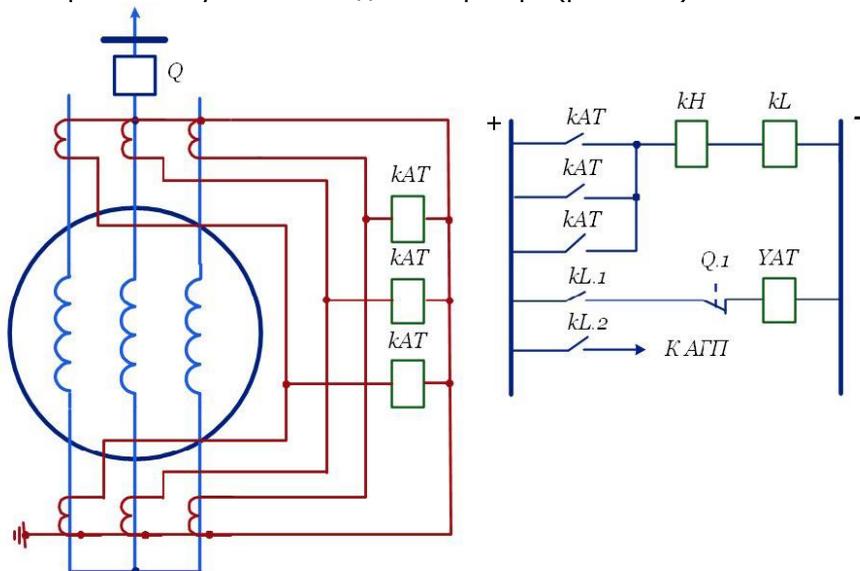


Рисунок П.1.1 Схема продольной дифференциальной защиты генератора

Принцип действия защиты основан на сравнении токов, протекающих со стороны фазных и нулевых выводов. В зону действия защиты входят обмотки, выводы статора и шины до распределительных устройств. Для повышения чувствительности в качестве пусковых органов используются токовые реле с насыщаю-



щимися трансформаторами или реле с торможением.

Чувствительность дифференциальной защиты оценивается по току двухфазного короткого замыкания для двух режимов: повреждение генератора при отключённом выключателе, когда ток повреждения подходит к месту короткого замыкания только от генератора, и повреждение генератора, включаемого методом самосинхронизации, когда ток короткого замыкания поступает только из сети. Значение коэффициента чувствительности должно быть не менее двух.

П.1.2.2 Поперечная дифференциальная защита

Поперечная дифференциальная защита устанавливается на генераторах, обмотки статора которых содержат две параллельные ветви, и предназначена для защиты от витковых замыканий. Принцип действия защиты основан на сравнении токов, протекающих по параллельным ветвям. Защита выполняется односистемной на токовом реле с фильтром высших гармоник. Это реле присоединяется к трансформатору тока, врезанному в перемычку между нейтральными параллельных обмоток статора (рис.П.1.2).

В нормальном режиме работы ЭДС соответствующих ветвей генератора равны между собой:

$$EA_1=EA_2; EB_1=EB_2; EC_1=EC_2.$$

При возникновении виткового замыкания, например, при замыкании части витков ветви 1 фазы А, ЭДС этой ветви становится меньше ЭДС параллельной ветви:

$$EA_1 < EA_2,$$

в нулевом проводе начинает протекать ток, и реле работает.

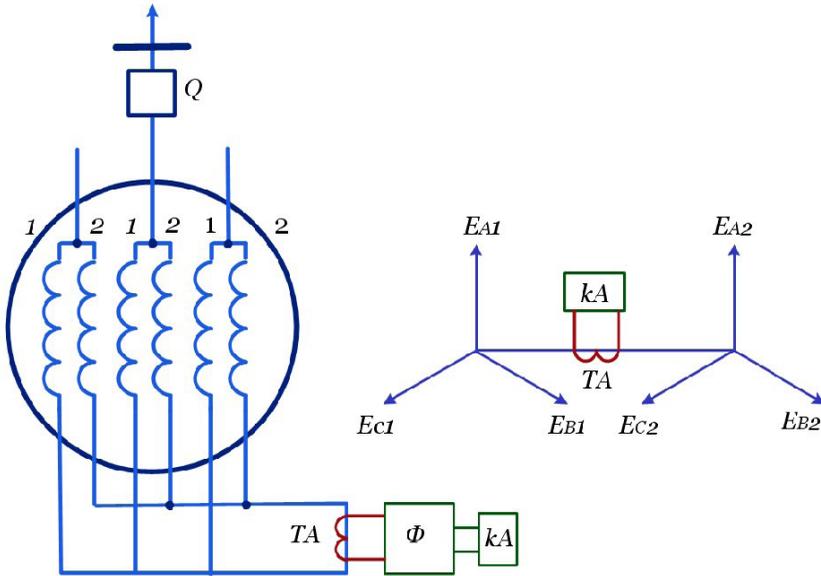


Рисунок П.1.2 Схема поперечной дифференциальной защиты генератора

Первичный ток срабатывания защиты при проектировании принимается равным $0,2I_{ном}$ генератора.

Ликвидация витковых замыканий в обмотке статора, не имеющей параллельных ветвей, возлагается на защиту от замыканий на землю.

П.1.2.3 Защита от замыканий на землю

Выбор типа защиты генератора от замыканий на землю зависит от режима его работы. При работе генератора на сборные шины защита выполняется на принципе контроля ёмкостного тока присоединения или на принципе наложения на цепь статора переменного тока. При работе генератора в режиме блока защиты могут выполняться с использованием напряжений нулевой последовательности, на принципе наложения на цепь статора постоянного тока или переменного тока, имеющего частоту отличную от промышленной.

Защита от замыканий на землю обмотки статора генератора, реагирующая на величину ёмкостного тока.

Защита выполняется на трансформаторе тока нулевой по-



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

следовательности с подмагничиванием типа ТНПШ. Подмагничивание смещает рабочую область индукции из начальной части характеристики намагничивания на крутой, практически прямолинейный участок. Схема включения защиты для генераторов ТВФ-63 приведена на рис.П.1.3.

Во вторичную цепь ТНПШ включены токовое реле $kA1$ типа $PT3-51$ для защиты генератора от однофазных замыканий на землю и реле kAT типа РНТ-565 для защиты от двойных замыканий на землю. Для предотвращения излишних срабатываний реле $kA1$ при внешних междуфазных замыканиях вводится блокировка $Бл$ защитами от внешних симметричных и несимметричных замыканий.

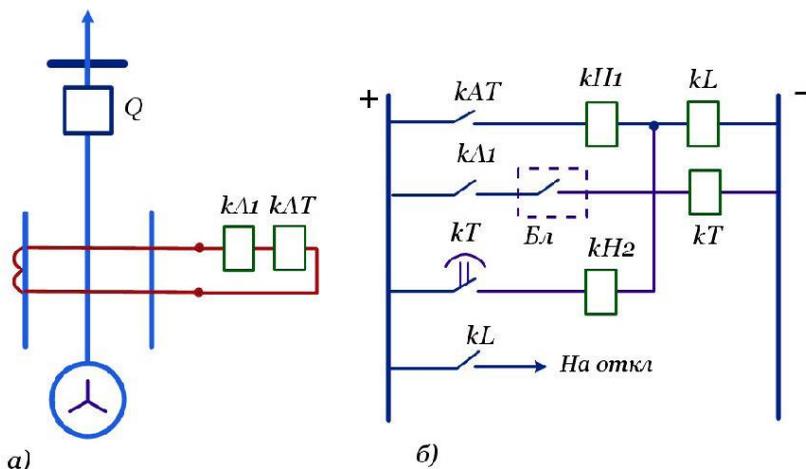


Рисунок П.1.3 Схема генератора от замыканий на землю

а) токовые цепи; б) цепи оперативного постоянного тока

Ток срабатывания реле $kA1$ защиты от замыканий на землю обмотки статора должен удовлетворять следующим условиям:

- быть не выше 5 А;
- быть больше тока небаланса, проходящего через ТНПШ при внешнем двухфазном КЗ.

Для определения первичного тока срабатывания можно воспользоваться следующим приближённым выражением

$$I_{сз} = \frac{2I_{сз} + 1,5I_{нб}}{k_{\sigma}}$$



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

где $I_{сг}$ – собственный ёмкостный ток генератора; $k_{в}$ – коэффициент возврата, равный 0,93 для реле типа РТЗ-51; $k_{в}$ – ток небаланса, приведенный к первичной стороне ТНПШ, упрощённо можно принять 1–1,5 А.

Выдержка реле времени kT выбирается из условий отстройки от переходных процессов при внешних замыканиях на землю и принимается равной 1,5 – 2,0 с.

Защита от замыканий на землю в обмотке статора турбогенератора, реагирующая на наложенный переменный ток.

На ряде электростанций для генераторов, работающих на сборные шины компенсированной сети, применяется защита от замыканий на землю с наложением на цепь статора генератора переменного тока частоты 25 Гц. Наложённое напряжение подаётся от источника контрольного тока *ИКТ*, выполненного на основе параметрического делителя частоты и включённого в цепь дугогасящего ректора *ДГР* (рис.П.1.4). Реагирующий орган *РО* содержит токовый элемент, фиксирующий увеличение контрольного тока, и реле блокировки, запрещающее работу защиты при внешних двухфазных коротких замыканиях.

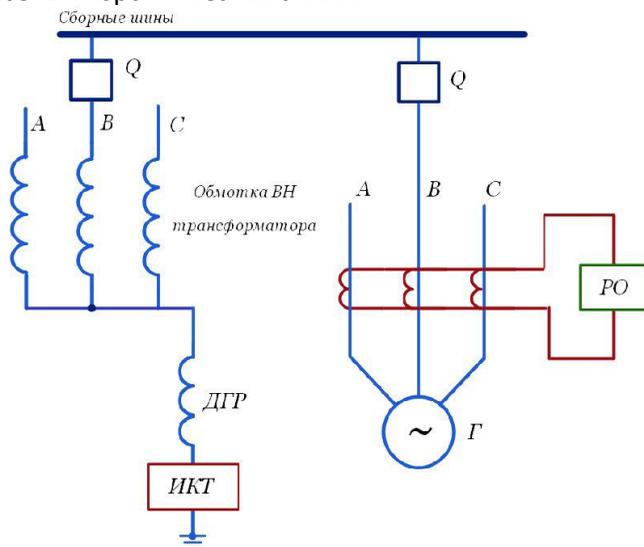


Рисунок П.1.4 Схема включения защиты на наложенном переменном токе



Настройка защиты заключается в установке тока срабатывания и тока, при котором действие защиты блокируется. На основании рекомендаций разработчика ток срабатывания на частоте 25 Гц принимается равным 0,3 А, ток срабатывания блокировки при номинальной частоте, отнесённый к вторичным цепям, берётся равным 60–70 мА.

П.1.3 Защита генераторов от внешних коротких замыканий

Защиты генератора от внешних замыканий предназначены для отключения генератора при отказе защит или выключателей смежных присоединений и резервирования основных защит генератора.

Выбор типа защиты зависит от мощности генераторов. Для генераторов малой мощности, до 30 МВт, применяется максимальная токовая защита с блокировкой по напряжению; для генераторов средней мощности, от 30 до 60 МВт – двухступенчатая токовая защита обратной последовательности; для генераторов большей мощности – четырёхступенчатая токовая защита обратной последовательности и дистанционная защита.

П.1.3.1 Максимальная токовая защита с блокировкой по напряжению

Защита выполняется на трёх реле тока, включённых на фазные токи. Токowe реле подключаются к трансформаторам тока, установленным со стороны нулевых выводов обмотки статора. Для исключения срабатывания защиты при перегрузках пусковой орган дополнен блокировкой по напряжению из двух реле напряжения, реле напряжения обратной последовательности $kV2$ и реле минимального напряжения $kV1$ (рис.П.1.5).

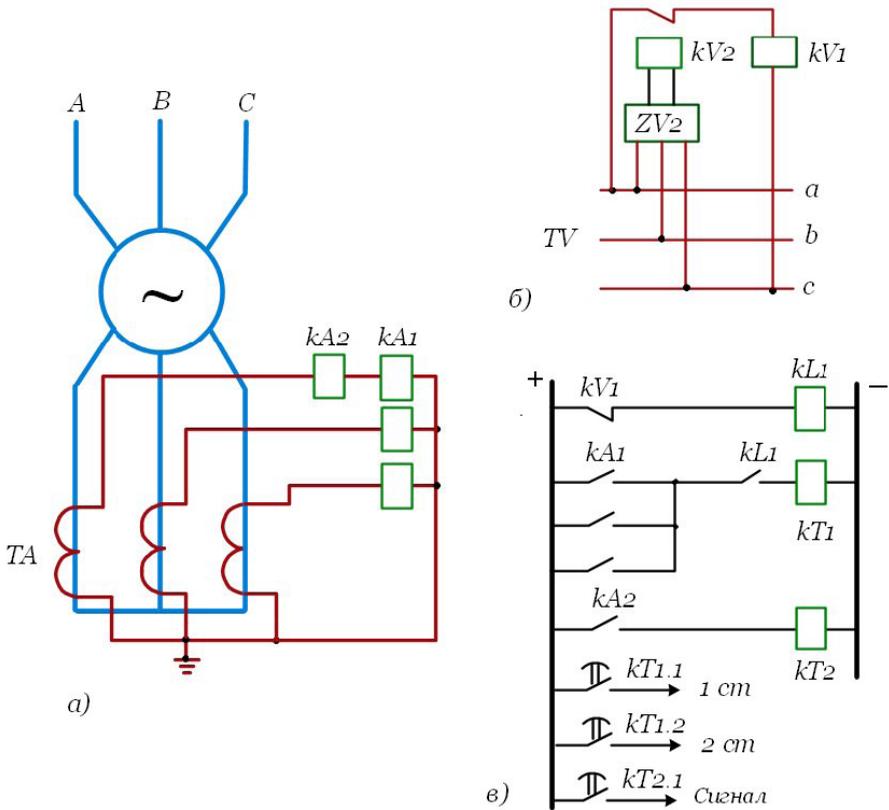


Рисунок П.1.5 Схема максимальной токовой защиты с блокировкой по напряжению: а) цепи переменного тока; б) цепи напряжения; в) цепи постоянного тока

При перегрузках реле kV_1 держит свой контакт разомкнутым, блокируя действие защиты. При несимметричных коротких замыканиях из-за появления напряжения обратной последовательности сработает реле kV_2 и разорвёт цепь питания реле напряжения kV_1 . Реле kV_1 , сработав, своим контактом подаст питание на промежуточное реле kL , и блокировка защиты снимется. При трёхфазных коротких замыканиях работает kV_1 и разрешает работу защиты.

Ток срабатывания токовых реле отстраивается от номинального тока генератора. Напряжение срабатывания минимального реле напряжения отстраивается от минимального значения



рабочего напряжения. Для предотвращения неправильного срабатывания защиты при самозапуске электродвигателей собственных нужд допускается в случае необходимости уменьшать напряжение срабатывания до $0,5U_{ном}$.

Напряжение срабатывания реле напряжения обратной последовательности выбирается из условия отстройки от напряжения небаланса на выходе фильтра.

Защита выполняется с двумя выдержками времени: с первой через контакт реле времени подаётся сигнал на отключение секционных и шиносоединительных выключателей, а со второй - на отключение генератора. Реле $kA2$, включённое на фазный ток генератора, выполняет функции защиты от перегрузки.

П.1.3.2 Токовая защита обратной последовательности

Для генераторов средней и большой мощности токовая защита с блокировкой по напряжению не обеспечивает требуемой чувствительности, в особенности при дальнем резервировании. Поэтому для защиты таких генераторов от внешних замыканий применяется токовая защита обратной последовательности.

Для защиты генераторов мощностью 30–60 МВт от внешних несимметричных замыканий используется двухступенчатая токовая защита обратной последовательности. Защита выполнена на двух реле тока $kA2$ и $kA3$, подключённых к фильтру токов обратной последовательности (рис.П.1.6).



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

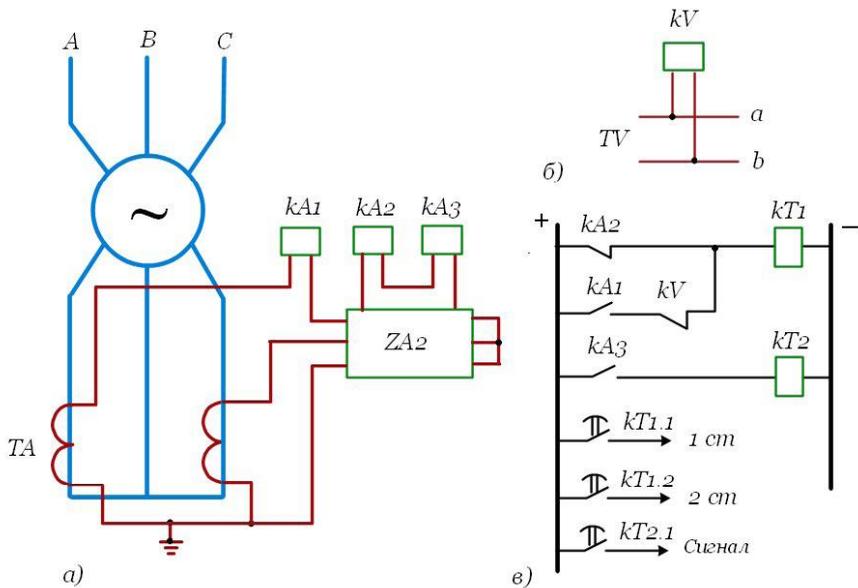


Рисунок П.1.6 Схема двухступенчатой токовой защиты обратной последовательности: а) цепи переменного тока; б) цепи напряжения; в) цепи оперативного постоянного тока.

Токовое реле первой ступени $kA2$ должно обеспечить требования ближнего и дальнего резервирования

$$I_{сз}^{1cm} = (0,3 \div 0,7) I_{ном.}$$

Реле второй ступени $kA3$ предназначено для сигнализации возникновения несимметричной нагрузки в сети:

$$I_{сз}^{2cm} = (0,08 \div 0,1) I_{ном.}$$

Реле $kA1$ и kV обеспечивают действие защиты при симметричных замыканиях. На турбогенераторах мощностью 60 МВт и более для защиты от внешних несимметричных коротких замыканий применяется четырёхступенчатая токовая защита обратной последовательности.

Четырёхступенчатая токовая защита обратной последовательности включает в себя две отсечки, сигнальный, пусковой и интегральные органы (рис.П.1.7).

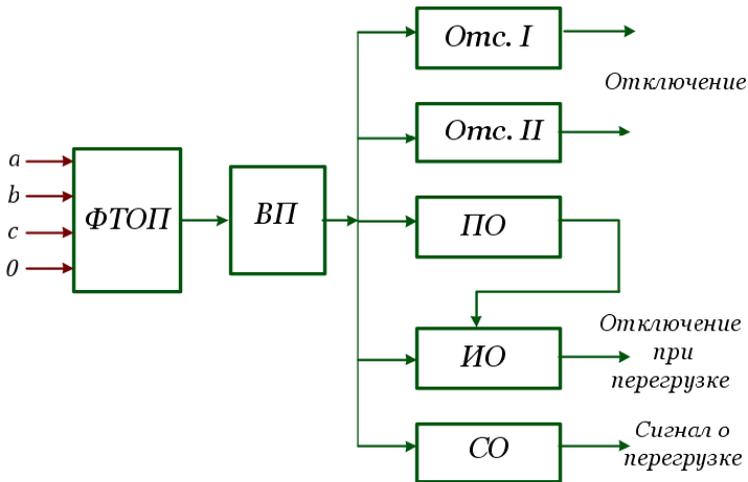


Рисунок П.1.7 Структурная схема четырёхступенчатой токовой защиты обратной последовательности

Информация о токе с выхода фильтра токов обратной последовательности *ФТОП* через входные преобразователи *ВП* подаётся на схему. Чувствительная отсечка *I* предназначена для дальнего резервирования, грубая отсечка *II* – для ближнего резервирования, интегральный орган *ИО* – для защиты генератора от перегрузки токами обратной последовательности, сигнальный орган *СО* – для сигнализации о возникновении несимметричной перегрузки.

Ток срабатывания отсечки *II* выбирается по выражению

$$I_{2cp.omcII} = \frac{I_{2*}^{(2)}}{k_u}$$

где $k_u = 1,5$ – требуемый коэффициент чувствительности; $I_{2*}^{(2)}$ – сверхпереходный ток обратной последовательности при коротком замыкании на выводах генератора.

Принимать более высокий коэффициент чувствительности не рекомендуется во избежание излишних срабатываний при коротких замыканиях за трансформатором. Выдержка времени отсечки *II* принимается равной 0.3 с.

Применение отсечки *II* необходимо на энергоблоках с вы-



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

ключателем в цепи генератора, где она обеспечивает сохранение в работе трансформатора блока и питание собственных нужд при повреждении генератора и отказе основной защиты. На энергоблоках без выключателей в цепи генератора установка отсечки II не обязательна.

Ток срабатывания отсечки I выбирается из условий обеспечения необходимой чувствительности при двухфазном коротком замыкании в конце зоны резервирования и согласования с резервными защитами от междуфазных коротких замыканий. Отсечка I с первой выдержкой времени, отстроенной от выдержки времени резервных защит присоединений, действует на деление шин, а со второй, принимаемой на ступень селективности больше первой, – на отключение генераторного выключателя или выключателя блока.

Интегральный орган защиты имеет характеристику срабатывания, соответствующую перегрузочной способности генератора к токам обратной последовательности, и запускается пусковым органом $ПО$,

$$I_{2ср.аб.ПО} = (0,08 \div 0,24)I_{ном}$$

Ток срабатывания сигнального органа принимается равным

$$I_{2ср.аб.СО} = 0,09I_{ном}$$

выдержка времени должна быть больше времени действия резервных защит блока.

П.1.3.3 Дистанционная защита

Дистанционная защита применяется на турбогенераторах мощностью 60 МВт и более для защиты от внешних симметричных коротких замыканий.

Защита выполняется на реле с круговой или эллиптической характеристикой, смещённой в III квадрант. Защита включается на разность токов $(I_a - I_b)$ трансформаторов тока, установленных в нейтрали генератора, и на междуфазное напряжение U_{ab} трансформатора напряжения, установленного на выводах генератора (рис.П.1.8).

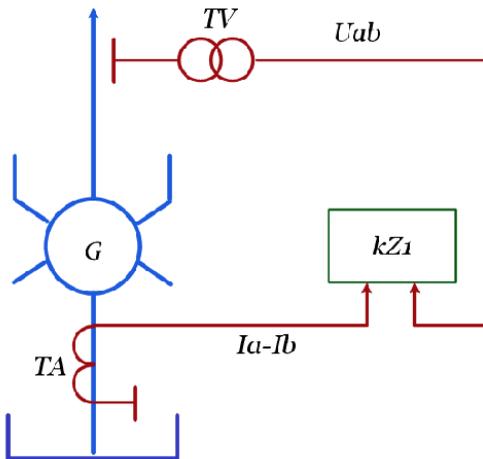


Рисунок П.1.8 Схема включения дистанционной защиты от внешних коротких замыканий

Сопротивление срабатывания защиты выбирается из условия отстройки от максимального нагрузочного режима

$$Z_{сз} = \frac{Z_{нагр}}{k_{отс} k_{\epsilon} \cos(\varphi_{мч} - \varphi_{нагр})},$$

$$Z_{нагр} = \frac{U_{\min}}{\sqrt{3} I_{нагр \max}}$$

где $Z_{нагр}$ – сопротивление нагрузки в максимальном нагрузочном режиме; $U_{\min} = 0,95U_{ном}$ – напряжение нагрузочного режима; $I_{нагр \max} = 1,5I_{ном}$ – расчётное значение максимального тока нагрузки; $k_{отс} = 1,25$ – коэффициент отстройки; $k_{\epsilon} = 1,05$ – значение коэффициента возврата; $\varphi_{мч} = 80^{\circ}$ – значение угла максимальной чувствительности; $\varphi_{нагр}$ – угол нагрузки в расчётном режиме.

П.1.3.4 Защита от повышения напряжения



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

речная дифференциальная защита; 3 – защита от замыканий на землю в обмотке статора; 4 – токовая защита обратной последовательности; 5 – резервная дистанционная защита; 6 – защита от потери возбуждения; 7 – сигнализация симметричной перегрузки генератора; 8 – защита от перегрузки обмотки ротора; 9 – защита от замыканий на землю в цепи возбуждения; 10 – реле тока устройства резервирования при отказах выключателя.



ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ЗАЩИТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

П.2. При выполнении защит трансформаторов и автотрансформаторов необходим учёт следующих режимов:

- многофазных замыканий в обмотках и на выводах;
- однофазных замыканий в обмотках и на выводах;
- витковых замыканий в обмотках;
- внешних коротких замыканий;
- повышения напряжения на неповреждённых фазах (для трансформаторов 110 кВ, работающих в режиме изолированной нейтрали);
- частичных пробоев изоляции вводов напряжением 500 кВ и более;
- перегрузки трансформатора;
- понижения уровня масла или отключение принудительной системы охлаждения;
- "пожара" стали магнитопровода.

Защита трансформаторов и автотрансформаторов должна выполнять следующие функции:

- отключать трансформатор при его повреждении от всех источников питания;
- отключать трансформатор при внешних замыканиях в случае отказа защит или выключателей смежных присоединений;
- подавать сообщения дежурному персоналу о возникновении перегрузок или выполнять необходимые операции для их устранения.

П.2.1 Выбор типа защит

Для защиты трансформаторов от повреждений и ненормальных режимов должны быть предусмотрены следующие типы релейной защиты:

1. От повреждений на выводах и внутренних повреждений – токовая отсечка или продольная дифференциальная защита.

Продольная дифференциальная защита ставится на трансформаторах мощностью 6300 кВА и более, на трансформаторах меньшей мощности - токовая отсечка.

2. От повреждений внутри кожуха, сопровождающихся выделением газа и (или) понижением уровня масла, – газовая защита с действием на

сигнал и отключение:

- для трансформаторов мощностью 6300 кВА и более;



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

- для внутрицеховых понижающих трансформаторов мощностью 630 кВА и более;
- для трансформаторов мощностью (1000 – 4000) кВА, если отсутствует быстродействующая защита.

3. От токов внешних коротких замыканий должны быть установлены

следующие защиты с действием на отключение:

- максимальная токовая защита для трансформаторов мощностью до 1000 кВА;
- максимальная токовая защита или максимальная токовая защита с комбинированным пуском напряжения или токовая защита обратной последовательности для трансформаторов мощностью 1000 кВА и более;
- дистанционная защита на понижающих автотрансформаторах напряжением 220 кВ и более, если это необходимо по условиям дальнего резервирования.

4. От возможной перегрузки на трансформаторах мощностью 400 кВА и более следует предусматривать максимальную токовую защиту с действием на сигнал или на разгрузку и на отключение.

5. От токов внешних замыканий на землю при наличии заземлённой нейтрали для трансформаторов мощностью 1000 кВА и более устанавливается максимальная токовая защита нулевой последовательности, если это необходимо по условиям дальнего резервирования.

П.2.2 Защита от внутренних повреждений

Для защиты трансформаторов от внутренних повреждений и повреждений на выводах применяются:

- токовая отсечка,
- продольная дифференциальная защита,
- газовая защита.

П.2.2.1 Токовая отсечка

Токовая отсечка устанавливается на трансформаторах со стороны питания (рис.П.2.1). Для обеспечения требований селективности её ток срабатывания отстраивается от тока трёхфазного короткого замыкания на шинах низшего напряжения:

$$I_{сз} = k_n I_{кз \max}^{(3)}$$

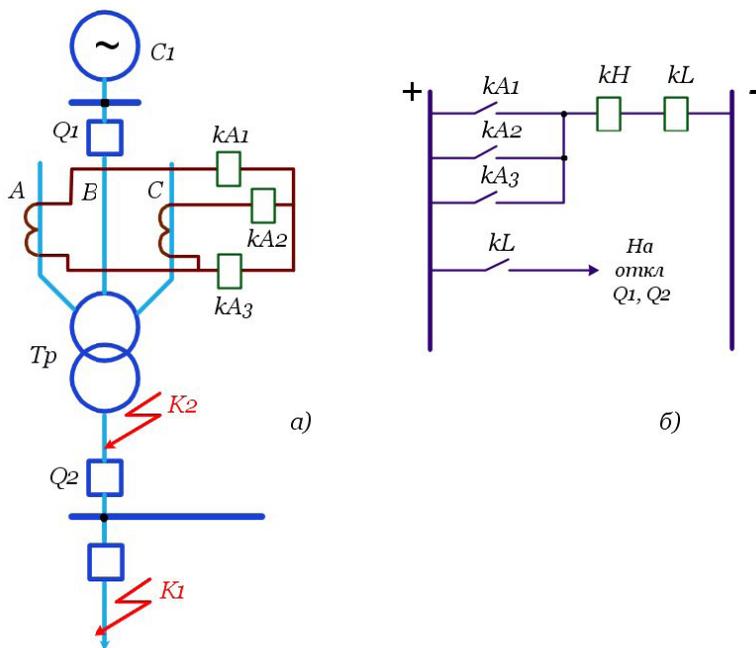


Рисунок П.2.1 Схема токовой отсечки трансформатора: а) цепи переменного тока;

б) цепи постоянного тока

Чувствительность отсечки проверяется по току двухфазного короткого замыкания на вводах трансформатора со стороны источника питания, точка $K2$:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{кз min}}^{(2)}}{I_{\text{сз}}} \geq 2$$

Использование токовой отсечки позволяет отключать короткие замыкания с высоким быстродействием. К недостаткам следует отнести невысокую чувствительность и то, что отсечка защищает только часть трансформатора.

П.2.2.2 Дифференциальная защита

Принцип действия защиты основан на сравнении токов по входам защищаемого трансформатора. Для выполнения защиты на каждой стороне трансформатора ставятся трансформаторы тока с такими коэффициентами трансформации, чтобы их вторичные токи в нормальном режиме были примерно равны между со-



бой.

Вторичные обмотки трансформаторов тока соединяются между собой параллельно, и к ним подключается токовое реле (рис.П.2.2).

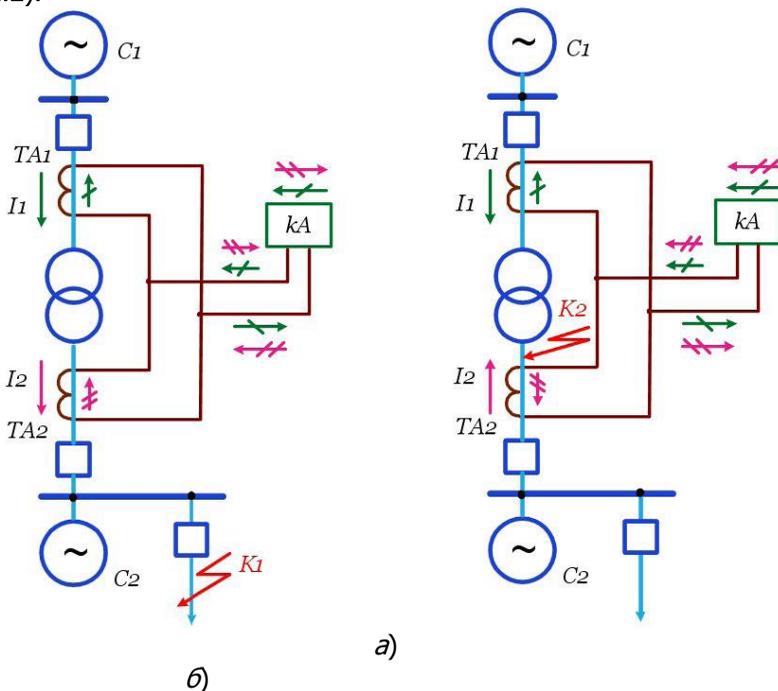


Рисунок П.2.2 Принцип действия дифференциальной защиты трансформатора:

а) внешнее короткое замыкание; б) короткое замыкание в трансформаторе

В нормальном режиме и при внешнем коротком замыкании в точке K1

ток в реле близок к нулю:

$$I_p = \frac{I_1}{k_{IA1}} - \frac{I_2}{k_{IA2}} \approx 0$$

и защита не работает.

При повреждении трансформатора, короткое замыкание в точке K2, в реле проходит сумма вторичных токов



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

$$I_p = \frac{I_1}{k_{IA1}} + \frac{I_2}{k_{IA2}} \neq 0$$

и защита работает.

По сравнению с дифференциальной защитой линий, дифференциальная

защита трансформаторов обладает повышенными погрешностями.

Причины появления погрешностей:

1. Разные схемы соединения обмоток силового трансформатора. В этом случае, даже при равенстве вторичных токов из-за наличия фазового сдвига в реле будет протекать ток небаланса (рис.П.2.3). Для устранения тока небаланса трансформаторы тока на стороне треугольника силового трансформатора соединяют в звезду, а на стороне звезды в треугольник.

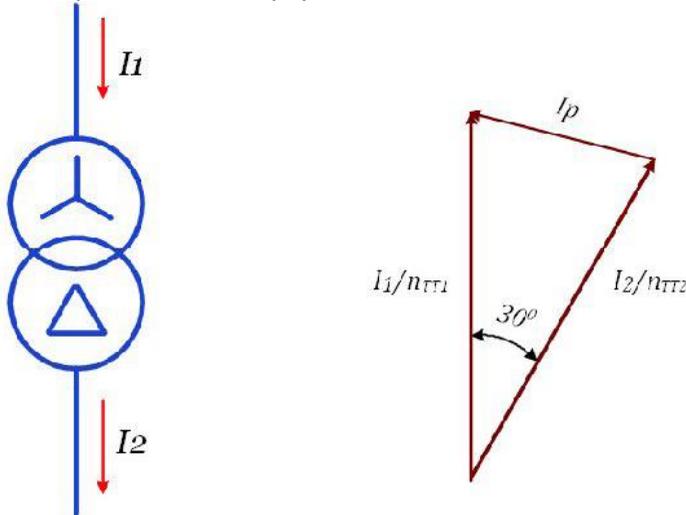


Рисунок П.2.3 Ток небаланса в реле при разных схемах соединения обмоток силового трансформатора

2. Наличие броска тока намагничивания. При включении трансформатора под напряжение в обмотке трансформатора со стороны источника питания возникает бросок намагничивающего тока, который в первый момент времени в 5 – 8 раз превышает номинальный и затухает в течение 1 – 2 с.

К характерным признакам броска тока намагничивания можно отнести наличие аперидической слагающей и значи-



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

тельный процент высших гармоник, в первую очередь чётных.

Поскольку броски тока намагничивания воздействуют на защиту как внутренние замыкания, от них необходимо отстраиваться. К основным способам отстройки можно отнести следующие:

- принять ток срабатывания больше максимального значения броска тока намагничивания (при этом защита существенно загрубляется);
- ввести замедление в действие защиты на время броска тока намагничивания (замедление времени срабатывания защиты);
- использовать признак наличия апериодической составляющей в токе намагничивания;
- фиксировать момент включения по наличию второй гармоники.

Практическая реализация третьего способа состоит в том, что обмотка токового реле подключается к трансформаторам тока через специальный промежуточный трансформатор, называемый быстронасыщающимся трансформатором. За счёт апериодической составляющей сердечник трансформатора насыщается, и трансформации периодической составляющей в обмотку реле практически не происходит. Следовательно, на время существования броска тока намагничивания защита выводится из работы.

В начальный момент возникновения короткого замыкания также возникает апериодическая составляющая, но время её протекания составляет доли секунды и практически замедления срабатывания защиты не происходит.

Использование четвёртого признака предполагает введение дополнительного пускового элемента – реле отсечки, которое должно работать при больших кратностях первичного тока. При внутренних повреждениях, связанных с глубоким насыщением трансформаторов тока, во вторичном токе появляется вторая гармоника, что может привести к отказу защиты.

3. Разные вторичные токи в плечах защиты. Токи силовых трансформаторов со стороны обмоток высшего и низшего напряжений не равны между собой, поэтому трансформаторы тока, выбираемые по номинальному первичному току, будут иметь разные коэффициенты трансформации, различное конструктивное исполнение и, соответственно, различные погрешности. Кроме того, номинальные токи силовых трансформаторов обычно не совпадают со шкалой номинальных токов трансформаторов тока. Вследствие этого в плечах дифференциальной защиты будут про-



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

текать разные по величине токи.

При внешнем коротком замыкании ток небаланса резко возрастает, что

может привести к ложному срабатыванию защиты. Поэтому для снижения тока небаланса, вызванного неравенством вторичных токов, необходимо выровнять эти токи путем включения промежуточных выравнивающих автотрансформаторов тока или использовать в дифференциальном реле специальные уравнивательные обмотки.

4. Наличие устройства автоматического регулирования напряжения силового трансформатора. Устройства автоматического регулирования напряжения силовых трансформаторов меняют коэффициент трансформации защищаемого трансформатора, в результате чего меняются соотношения первичных токов и, соответственно, вторичные токи трансформаторов тока.

При выборе тока срабатывания дифференциальной защиты во внимание принимается два фактора:

1. Защита не должна работать от броска тока намагничивания в момент включения ненагруженного силового трансформатора под напряжение:

$$I_{сз} = k_n I_{НОМ},$$

где $k_n = 0,3 \div 1,5$ – коэффициент надёжности, учитывающий выполнение измерительного органа защиты.

2. Защита не должна работать от максимально возможного тока небаланса в режиме внешнего замыкания:

$$I_{сз} = k_n (I'_{нб} + I''_{нб} + I'''_{нб}),$$

где $I'_{нб}$ – составляющая тока небаланса, вызываемая погрешностью трансформаторов тока; $I''_{нб}$ – составляющая тока небаланса, вызываемая наличием устройства регулирования коэффициента трансформации силовых трансформаторов; $I'''_{нб}$ – составляющая тока небаланса, вызываемая неточностью выравнивания вторичных токов в плечах защиты.

В ряде случаев при внешних замыканиях через реле проходят большие токи небаланса, учёт которых существенно загроубляет защиту и может привести к отказу защиты при некоторых видах повреждений. Для повышения чувствительности дифференциальной защиты в та-



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

ковой орган с торможением. Принцип эффекта торможения можно рассмотреть на примере дифференциального реле с быстронасыщающимся трансформатором (рис.П.2.4).

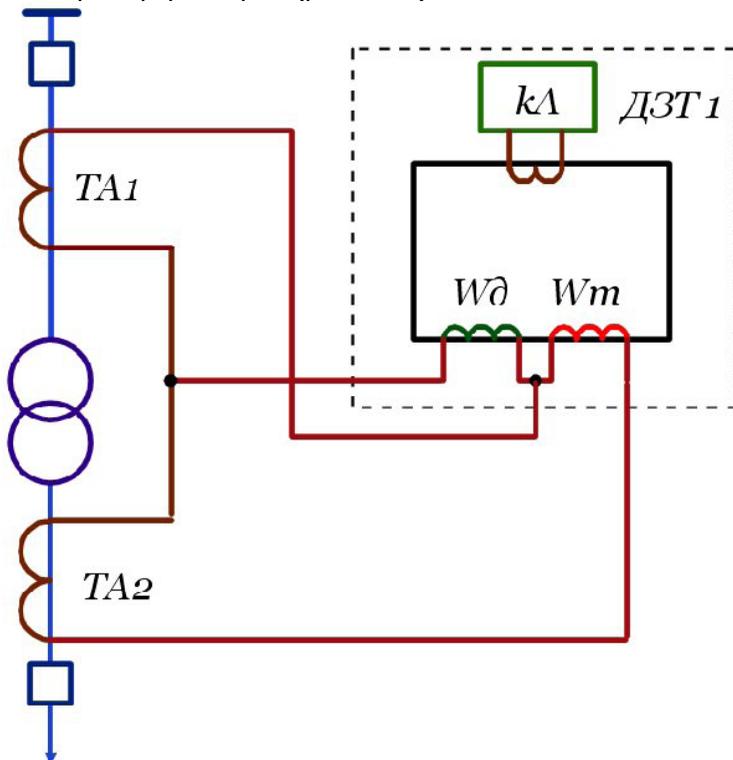


Рисунок П.2.4 Принцип действия защиты с торможением:

W_d - рабочая обмотка; W_m - тормозная обмотка

При возникновении внешнего короткого замыкания по рабочей обмотке W_d протекают два приблизительно равных и направленных встречно друг другу тока $I_{1вт}$ и $I_{2вт}$. За счёт магнитодвижущих сил, создаваемых этими токами,

$$I_{1вт}W_d - I_{2вт}W_d = I_{нб}W_d,$$

в сердечнике быстронасыщающегося трансформатора *БНТ* создаётся результирующий поток, который пронизывает витки выходной обмотки и может привести к срабатыванию реле. Ток



$I_{2\text{вт}}$ в тормозной обмотке W_m создаёт дополнительный поток, который насыщает сталь сердечника и загроубляет защиту.

При внутреннем коротком замыкании ток $I_{2\text{вт}}$ отсутствует, и реле kA сработает. Сопоставление чувствительности защиты без торможения и с торможением показано на рис.П.2.4.

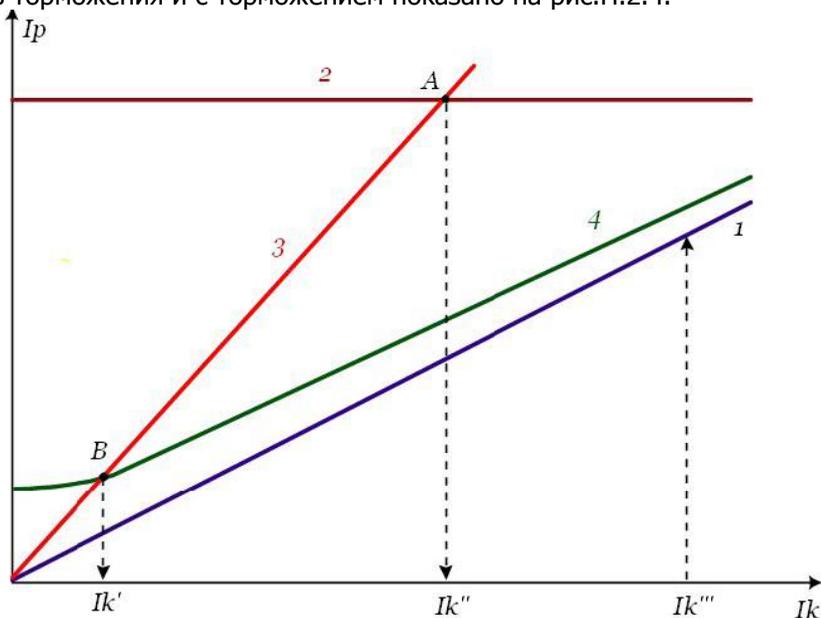


Рисунок П.2.5 Тормозная характеристика дифференциальной защиты с торможением: 1 – ток небаланса защиты в зависимости от величины тока короткого замыкания; 2 – зависимость тока срабатывания защиты без торможения; 3 – ток в реле при внутреннем коротком замыкании; 4 – зависимость тока срабатывания защиты с торможением; I_k''' – максимально возможное значение тока внешнего короткого замыкания; I_k'' – значение тока короткого замыкания, при котором сработает защита без торможения; I_k' – значение тока короткого замыкания, при котором сработает защита с торможением.

П.2.2.3 Защита трансформаторов на реле типа RET



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

Цифровая защита типа *RET 316* фирмы АББ Реле-Чебоксары применяется:

- на электростанциях для защиты трансформаторов собственных нужд, трансформаторов и автотрансформаторов связи, блочных трансформаторов;
- в электрических сетях для защиты трёхобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов.

RET 316 состоит из следующих блоков (рис.П.2.6):

- 1 – аналоговый входной блок,
- 2 – входной блок обработки,
- 3 – центральное процессорное устройство,
- 4 – блок ввода/вывода,
- 5 – дополнительная плата связи и памяти,
- 6 – материнская плата,
- 7 – блок питания.

В аналоговом входном блоке *1* производится гальваническая развязка входных сигналов и их нормирование. В состав блока может входить до шести трансформаторов тока и трёх трансформаторов напряжения или девяти трансформаторов тока.

Входной блок обработки *2* преобразует аналоговые сигналы в цифровые с помощью *АЦП* и производит цифровую фильтрацию сигналов под управлением входного процессора типа *80186*. Дискретизация входных сигналов производится 12 раз за период, т.е. частота дискретизации составляет 600 Гц.

Центральное процессорное устройство *3* состоит из главного микропроцессора защиты (*Intel 80186*) и микропроцессора логики (*Intel 8031*). Основной микропроцессор получает сигналы от входного микропроцессорного устройства, реализует алгоритм защиты и передаёт результат вычислений микропроцессору логики. Последовательный интерфейс *RS-232C*, входящий в *ЦПУ*, позволяет настроить защиту с персонального компьютера оператора и передать информацию о происходящих событиях на персональный компьютер.



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

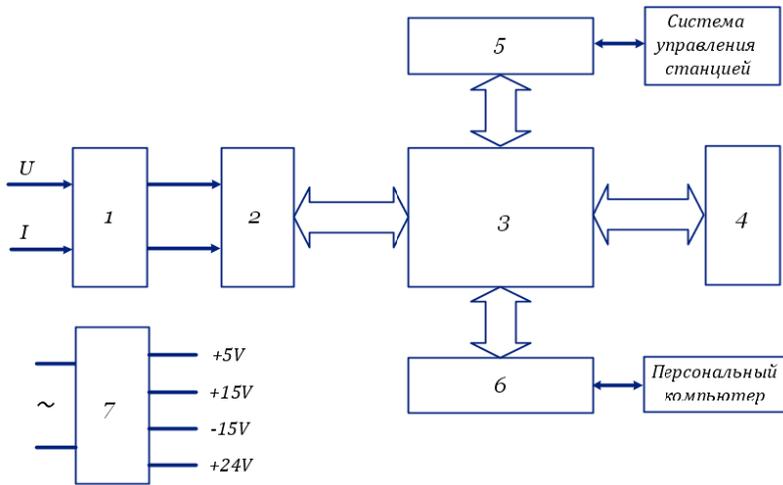


Рисунок П.2.6. Блок-схема защиты трансформатора RET 316

Дополнительная плата связи и памяти 5 содержит микропроцессор *Intel 80186* для обеспечения связи защиты и системы управления электростанцией, часы реального времени. Плата позволяет дистанционно устанавливать параметры защиты, передавать результаты измерений тока, напряжения, мощности и т.д. оперативному персоналу станции и на регистратор отклонений.

Программное обеспечение защиты позволяет:

- отстроиться от броска тока намагничивания;
- выполнить амплитудно – фазовую коррекцию входных токов;
- получить токозависимую нелинейную характеристику срабатывания;
- отстроиться от аperiodических составляющих и высших гармоник;
- обеспечить высокую устойчивость функционирования при внешних повреждениях и насыщении трансформаторов тока; обеспечить быстрое действие.

П.2.2.4 Газовая защита

Газовая защита устанавливается на трансформаторах и автотрансформаторах с масляной системой охлаждения.

Принцип действия газовой защиты основан на том, что при любом, даже незначительном повреждении обмоток, за счёт



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

выделяющегося тепла происходит разложение масла. Разложение масла сопровождается выделением газа, интенсивность выделения которого зависит от тяжести повреждения.

Газовая защита выполняется при помощи газовых реле, представляющих собой металлический корпус, устанавливаемый в маслопровод между баком и расширителем трансформатора. Внутри корпуса реле устанавливают поплавковые контакты, которые при появлении газа замыкают свои контакты. При слабом газообразовании реле действует на сигнал, при интенсивном – на отключение.

Газовая защита является простым и универсальным инструментом для определения внутренних повреждений трансформаторов. Она позволяет определить и витковые замыкания, на которые не реагирует дифференциальная защита из-за малой величины тока.

Установки газовой защиты обязательна на трансформаторах мощностью от 4000 кВА.

П.2.3 Защита от внешних замыканий

Защиты от внешних замыканий служат для резервирования собственных защит и защит смежных присоединений. В зависимости от мощности трансформаторов и их назначения используются максимальная токовая защита, максимальная токовая защита с блокировкой по напряжению, токовая защита обратной последовательности, токовая защита нулевой последовательности, дистанционная защита.

В основном защита от внешних замыканий устанавливается со стороны

источников питания. Защита от внешних однофазных замыканий устанавливается со стороны обмотки, соединенной в звезду с заземлённой нейтралью.

П.2.3.1 Максимальная токовая защита

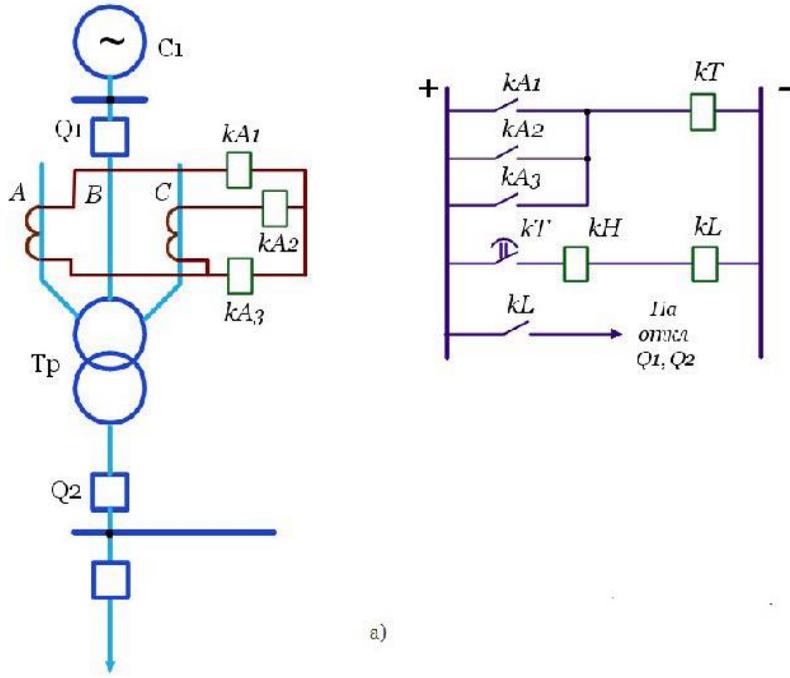
Защита применяется для трансформаторов малой мощности.

На двухобмоточных понижающих трансформаторах с односторонним питанием устанавливается один комплект со стороны источника питания (рис.П.2.7), на трёхобмоточных трансформаторах с односторонним питанием устанавливается два комплекта защиты. Один комплект со стороны обмотки низшего напряжения действует на отключение выключателя этой обмотки. Второй комплект, на стороне высшего напряжения, имеет две выдержки времени. С меньшей выдержкой времени защита действу-



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

ет на отключение выключателя со стороны обмотки среднего напряжения, с большей – на отключение всех выключателей (рис.П.2.8).



а)

Рисунок П.2.7. Схема максимальной токовой защиты двухобмоточного трансформатора

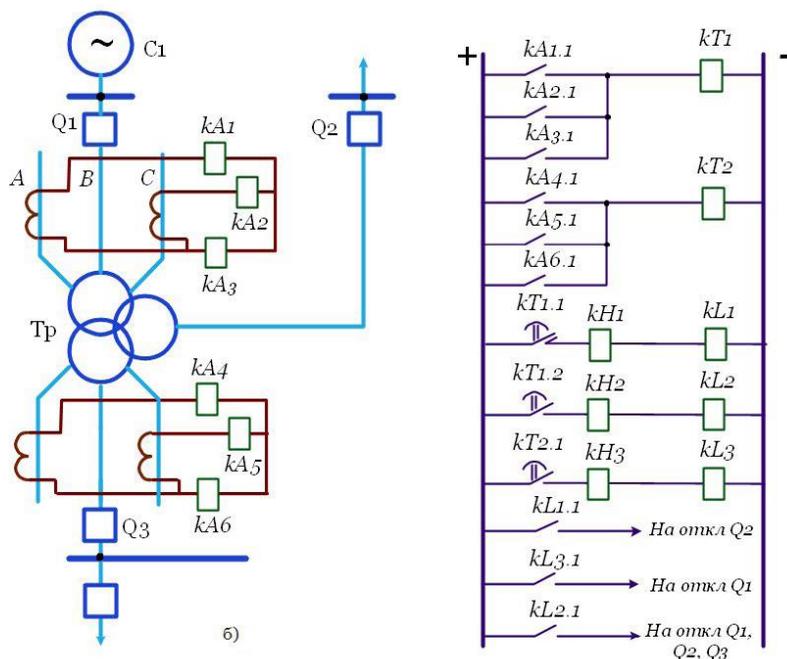


Рисунок П.2.8. Схема максимальной токовой защиты трёхобмоточного трансформатора

П.2.3.2 Максимальная токовая защита с блокировкой по напряжению

Максимальная токовая защита с блокировкой по напряжению ставится на трансформаторах средней мощности для повышения чувствительности при дальнем резервировании. Принципиальная схема защиты приведена на рис.П.2.9.

В состав защиты входят токовый пусковой орган – реле тока $kA1$ и $kA2$ и пусковой орган напряжения – фильтр–реле напряжения обратной последовательности $kV2$ и реле минимального напряжения $kV1$.

При возникновении двухфазного короткого замыкания появляется напряжение обратной последовательности, которое приводит к срабатыванию фильтр–реле напряжения обратной последовательности $kV2$. Реле $kV2$ снимает питание с обмотки $kV1$, которое, сработав в свою очередь запитывает обмотку реле $kL1$, тем самым разрешается прохождение команды на запуск реле времени от токовых реле.

Основы релейной защиты элементов энергетических систем

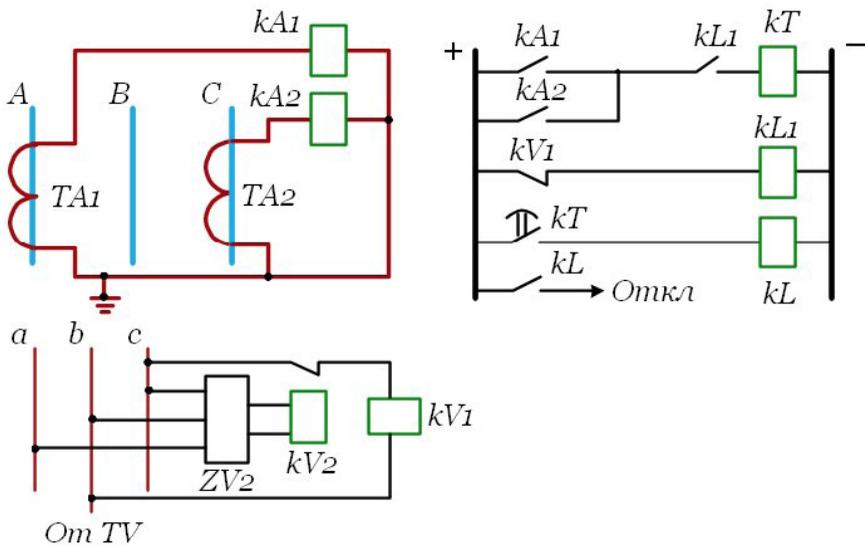


Рисунок П.2.9. Схема максимальной токовой защиты с блокировкой по напряжению

При трёхфазных коротких замыканиях напряжение обратной последовательности отсутствует, и реле $kV2$ не работает. Однако в этих случаях снижения напряжения достаточно для срабатывания реле $kV1$.

Ток срабатывания защиты отстраивается от номинального тока, реле минимального напряжения $kV1$ не должно работать в максимальных нагрузочных режимах $U_{мин}$ и в условиях самозапуска электродвигателей $U_{сз}$, напряжение срабатывания реле $kV2$ выбирается из условия отстройки от напряжения небаланса на выходе фильтра в нормальном режиме:

$$I_{сз} = \frac{k_n}{k_\epsilon} I_{ном};$$

$$U_{спkV1} = \frac{U_{мин}}{k_n k_\epsilon} \approx 0,85 U_{ном};$$

$$U_{спkV2} = 0,06 U_{ном}.$$

Из принципа действия защиты видно, что она обладает более высокой чувствительностью по сравнению с обычной мак-



симальной токовой защитой.

П.2.3.3 Токовая защита обратной последовательности

Токовая защита обратной последовательности устанавливается, как правило, на повышающих трансформаторах или автотрансформаторах связи для обеспечения требований дальнего резервирования при несимметричных коротких замыканиях. Защита состоит из фильтр–реле тока обратной последовательности $kA2$ и реле времени kT (Рис.П.2.10).

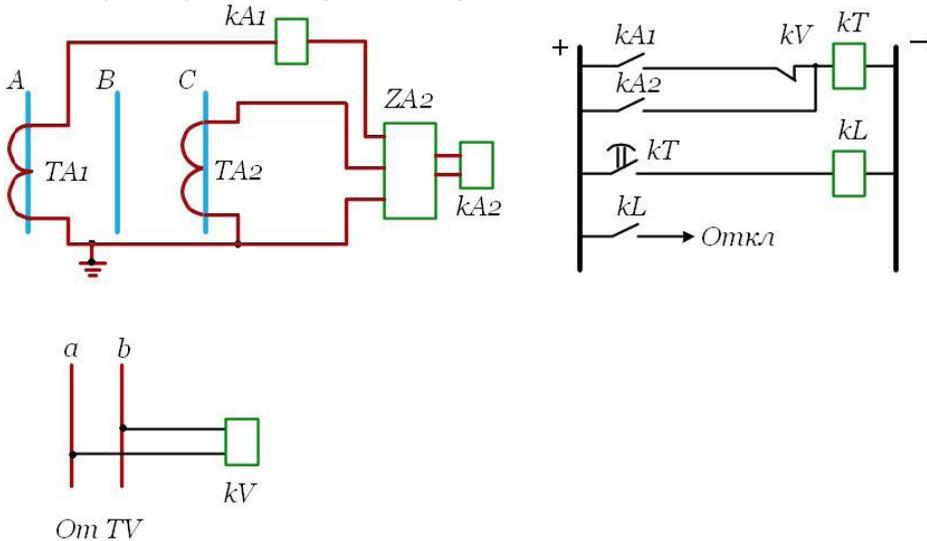


Рисунок П.2.10. Схема токовая защиты обратной последовательности

Для обеспечения действия защиты при трёхфазных коротких замыканиях схема защиты дополнена приставкой, состоящей из токового реле $kA1$ и реле минимального напряжения kV .

Первичный ток срабатывания защиты выбирается из условия отстройки от тока небаланса на выходе фильтра при максимально возможной эксплуатационной нагрузке. В большинстве случаев условию отстройки удовлетворяет следующее выражение:

$$I_{сз} = (0,1 \div 0,2) I_{ном.}$$

В случае использования защиты обратной последовательности на мощных автотрансформаторах, осуществляющих



ответственные связи между системами, рекомендуется при выборе тока срабатывания производить согласование по чувствительности.

П.2.3.4 Дистанционная защита

Дистанционная защита выполняет функции дальнего резервирования защиты сетей на сторонах высокого и среднего напряжений и ближнего резервирования основных защит автотрансформатора. Для выполнения защиты в энергосистемах России применяется панель ПЭ 2105, содержащую две ступени.

Характеристика реле сопротивления первой ступени имеет вид окружности или эллипса, проходящих через начало координат или смещённых в III квадрант. Смещение характеристики производится для устранения мёртвой зоны. Для улучшения отстройки реле от нагрузочных режимов круговая характеристика может быть трансформирована в эллипс.

Характеристика реле сопротивления второй ступени имеет вид окружности, смещённой в I квадрант. В зависимости от конкретной схемы района, мощности и напряжения автотрансформатора применяется одна или две панели ПЭ 2105.

Использование одной панели.

Панель подключается таким образом, чтобы по возможности автотрансформатор входил в зону действия защиты. В частности, первая ступень может быть направлена в сторону высшего или среднего напряжения, а вторая, соответственно, в сторону среднего или высшего напряжения. Цепи напряжения защиты подсоединяются к трансформатору напряжения, установленному на низкой стороне (рис.П.2.11, а).

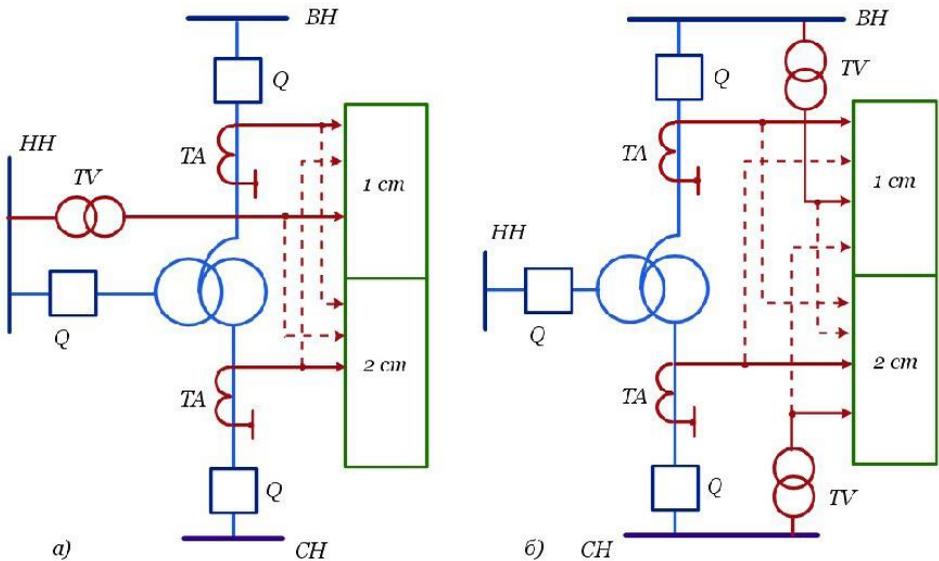


Рисунок П.2.11. Схемы подключения панели ПЭ 2105

Сопротивление срабатывания 1 ступени при направленности характеристики в сторону ВН

$$I_{сзАТ}^{1cm} = 0,87 Z_{АТвн} + 0,78 \frac{Z_{сзЛвн}^{1cm}}{k_{мАТвн}}$$

Сопротивление срабатывания 1 ступени при направленности характеристики в сторону СН

$$I_{сзАТ}^{1cm} = 0,87 Z_{АТсн} + 0,78 \frac{Z_{сзЛсн}^{1cm}}{k_{мАТсн}}$$

где $Z_{АТвн}$, $Z_{АТсн}$ - минимально возможные (с учётом РПН) сопротивления обмоток рассматриваемого трансформатора; $Z_{сзЛвн}^{1cm}$, $Z_{сзЛсн}^{1cm}$ - первичные сопротивления первой ступени защиты линий соответственно высшего и среднего напряжения; $k_{мАТвн}$, $k_{мАТсн}$ - коэффициенты токораспределения, равные отношению тока в автотрансформаторе к току в линии соответ-



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

ственно высшего и среднего напряжений.

В тех случаях, когда подключение панели к трансформаторам напряжения, установленных на стороне НН, не обеспечивает требуемой чувствительности, следует использовать трансформаторы напряжения сторон СН и ВН (рис.П.2.11, б).

Тогда

$$I_{сзАТ}^{1сч} = 0,78 \frac{Z_{сзЛвн}^{1сч}}{k_{тАТвн}}$$

или

$$I_{сзАТ}^{1сч} = 0,78 \frac{Z_{сзЛсч}^{1сч}}{k_{тАТсч}}$$

Выдержка времени первой ступени выбирается из условия отстройки от времени действия первых ступеней резервируемых защит и времени действия устройства резервирования отказов выключателя УРОВ, $t_3 = 0,8$ с.

Уставка второй ступени выбирается из условия отстройки защиты от нагрузочных режимов

$$Z_{сзАТ}^{2сч} = \frac{Z_{нагр}}{k_{отс} k_в \cos(\varphi_{мч} - \varphi_{нагр})},$$

$$Z_{нагр} = \frac{U_{\min}}{\sqrt{3} I_{нагр \max}}$$

где $Z_{нагр}$ – сопротивление нагрузки в максимальном нагрузочном режиме; $U_{\min} = 0,95U_{ном}$ – напряжение нагрузочного режима; $I_{нагр \max} = 1,5I_{ном}$ – расчётное значение максимального тока нагрузки; $k_{отс} = 1,25$ – коэффициент отстройки; $k_в = 1,05$ – значение коэффициента возврата; $\varphi_{мч} = 80^\circ$ – значение угла максимальной чувствительности; $\varphi_{нагр}$ – угол нагрузки в расчётном режиме.

Использование двух панелей.

Две панели ПЭ – 2105 ставятся на автотрансформаторах напряжением 330 кВ и более. В этом случае на каждую из сторон



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

высшего и низшего напряжений устанавливаются свои панели, причём, на каждой из панелей реле сопротивления направлены согласно. Напряжения на каждую панель подаётся от трансформатора напряжения своей ступени (рис. П.2.13).

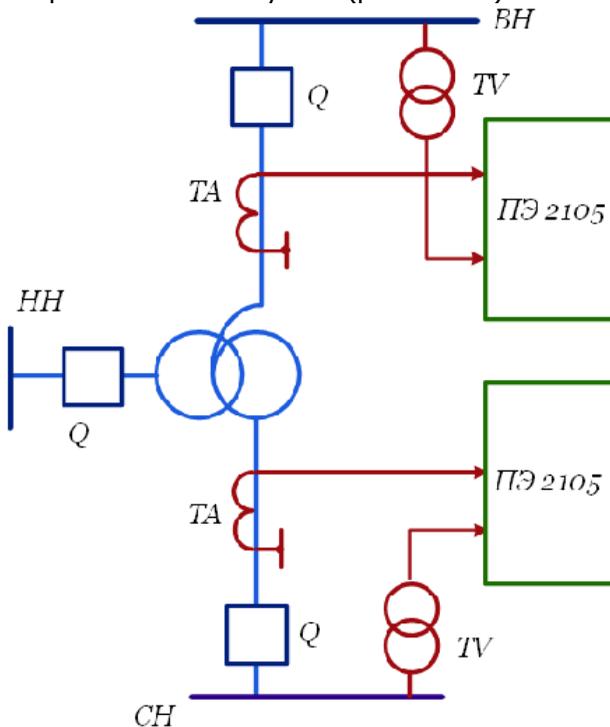


Рисунок П.2.13. Схема подключения двух панелей ПЭ-2105

Каждая ступень имеет три выдержки времени:

- на разделение системы шин;
- на отключение выключателя стороны, куда направлена рассматриваемая ступень;
- на отключение всего автотрансформатора.

П.2.4. Защита от внешних замыканий на землю

Защита ставится на повышающих трансформаторах или трансформаторах связи для отключения внешнего замыкания на землю в сети с глухозаземлённой нейтралью и частичного резервирования основных защит трансформатора. Защита присоединяется к трансформаторам тока, установленным в нейтрали транс-



форматора, и выполняется при помощи реле тока и реле времени. Ток срабатывания выбирается по условию согласования с последними ступенями защит от замыканий на землю защит смежных присоединений.

П.2.5. Защита от перегрузок

Защита от перегрузок выполняется с помощью максимальной токовой защиты, включённой на фазный ток. Защита с выдержкой времени действует на сигнал, а на необслуживаемых подстанциях - на разгрузку и отключение. На двухобмоточных трансформаторах защита устанавливается со стороны основного питания. На трёхобмоточных – со стороны основного питания и со стороны обмотки, где питание отсутствует.



Пример выполнения схемы защиты трансформатора

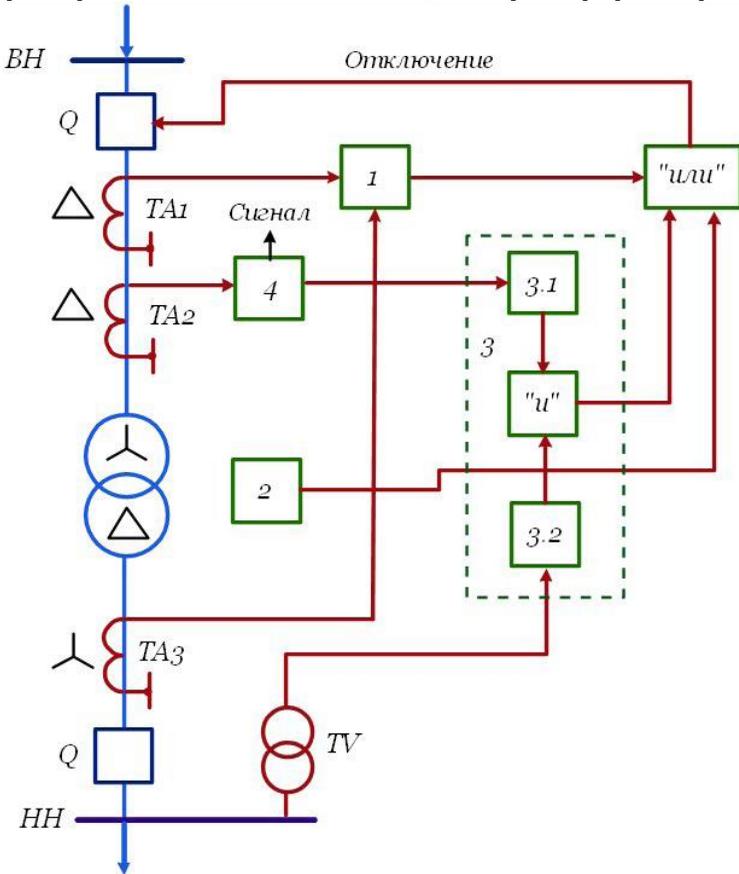


Схема защиты понижающего трансформатора 110-220/6,6-11кВ мощностью 6.3 МВА и более: 1 – дифференциальная защита; 2 – газовая защита; 3 – максимальная токовая защита с блокировкой по напряжению; 4 – защита от перегрузки



ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

П.3. На электростанциях в системе собственных нужд находят применение асинхронные и синхронные электродвигатели. Для большинства механизмов собственных нужд используются асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором, тип и мощность которых зависят от степени ответственности приводимых ими механизмов и от характеристики нагрузки.

Синхронные электродвигатели имеют ограниченное применение и используются для привода шаровых мельниц и компрессоров.

П.3.1 Виды повреждений и ненормальных режимов работы электродвигателей

На долю электродвигателей приходится до 25-30% от общего числа повреждений электрооборудования высокого напряжения. Основным видом неисправности являются электрические повреждения, связанные с нарушением изоляции обмоток статора и ротора. Наиболее часто, в 80–95% всех случаев, неисправной оказывается обмотка статора, причём 70% повреждений приходится на фазовую и лобовые части, а остальные 25–30% составляют перекрытия и пробой изоляции в коробках выводов.

Из причин возникновения повреждений изоляции можно выделить следующие:

- заводские дефекты;
- неудовлетворительно выполненный ремонт электродвигателя;
- неблагоприятные условия эксплуатации;
- отрицательное влияние перенапряжений, связанных с коммутационными операциями и дугowymi замыканиями на землю.

Основными видами повреждений являются многофазные короткие замыкания в обмотке статора, однофазные замыкания обмотки статора на землю, двойные замыкания на землю, замыкания части витков в одной фазе обмотки статора.

К ненормальным режимам относятся симметричные и несимметричные перегрузки, кратковременный перерыв в электроснабжении, работа при пониженном напряжении.

Повреждения электродвигателей

Междуфазные и витковые повреждения встречаются до-



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

вольно редко, но имеют тяжёлые последствия. Дуга, возникающая в месте повреждения, обычно приводит к пожару в электродвигателе, уничтожающему значительную часть обмотки статора, и выплавлению активной стали.

Динамические воздействия приводят к деформации лобовых частей. Повреждения вблизи выводов вызывают резкое снижение напряжения на питающих шинах, что сказывается на потребителях электроэнергии.

Однофазные замыкания обмотки статора на землю являются наиболее распространённым видом повреждений. Из причин возникновения однофазных замыканий следует выделить две. Первая связана с естественным старением изоляции, длящимся до тех пор, пока под воздействием нормального рабочего напряжения не наступит пробой. Вторая – пробой в результате перенапряжений. Степень опасности замыкания на корпус оценивается по объёму выплавленной стали статора, и вероятности перехода однофазного замыкания в витковое или многофазное.

Двойные замыкания на землю возникают в сетях с изолированной или компенсированной нейтралью. При этом ток в месте повреждения примерно будет равен току двухфазного короткого замыкания.

Повреждения в цепях возбуждения синхронного двигателя – обрыв, замыкание на землю в одной или двух точках. При обрыве цепи возбуждения электродвигатель выходит из синхронизма и переходит в асинхронный режим. Возникновение асинхронного режима приводит к нагреву ротора и статора, и для невозбуждённого синхронного двигателя длительность асинхронного режима допускается от 30 с до нескольких минут. Замыкания на землю цепи возбуждения в одной точке не представляет опасности, однако, при замыкании другой точки цепи возбуждения образуется короткозамкнутый контур, и через место повреждения начинает протекать большой ток короткого замыкания, который может вызвать повреждение изоляции.

Ненормальные режимы работы электродвигателей

Основным видом ненормальных режимов работы электродвигателей являются перегрузки. Перегрузки делятся на симметричные и несимметричные.

Симметричные перегрузки характеризуются увеличением тока, что вызывает перегрев – дополнительное превышение температуры элементов конструкции.

Основными причинами возникновения симметричных пе-



перегрузок по току являются:

- нарушение технологического процесса;
- неисправность приводимого механизма;
- понижение напряжения питающей сети;
- пуск или самозапуск электродвигателей при нагруженном приводном механизме, если электродвигатель на такой режим не рассчитан.

Дополнительный нагрев при перегрузке вызывает опасные деформации

обмоток, появление трещин в изоляции, сокращается расчётный срок эксплуатации двигателя.

Поэтому для электродвигателей должна быть предусмотрена специальная защита от симметричных перегрузок с действием на сигнал или на разгрузку приводимого механизма или на отключение двигателя.

Несимметричные перегрузки вызываются неполнофазным режимом и появлением напряжения обратной последовательности в питающем напряжении. Причиной возникновения неполнофазных режимов может быть обрыв фазного провода в сети, обрывы в обмотке статора, нарушение в коробке выводов.

Стандартом на качество электроэнергии установлено допустимое значение напряжения обратной последовательности в продолжительном режиме не более 2%. Для асинхронных двигателей допустимое значение напряжения обратной последовательности составляет примерно (2,3–4,5)% . Поле обратной последовательности вызывает усиленный разогрев на поверхности неявнополюсного ротора и вибрацию элементов статора и ротора.

П.3.2 Защиты электродвигателей от междуфазных замыканий

Для защиты от междуфазных коротких замыканий применяют токовую

отсечку и дифференциальную защиту.

Токовая отсечка рекомендуется для защиты электродвигателей мощностью до 5000 кВт, если она обладает требуемой чувствительностью к повреждениям на выводах. При недостаточной чувствительности токовой отсечки необходимо применять дифференциальную защиту. Применение дифференциальной защиты, целесообразно начиная, с мощности 3500 – 4000 кВт.

Токовая отсечка для двигателей мощностью до 2000 кВт, за исключением электродвигателей собственных нужд электро-



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

станции, выполняется по однорелейной схеме (рис.П.3.1, а). На электродвигателях мощностью (2000 – 4000) кВт токовая отсечка выполняется по двухрелейной схеме (рис.П.3.1, б). Если коэффициент чувствительности однорелейной схемы окажется ниже двух, то следует использовать двухрелейную схему на двигателях мощностью до 2000 кВт.

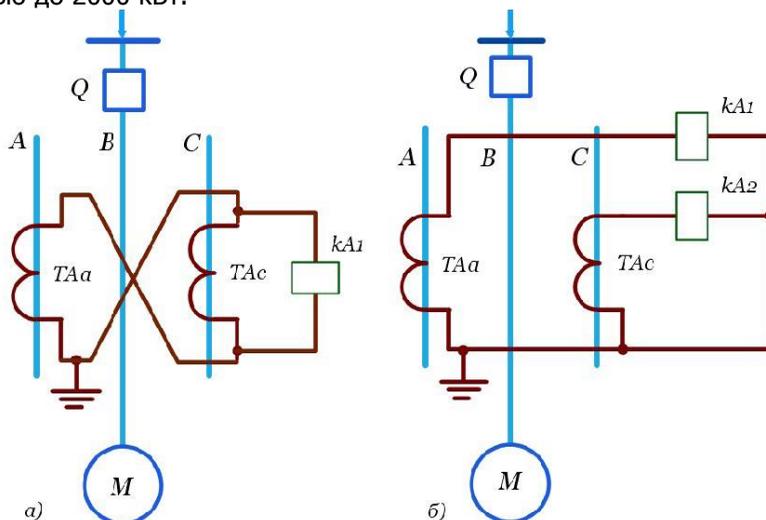


Рисунок П.3.1. Схема токовой отсечки:

а - однорелейная, б – двухрелейная

Первичный ток срабатывания отсечки, устанавливаемой на асинхронных электродвигателях, отстраивается от пускового тока:

$$I_{сз} = k_n I_{пуск},$$

где k_n – коэффициент надёжности, учитывающий погрешности реле и расчёта, в зависимости от типа реле может принимать значение от 1.4 до 2; $I_{пуск}$ – пусковой ток электродвигателя.

Чувствительность защиты оценивается по току двухфазного короткого

замыкания на выводах двигателя в минимальном режиме работы системы.



Дифференциальная защита

На электродвигателях мощностью от 4000 кВт и более устанавливается продольная дифференциальная защита без торможения или с торможением. Для выполнения защиты с торможением торможение выполняется от трансформаторов тока, установленных со стороны нулевых выводов обмотки статора. При таком включении торможение практически не оказывает влияния на рабочую МДС и обеспечивает наилучшую чувствительность защиты.

Ток срабатывания защиты выбирается из условия надёжного несрабатывания в режимах пуска, самозапуска, внешнего короткого замыкания или несинхронного включения синхронного двигателя.

П.3.3 Защита от перегрузок

Защита от перегрузки устанавливается на электродвигателях, которые могут подвергаться перегрузке по технологическим причинам и для электродвигателей с особо тяжёлыми условиями пуска и самозапуска с длительностью прямого пуска от 20 с и более.

Установка защиты предусматривается в одной фазе. Защита от перегрузки выполняется с действием на отключение при возможности неуспешного пуска, невозможности разгрузки без останова двигателя, отсутствии постоянного дежурного персонала. При возможности автоматической разгрузки защиты выполняются с двумя выдержками времени, с меньшей – на разгрузку механизма, с большей – на отключение. В остальных случаях предусматривается действие на сигнал.

Ток срабатывания защиты выбирается по условию отстройки от номинального тока электродвигателей.

Чувствительность защиты от перегрузки не проверяется, поскольку она

не предназначена для действия при коротком замыкании.

Выдержка времени выбирается из условия надёжного несрабатывания при пуске или самозапуске двигателей по выражению

$$t_{сз} = k_{омс} t_n,$$

где $k_{омс} = 1,2 \div 1,3$; t_n – время пуска электродвигателей.



П.3.4 Защита от потери питания

Защита от потери питания устанавливается для предотвращения повреждения электродвигателей, затормозившихся в результате кратковременного или длительного снижения напряжения, при восстановлении питания, а также для обеспечения требований техники безопасности и условий технологического процесса. Защита выполняется групповой для каждой секции шин.

В зависимости от требований по быстродействию и от соотношения числа синхронных и асинхронных электродвигателей, присоединённых к одной секции шин, защиты подразделяются на две группы:

- защита минимального напряжения;
- защита минимального напряжения и минимальной частоты с блокировкой по направлению мощности.

Для правильного выбора типа защиты от потери питания все электродвигатели целесообразно разделить на две группы по степени ответственности каждого механизма, проанализировать режимы, приводящие к снижению или перерыву питания, оценить возможность самозапуска.

Защита минимального напряжения, как правило, выполняется двухступенчатой (рис.П.3.2).

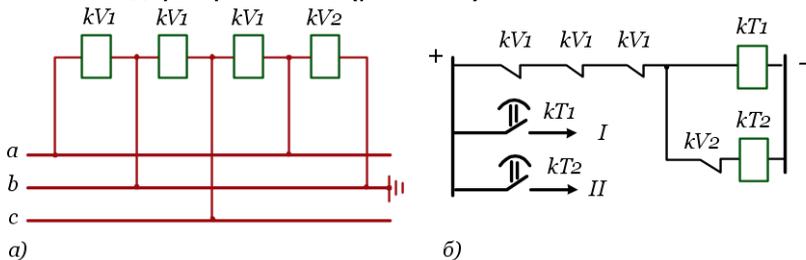


Рисунок П.3.2. Схема защиты минимального напряжения:

a – цепи переменного напряжения; *б* – цепи постоянного оперативного тока; *kV1* – реле минимального напряжения первой ступени; *kV2* – реле минимального напряжения второй ступени; *I* – на отключение неответственных двигателей; *II* – на отключение ответственных двигателей

Первая ступень предназначена для ускорения и повышения эффективности самозапуска ответственных электродвигателей, а также предупреждения несинхронного включения синхрон-



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

ных двигателей в сеть.

Обычно напряжение срабатывания первой степени принимается равным $U_{сз}^1 = 0,7U_{ном}$, а время срабатывания $t^1 = 0,5 с$.

Напряжение срабатывания второй степени $U_{сз}^2 = 0,5U_{ном}$, время срабатывания $t^2 = (5 \div 10) с$.

Защита минимального напряжения и минимальной частоты с блокировкой по направлению мощности предусматривается, если к сокращению времени перерыва питания предъявляются высокие требования. Частота срабатывания минимального реле частоты выбирается из условия отстройки от наименьшего возможного в нормальном режиме значения частоты в энергосистеме, примерно 48,5 - 49 Гц. Выдержка времени защиты выбирается из условия несрабатывания при кратковременных снижениях частоты в случае КЗ, $t > 0,5 с$. Реле направления мощности в схеме применяется для согласования действия защит и АЧР.

Пример схемы защиты электродвигателя

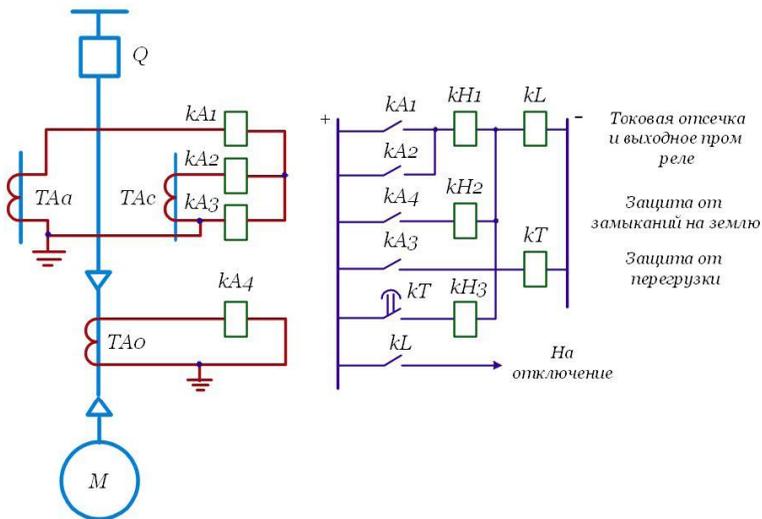


Схема защиты асинхронного электродвигателя мощностью до 4000 кВА



ПРИЛОЖЕНИЕ 4. ЗАЩИТА ШИН

П.4. На шинах электростанций и подстанций могут возникнуть трёхфазные и двухфазные короткие замыкания, однофазные и двухфазные замыкания на землю, обрыв фаз.

К основным причинам замыканий на шинах относятся ошибочные действия эксплуатационного персонала при операциях с разъединителями, перекрытия изоляторов при грозах, загрязнения и гололёд, поломка изоляторов разъединителей и т.д.

В результате замыканий на шинах могут произойти:

- значительное понижение напряжения в энергосистеме, приводящее к расстройству технологического процесса на промышленных предприятиях, нарушению электроснабжения населённых пунктов, недоотпуску продукции;
- повреждения трансформаторов и генераторов;
- потеря устойчивости энергосистемы;
- возможное полное отключение электростанций, подстанций, линий электропередач.

Повреждения на шинах могут быть отключены резервными защитами соседних присоединений. Так например, при коротких замыканиях на шинах подстанции *Б* (рис.П.4.1), короткое замыкание отключится защитами, установленными на подстанциях *А* и *В*.

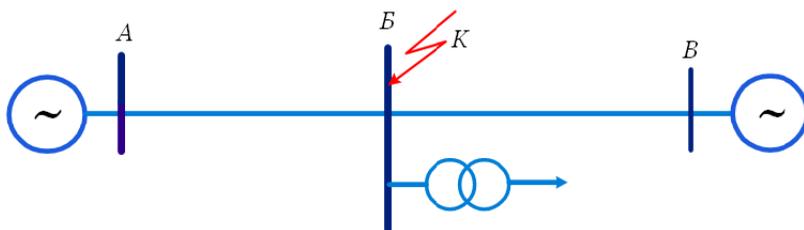


Рисунок П.4.1. Схема сетевого участка

Отключение в таких случаях произойдёт с выдержкой времени, что приводит к увеличению размера повреждений и к возможности нарушения устойчивости параллельной работы энергосистемы. Поэтому подстанции напряжением 110 кВ и более, шины генераторного напряжения оснащаются специальной защитой шин.

Для выполнения защиты шин используются дифференциальная защита,

дифференциальная защита с торможением, неполная



дифференциальная защита.

П.4.1 Дифференциальная защита

Принцип действия

Принцип действия дифференциальной защиты основан на сравнении токов в присоединениях. Для выполнения защиты на каждом присоединении устанавливаются трансформаторы тока с одинаковыми коэффициентами трансформации, их вторичные обмотки соединяются между собой параллельно и к ним подключается токовое реле.

Принципиальная схема простейшей дифференциальной защиты представлена на рис.П.4.2.

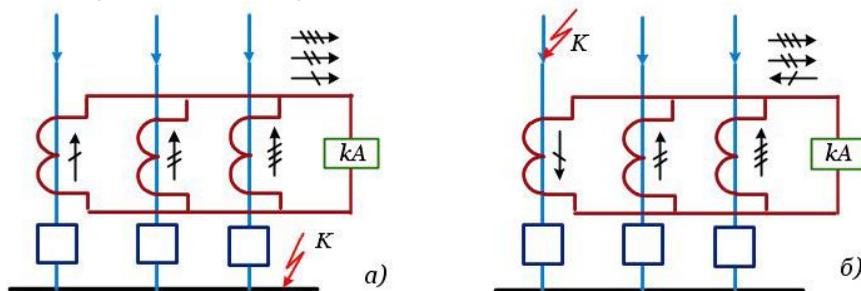


Рисунок П.4.2. Принцип действия дифференциальной защиты шин

При коротком замыкании на шинах через реле протекает суммарный ток, под действием которого оно сработает

$$I_p = \frac{1}{k_I} (I_1 + I_2 + I_3)$$

где k_I – коэффициент трансформации трансформаторов тока; I_1, I_2, I_3 – токи присоединений.

При внешнем коротком замыкании (рис.П.4.1, а) для идеальных трансформаторов тока сумма токов в реле равна нулю, и реле не работает. Для реальных трансформаторов тока через реле протекает ток небаланса, вызываемый погрешностями трансформаторов тока.

Ток срабатывания защиты выбирается больше тока небаланса для исключения возможности ложного срабатывания защиты:



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

$$I_{сз} = k_n I_{нб},$$

где k_n – коэффициент надёжности; $I_{нб}$ – ток небаланса.

Для дифференциальной защиты шин ток небаланса определяется в первую очередь неодинаковой нагрузкой трансформаторов тока. Особенно большой ток небаланса может возникнуть, если трансформаторы тока повреждённого элемента при внешних коротких замыканиях работают в режиме насыщения.

Для уменьшения тока небаланса рекомендуется:

- применять трансформаторы тока с сердечниками класса Р, насыщающимися при больших кратностях тока;
- уменьшать значения вторичных токов за счёт увеличения коэффициента трансформации трансформаторов тока;
- уменьшать нагрузку за счёт увеличения сечения контрольного кабеля;
- использовать трансформаторы тока с вторичным номинальным током 1А;
- для измерительного органа защиты использовать принцип торможения при внешних замыканиях.

Основными достоинствами дифференциальных токовых защит шин являются быстрое действие, принципиальная простота реализации, отсутствие влияния на работу защиты токов качаний.

Одним из недостатков дифференциальной защиты является возможность ложного срабатывания при обрыве соединительных проводов. Для устранения этого недостатка ток срабатывания защиты выбирают больше тока наиболее нагруженного присоединения:

$$I_{сз} = k_n I_{раб\max}.$$

В качестве другого недостатка следует отметить возможность ошибочных действий персонала при изменениях во вторичных цепях защиты, связанных с переключениями в распределительном устройстве при переводе присоединения с одной системы шин на другую или замене линейного выключателя обходным.

Дифференциальная токовая защита шин для подстанции с одной

рабочей и одной резервной системами шин

Подстанция нормально работает на одну систему шин.

Вторая система

шин находится в резерве (рис.П.4.3).

При возникновении короткого замыкания на шинах



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

срабатывают пусковые реле $kA1$, и подаётся питание на реле $kL1$ и реле $kL2$. Реле $kL1$ подаёт команду на отключение выключателей всех присоединений, а $kL2$ – на отключение шиносоединительного выключателя.

В нормальном режиме работы шиносоединительный выключатель отключён, и трансформаторы тока этого выключателя не включены в цепи дифференциальной защиты. Для подачи питания на резервную систему шин ключ управления SA переводится в положение «Включить» и промежуточное реле $kL3$ получает питание. Реле $kL3$ своим вторым контактом $kL3.2$ подаёт команду на включение выключателя, а первым контактом $kL3.1$ разрывает цепь выходного реле $kL1$.

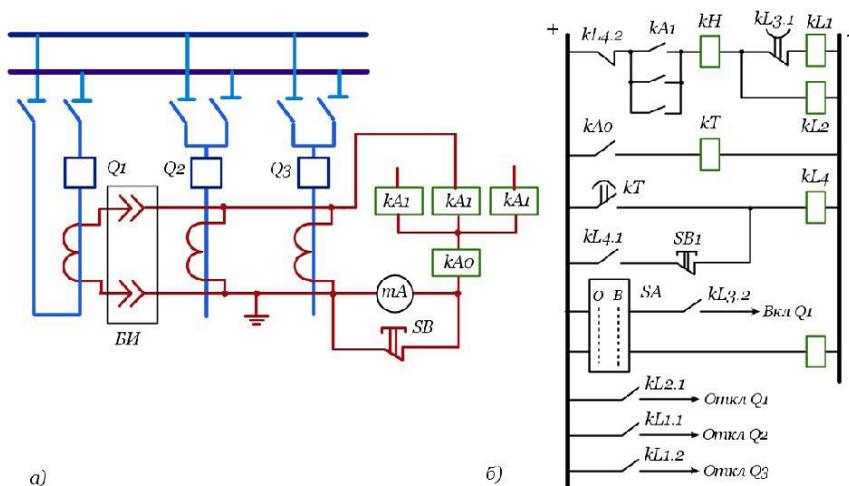


Рисунок П.4.3. Схема дифференциальной защиты шин с одной рабочей и одной резервной системами шин: а) токовые цепи; б) цепи постоянного тока

Если в режиме опробывания на резервной системе шин происходит короткое замыкание, дифференциальная защита подаст команду на отключение только секционного выключателя, оставив все другие присоединения и рабочую систему шин в работе.

Если шиносоединительный выключатель остаётся в работе на длительное время вместо ремонтируемого выключателя одного из присоединений, то трансформаторы тока этого выключателя подключаются к токовым цепям дифференциальной защиты с по-



мощью испытательного блока *БИ*.

Для исключения ложного срабатывания защиты при внешних замыканиях в случае обрыва вторичных цепей в схеме предусмотрена блокировка от обрыва токовых цепей. Функции блокировки выполняет реле *kA0*, включённое в нулевой провод токовых цепей защиты.

В случае обрыва одной из фаз токовых цепей в нулевом проводе появляется ток, который приводит к срабатыванию реле *kA0*. Реле *kA0*, сработав, подаёт питание на реле *kT*. Замыкание контактов реле *kT* приводит к срабатыванию реле *kL4*, которое своим первым контактом становится на самоподхват, а вторым контактом *kL4.2* снимает плюс с контактов измерительных органов защиты. Вывод блокировки осуществляется с помощью кнопки *SB*. Для контроля исправности токовых цепей, кроме токового реле, предусмотрена установка миллиамперметра *mA*

Дифференциальная токовая защита для подстанции с двумя рабочими системами шин

В этой схеме каждое присоединение имеет один выключатель, два разъединителя и подключается к определённой системе шин. Такое присоединение называется фиксированным. В процессе оперативных переключений, связанных с переводом присоединения на другую систему, фиксация может нарушаться. В таких случаях эксплуатационный персонал для обеспечения правильного действия защиты должен произвести необходимые переключения в токовых цепях.

Схема включения измерительных органов дифференциальной защиты для подстанции с двумя рабочими системами шин при фиксированном включении присоединений представлена на рис.П.4.4.

В состав защиты входят три измерительных комплекта. Индивидуальные комплекты *kAT1* и *kAT2*, предназначенные для защиты отдельной системы шин, включены на сумму токов присоединений этих шин. Групповой комплект *kAT3* включён на сумму токов присоединений обеих систем шин и предназначен для защиты шин при нарушении фиксации присоединений. Схема цепей постоянного тока собрана таким образом, что плюс на контакты реле *kAT1* и *kAT2* подаётся только после срабатывания *kAT3*.

При фиксированном включении присоединений в случае возникновения внешнего короткого замыкания все три реле не работают, а при замыкании на одной из систем шин сработает групповой комплект и один из индивидуальных, в результате чего будет отключена только поврежденная система шин.

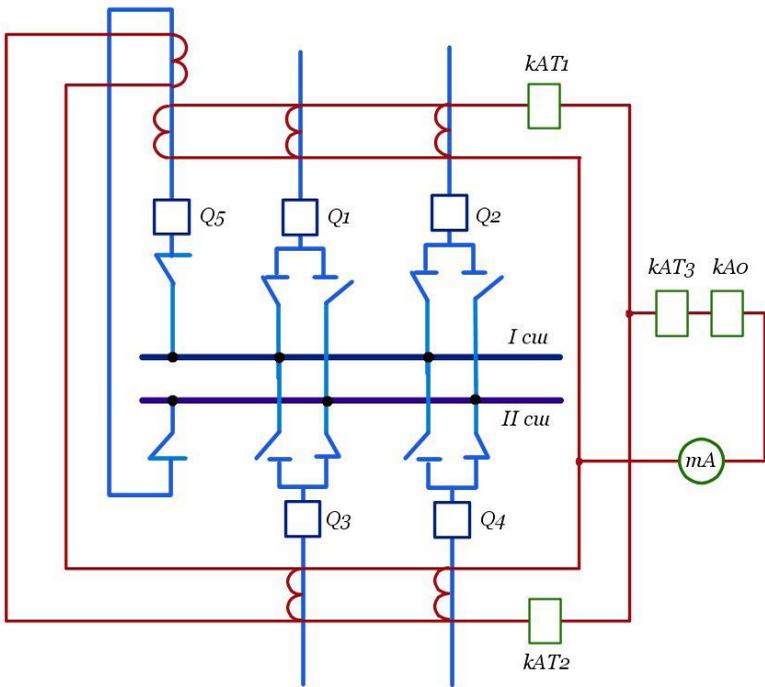


Рисунок П.4.3. Схема дифференциальной защиты шин для подстанции с фиксированным включением присоединений

При изменении фиксации присоединений селективность действия индивидуальных комплектов нарушается. В случае возникновения внешнего короткого замыкания защита шин не работает, так как, несмотря на срабатывание индивидуальных комплектов, групповой комплект не разрешает прохождение команды на отключение выключателей.

При коротком замыкании на любой из систем шин произойдёт отключение всех присоединений. Для исключения неселективности действия дифференциальной защиты при изменении фиксации присоединений оперативный персонал должен произвести необходимые переключения во вторичных цепях.



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федосеев А.М., Федосеев М.А.. Релейная защита электроэнергетических систем: Учебник для вузов. – 2-е изд., М.: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.
2. Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем. – М.: Энергия, 1976. – 560 с.
3. Атабеков Г.И. Релейная защита высоковольтных сетей. – М. – Л.: ГЭИ, 1949. – 424 с.
4. Атабеков Г.И. Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей. – М. – Л.: ГЭИ, 1957. – 342 с.
5. Чернобровов Н.В., Семёнов В.А. Релейная защита энергетических систем. Учебное пособие для техникумов. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.
6. Беркович М.А., Молчанов В.В., Семёнов В.А. Основы техники релейной защиты. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 376 с.
7. Цыгулёв Н.И. Основы переходных процессов в электроэнергетических системах.: Ч.1. – Ростов-н-Д: ДГТУ, 2013. – 153 с.
8. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учеб. для вузов – М.: Высш. шк., 2006. – 639 с.
9. Овчаренко Н.И. Микропроцессорная релейная защита и автоматика электроэнергетических систем. Учебное пособие. М.: Издательство МЭИ, 2000 г, – 199 с.
10. Электротехнический справочник. Производство и распределение электрической энергии. Т.3., Кн.1. (Под общей редакцией проф. МЭИ: И.Н.Орлова и др.)7-е изд., – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 880 с.
11. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.
12. Гельфанд Я.С. Релейная защита распределительных сетей. М.: Энергоиздат, 1987. – 368 с.
13. Авербух А.М. Релейная защита в задачах с решениями и примерами. Л.: Энергия, 1975. – 416 с.
14. Копьёв В.Н. Релейная защита. Принципы выполнения и применения: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 153 с.
15. Копьёв В.Н. Релейная защита основного оборудования электростанций и подстанций. Вопросы проектирования. Учебное пособие. – Томск; Изд. ЭЛТИ ТПУ, 2005. – 107 с.
16. Линт Г.Е. Серийные реле защиты, выполненные на интегральных микросхемах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 112 с.



Основы релейной защиты элементов энергетических систем

17. Шабад М.А. Расчёты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. – СПб ПИПК, 2003. – 350 с.

18. Аллилуев В.А., Берёзкин Е.Д., Берёзкина С.В. Релейная защита энергетических систем. Учеб. пособие. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2010. – 85 с.