



Механотроника

ООО «НТЦ «Механотроника»
Россия, 198206, г. Санкт-Петербург,
ул. Пионерстроя, д. 23, лит. А

ИНН/КПП: 7808022632/780701001
ОГРН: 1027804596544
Info.mt@systeme.ru, www.mtrele.ru

Тел.: +7 (812) 654-35-82, Факс: +7 (812) 654-35-83
Тел./факс: +7 (812) 244-70-15
Центр поддержки клиентов: 8-800-250-63-60

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО РАСЧЁТУ УСТАВОК И ЗАДАНИЮ ПАРАМЕТРОВ
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ С ТОРМОЖЕНИЕМ
6 - 220 кВ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2024

Содержание

Список сокращений	4
Введение.....	5
1 Дифференциальная защита с торможением для трансформаторов	6
1.1 Дифференциальная защита трансформаторов. Общие принципы	7
1.2 Дифференциальная токовая отсечка.....	12
1.3 Дифференциальная токовая защита с торможением.....	14
1.3.1 Общие принципы выбора уставок ДЗТ	14
1.3.2 Выбор уставки начального тока срабатывания ДЗТ.....	15
1.3.3 Выбор уставки коэффициента торможения второго участка характеристики торможения ДЗТ.....	17
1.3.4 Выбор уставки коэффициента торможения третьего участка характеристики торможения ДЗТ.....	18
1.3.5 Проверка чувствительности ДЗТ.....	19
1.4 Выбор уставки сигнализации небаланса	21
1.5 Выбор уставок ДЗТ при наличии ТСН в зоне защиты.....	21
1.6 Выбор уставок блокирования ДЗТ при возникновении БТН	22
1.7 Выбор уставок блокирования ДЗТ при перевозбуждении трансформатора	23
2 Дифференциальная токовая защита ошиновки с торможением	24
2.1 Блоки БМРЗ для защиты ошиновок.....	24
2.2 Особенности дифференциальной защиты в БМРЗ.....	25
2.2.1 Цифровое выравнивание токов «плеч»	25
2.3 Дифференциальная токовая отсечка.....	26
2.3.1 Общие сведения о работе ДТО	26
2.3.2 Выбор уставок срабатывания ДТО.....	26
2.4 Дифференциальная токовая защита с торможением.....	28
2.4.1 Общие сведения о работе ДЗТ	28
2.4.2 Выбор уставок срабатывания ДЗТ.....	28
2.4.3 Выбор уставок для чувствительного органа дифференциальной защиты.....	30
2.4.4 Выбор уставок для зоны дополнительного торможения	31
2.4.5 Проверка чувствительности ДЗТ.....	33
2.5 Блокирование защиты при броске тока намагничивания силового трансформатора	33
2.5.1 Принцип действия.....	33
2.5.2 Выбор уставок.....	34
3 Дифференциальная токовая защита шин с торможением.....	38
3.1 Блоки БМРЗ для защиты шин	38
3.2 Общие сведения о дифференциальной токовой защите шин	38
3.3 Цифровое выравнивание токов «плеч».....	39
3.4 Дифференциальная токовая отсечка.....	39
3.4.1 Общие сведения о работе ДТО	39
3.4.2 Выбор уставок срабатывания ДТО.....	41
3.6 Дифференциальная токовая защита с торможением.....	41
3.6.1 Общие сведения о работе ДЗТ	41
3.6.2 Выбор уставок срабатывания ДЗТ.....	42
3.7 Отключение выключателей по сигналу УРОВ от внешних устройств	43
3.8 Отключение КЗ в «мертвой» зоне между ТТ и СВ/ШСВ	44

3.8.1 Принцип действия.....	44
3.8.2 Выбор уставок.....	47
3.9 Опробование шин и присоединений.....	48
3.10 Выбор остальных уставок.....	50
4 Неполная дифференциальная токовая защита шин с торможением.....	51
4.1 Общие сведения о неполной дифференциальной токовой защите шин.....	51
5 Дифференциальная защита токоограничивающего реактора с торможением.....	53
6 Токовая защита нулевой последовательности с торможением.....	55
Приложение А Пример выбора уставок для двухобмоточного трансформатора.....	58
Приложение Б Пример выбора уставок для дифференциальной защиты ошиновки.....	66
Приложение В Пример выбора уставок для дифференциальной защиты шин.....	70
Приложение Г Пример выбора уставок для дифференциальной защиты шин с перификсацией присоединений.....	76
Приложение Д Пример выбора уставок для неполной дифференциальной защиты шин.....	82
Приложение Е Пример выбора уставок для дифференциальной защиты токоограничивающего реактора.....	86
Приложение Ж Пример выбора уставок для токовой защиты нулевой последовательности с торможением.....	91
Список использованной литературы.....	94

Список сокращений

АПВ - автоматическое повторное включение;
БМРЗ – блок микропроцессорный релейной защиты;
БТН – бросок тока намагничивания;
ВВ – вводной выключатель;
ВН – сторона высшего напряжения трансформатора;
ДЗО – дифференциальная защита ошиновки;
ДЗТ – дифференциальная токовая защита с торможением;
ДЗШ - дифференциальная защита шин;
ДТО – дифференциальная токовая отсечка;
ИО - избирательный орган;
ИПБ - информационный признак блокирования;
КЗ - короткое замыкание;
НДЗШ - неполная дифференциальная защита шин;
НН – сторона низшего напряжения трансформатора;
ПБВ – переключение без возбуждения (трансформатор обесточен со всех сторон);
ПО – пусковой орган;
РПН – регулировка переключения под напряжением (трансформатора);
СВ – секционный выключатель;
СН – сторона среднего напряжения трансформатора;
Т – трансформатор;
ТЗНПТ - токовая защита нулевой последовательности с торможением;
ТКЗ – ток короткого замыкания;
ТСН – трансформатор собственных нужд;
ТТ – трансформатор тока;
УРОВ – устройство резервирования при отказе выключателя;
ШСВ – шиносоединительный выключатель;
ЭС - энергосистема.

Введение

В данном документе приведены Методические указания по выбору параметров срабатывания микропроцессорных устройств релейной защиты трансформаторов и автотрансформаторов, ошинок, шин, токоограничивающих реакторов и защиты нейтрали (авто)трансформатора с торможением выполненных на базе устройств релейной защиты и автоматики БМРЗ (далее - БМРЗ) производства ООО «НТЦ Механотроника».

Документ состоит из шести разделов:

- дифференциальная защита трансформатора или автотрансформатора;
- дифференциальная защита ошиновки;
- дифференциальная защита шин;
- неполная дифференциальная защита шин;
- дифференциальная защита токоограничивающего реактора;
- токовая защита нулевой последовательности трансформатора или автотрансформатора.

1 Дифференциальная защита с торможением для трансформаторов

В БМРЗ-153-УЗТ [1] и БМРЗ-ТД [2] для защиты от замыканий в трансформаторе или автотрансформаторе предусмотрена функция дифференциальной защиты с торможением.

БМРЗ-153-УЗТ может использоваться для защиты двухобмоточного трансформатора. БМРЗ-ТД может использоваться для дифференциальной защиты с торможением двухобмоточного трансформатора, двухобмоточного трансформатора с расщепленной обмоткой, трехобмоточного трансформатора или автотрансформатора.

При реализации дифференциальной защиты с торможением используются решения, ранее положительно себя зарекомендовавшие. В качестве измеряемых величин используются расчетные значения тока сторон трансформатора или автотрансформатора.

В БМРЗ реализована возможность реализации «гибкой» логики, настройки и адаптации под различные первичные электрические схемы и различное электротехническое оборудование.

Дифференциальная защита с торможением трансформатора в БМРЗ выполнена на схожих принципах, что позволяет использовать данную методические указания по выбору уставок для всех современных типов БМРЗ.

1.1 Дифференциальная защита трансформаторов. Общие принципы

1.1.1 Дифференциальную токовую защиту применяют в качестве основной быстродействующей защиты трансформаторов и автотрансформаторов от повреждений на выводах, а также от внутренних повреждений [3].

Подключения всех трансформаторов тока (ТТ) должны обеспечивать подачу вторичных токов положительного направления на входы БМРЗ. За положительное направление токов сторон принято направление токов в сторону защищаемого объекта.

Двухфазное подключение ТТ допустимо использовать только для обмоток трансформатора, соединенных по схеме «треугольник», при этом на вход тока фазы В БМРЗ необходимо подать суммарный ток фаз А и С в противофазе.

1.1.2 Первичные токи в обмотках трансформатора не равны по значению и, в общем случае, не совпадают по фазе. Значения токов отличаются из-за коэффициента трансформации трансформатора. Угол сдвига фаз токов зависит от группы соединения обмоток [4].

Неодинаковость коэффициентов трансформации ТТ сторон трансформатора ведет к еще большему различию вторичных токов, используемых в БМРЗ защиты.

В БМРЗ предусмотрен программный учёт фактических значений коэффициентов трансформации ТТ и коэффициента трансформации трансформатора («цифровое выравнивание»), благодаря чему не требуется применять промежуточные трансформаторы (автотрансформаторы) тока.

Коэффициенты трансформации ТТ пользователь задаёт в виде уставок.

В БМРЗ предусмотрена компенсация поворота фазы при различных комбинациях схем и групп соединений обмоток защищаемого трансформатора (операция «цифровой треугольник») [1, 2].

Параметры силового трансформатора пользователь задает уставками.

1.1.3 При внешнем КЗ на землю токи нулевой последовательности проходят только по фазам обмотки трансформатора, соединенной по схеме «звезда» с заземленной нейтралью.

В обмотке, соединённой по схеме «треугольник», токи нулевой последовательности циркулируют, не выходя за пределы «треугольника». В фазных проводах данной обмотки токи нулевой последовательности отсутствуют.

Для обеспечения правильной работы дифференциальной токовой защиты при внешних однофазных КЗ в БМРЗ предусмотрено исключение токов нулевой последовательности для обмоток, соединенных по схеме «звезда», из расчётов [1, 2].

1.1.4 В БМРЗ в идеальном случае в нагрузочном режиме и в режиме внешнего КЗ дифференциальный ток отсутствует.

На практике в нагрузочном режиме и режиме внешнего КЗ возникает дифференциальный ток (ток небаланса), вызванный погрешностями ТТ, изменением коэффициента трансформации трансформатора при регулировании напряжения, погрешностью выравнивания токов сторон.

Ток небаланса тем больше, чем больше значения токов сторон трансформатора.

1.1.5 В БМРЗ дифференциальная защита трансформаторов реализована в виде двух дифференциальной токовой отсечки (ДТО) и дифференциальной защиты с торможением (ДЗТ).

Уставку срабатывания ДТО задают больше максимально возможного значения тока небаланса в режиме внешнего КЗ или БТН [5].

При этом, во многих случаях ДТО не может обеспечить требуемый [3] коэффициент чувствительности к КЗ.

Для обеспечения требуемого коэффициента чувствительности защиты используют ДЗТ [6].

Уставка срабатывания ДЗТ возрастает с увеличением тока торможения, рассчитываемого в БМРЗ из токов сторон трансформатора.

1.1.6 В БМРЗ-ТД реализован учёт текущего положения устройства регулирования напряжения трансформатора (РПН).

В БМРЗ-ТД дополнительно к основной («грубой») характеристике срабатывания ДЗТ предусмотрена «чувствительная» характеристика.

При использовании «чувствительной» характеристики ДЗТ БМРЗ-ТД производит расчёт фактического коэффициента трансформации трансформатора, что позволяет снизить составляющую тока небаланса, обусловленную влиянием РПН (ПВВ).

«Чувствительная» характеристика ДЗТ имеет больший коэффициент чувствительности, чем «грубая» (рисунок 1.1).

Учет текущего положения устройства регулирования напряжения в БМРЗ-ТД осуществлён программным способом, с учётом значений токов сторон трансформатора.

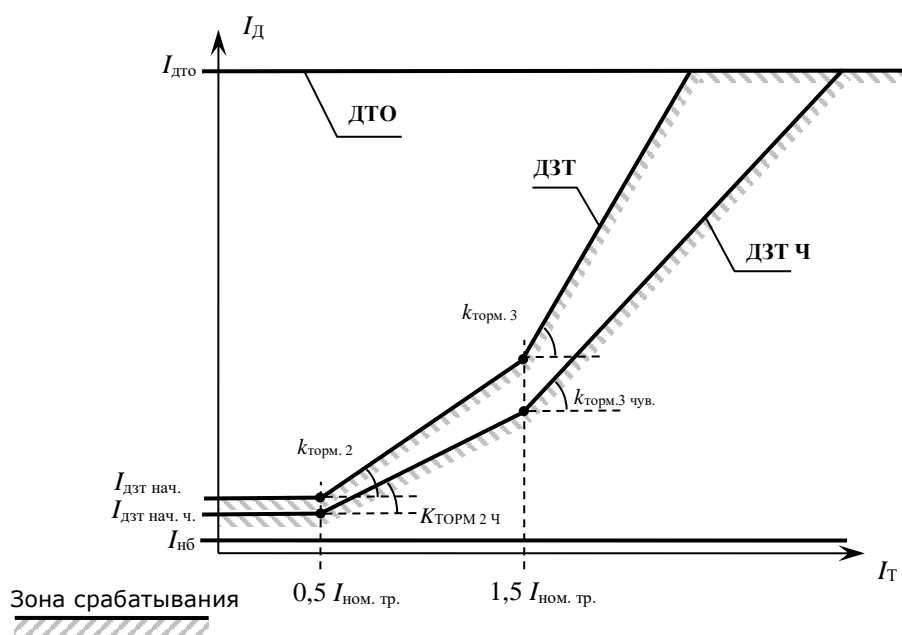


Рисунок 1.1 - Характеристики ДТО, ДЗТ и «чувствительного» органа ДЗТ (ДЗТ Ч)

1.1.7 Токи, полученные в БМРЗ после программного исключения токов нулевой последовательности, приведения к одному масштабу и компенсации поворота фаз, названы далее токами «контуров».

Количество таких «контуров» равно трем (по количеству соответствующих фаз). Токи каждого из «контуров» формируются из токов сторон (ВН, СН, НН) трансформатора.

Дифференциальная токовая защита в БМРЗ функционирует отдельно для каждого из трёх «контуров». При срабатывании защиты хотя бы в одном из «контуров» БМРЗ формирует сигнал на отключение выключателей сторон трансформатора.

1.1.8 Дифференциальный ток вычисляется БМРЗ в относительных единицах (по отношению к номинальному) как «сумма токов контуров» по формуле (1.1)

$$I_{Д} = \frac{|I_{к\text{ ВН}} + I_{к\text{ СН(НН1)}} + I_{к\text{ НН(НН2)}}|}{\frac{I_{ном.тр.вн}}{k_{тт\text{ вн}}}}, \quad (1.1)$$

где $I_{к\text{ ВН}}$, $I_{к\text{ СН(НН1)}}$, $I_{к\text{ НН(НН2)}}$ - векторы вторичных токов сторон «контура», приведенные к стороне ВН (по фазе и значению), А;

$I_{ном.тр.вн}$ - номинальный первичный ток стороны ВН, А;

$k_{тт\text{ вн}}$ - коэффициент трансформации ТТ стороны ВН.

Формула (1.1) приведена применительно к трехобмоточному трансформатору и трансформатору с расщепленной обмоткой стороны НН.

Для двухобмоточного трансформатора расчет дифференциального тока производится для двух сторон, т.е. слагаемое $\dot{I}_{к\text{ сн(нн1)}}$ в формуле (1.1) отсутствует.

Номинальный первичный ток трансформатора для любой из сторон (ВН, СН или НН) можно рассчитать по формуле (1.2)

$$I_{\text{ном.тр}} = \frac{S_{\text{ном.тр.}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{тр.вн ном}}}, \quad (1.2)$$

где $S_{\text{ном.тр.}}$ - номинальная мощность трансформатора, В·А;

$U_{\text{ном.тр.}}$ - номинальное напряжение стороны трансформатора (в данном случае стороны ВН), относительно которой производят расчет, В.

1.1.9 Ток торможения для трёхобмоточного трансформатора и трансформатора с расщеплённой обмоткой НН, БМРЗ вычисляет для каждого из "контуров" по формуле (1.3)

$$I_{\text{т}} = \frac{|\dot{I}_{к\text{ вн}}| + |\dot{I}_{к\text{ сн(нн1)}}| + |\dot{I}_{к\text{ нн(нн2)}}|}{2 \cdot \frac{I_{\text{ном.тр.вн}}}{k_{\text{тг вн}}}}. \quad (1.3)$$

Для двухобмоточного трансформатора расчет производится для двух сторон, т.е. слагаемое $\dot{I}_{к\text{ сн(нн1)}}$ в формуле (1.3) отсутствует.

1.1.10 Подробно вычисление дифференциального и тормозных токов указано в соответствующем описании программы или руководстве по эксплуатации.

1.1.11 Ток намагничивания трансформатора, значение которого в несколько раз превосходит значение номинального тока, появляется только в той обмотке, на которую подается напряжение (при включении трансформатора под напряжение или при восстановлении напряжения после отключения внешнего КЗ). Этот ток имеет затухающий характер и может вызвать срабатывание защиты в случае превышения БТН уставки ДЗТ.

Для предотвращения срабатывания защиты при возникновении БТН в БМРЗ предусмотрена возможность блокирования ДЗТ по результатам гармонического анализа дифференциальных токов.

Известно [2], что в апериодическом БТН доля второй гармоники составляет около 15 % [7]. В периодическом БТН доля второй гармонической составляющей намного больше и составляет до 40 %. Поэтому, в качестве признака наличия БТН использовано процентное соотношение второй и первой гармоники в дифференциальном токе.

При схеме соединения обмоток «треугольник» и одновременном включении фаз при включении трансформатора в режиме, близком к холостому ходу, дифференциальный ток состоит из тока небаланса и БТН.

В таком случае возможна взаимная компенсация второй гармонической составляющей, обусловленной возникновением БТН, и кратковременной гармонической составляющей переходного процесса включения.

В этом случае, из-за недостаточного значения второй гармонической составляющей в дифференциальном токе, возможны отказы блокирования ДЗТ и срабатывания защиты. Поэтому в БМРЗ дополнительно используется четвертая гармоническая составляющая дифференциального тока.

Блокирование ДЗТ в БМРЗ осуществляет отдельно для каждого из «контуров» при превышении значением информационного признака блокирования (ИПБ) заданной уставки.

Вычисление значения ИПБ для каждого из «контуров» в БМРЗ происходит по формуле (1.4)

$$k_{\text{ибп}} = \frac{|I_{(100)\text{диф}}| + |I_{(200)\text{диф}}|}{|I_{(50)\text{диф}}|}, \quad (1.4)$$

где $|I_{(100)\text{диф}}|$ – действующее значение второй гармоники в дифференциальном токе;

$|I_{(200)\text{диф}}|$ – действующее значение четвертой гармоники в дифференциальном токе;

$|I_{(50)\text{диф}}|$ – действующее значение первой гармоники в дифференциальном токе.

Для повышения эффективности блокирования защиты в режиме, сопровождающемся БТН, в БМРЗ предусмотрена возможность перекрёстного блокирования ДЗТ, когда при превышении ИПБ заданной уставки хотя бы для одного из «контуров» происходит блокирование ДЗТ всех «контуров».

Длительность действия перекрёстного режима блокирования ограничена уставкой по времени, задаваемой в БМРЗ.

Перекрёстное блокирование может привести к замедлению действия защиты в случае наложения режима КЗ на режим, сопровождающийся возникновением БТН.

Использование данного режима блокирования защиты может быть рекомендовано лишь в некоторых случаях, о которых написано ниже (см. п. 1.9.2).

1.1.12 Блокирование ДЗТ в БМРЗ осуществляет отдельно для каждого из «контуров» при превышении значением ИПБ заданной уставки.

Рекомендованная уставка блокировки ДЗТ при БТН по содержанию второй гармоники в дифференциальном токе 12 - 15 % от тока первой гармоники дифференциального тока «контура» по формуле (1.5)

$$k_{\text{гармон.2}} = 0,15. \quad (1.5)$$

В дальнейшем уставка может быть уточнена по опыту эксплуатации.

1.1.13 Для повышения эффективности блокирования защиты в режиме, сопровождающемся БТН, в БМРЗ предусмотрена возможность перекрёстного блокирования ДЗТ [8], когда при превышении ИПБ заданной уставки хотя бы для одного из "контуров" происходит блокирование ДЗТ всех «контуров».

Длительность действия перекрёстного режима блокирования ограничена уставкой по времени, задаваемой в БМРЗ.

Перекрёстное блокирование может привести к замедлению действия защиты в случае наложения режима КЗ на режим, сопровождающийся возникновением БТН [3].

Использование данного режима блокирования защиты может быть рекомендовано лишь в некоторых случаях, о которых написано ниже (см. п. 1.6.2).

1.1.14 Для предотвращения излишних срабатываний при внешнем КЗ в режиме насыщения ТТ одного из плеч апериодической составляющей тока КЗ в БМРЗ реализована (см. описание на конкретное исполнение) быстродействующая фиксация местоположения КЗ. Фиксация местоположения КЗ происходит в первые 4 мс после резкого возрастания тормозного тока. ТТ должен обеспечить правильную трансформацию тока КЗ (не насыщаться) как минимум 4 мс. Данная блокировка повышает надежность работы при внешнем КЗ с насыщением ТТ.

1.2 Дифференциальная токовая отсечка

1.2.1 Уставку срабатывания ДТО в долях от номинального тока трансформатора выбирают такой, чтобы обеспечить отстройку от:

- БТН;
- расчётного максимального тока небаланса.

Из двух полученных значений в качестве уставки срабатывания ДТО следует принять наибольшее значение [2].

1.2.2 Для отстройки от броска тока намагничивания уставку $I_{\text{дто}}$ рекомендуется принять от 4 до 5 о.е. номинальных значений тока трансформатора¹⁾.

1.2.3 Для отстройки от расчётного максимального тока небаланса значение уставки $I_{\text{дто}}$ определяют по формуле (1.6)

$$I_{\text{дто}} = k_{\text{отс.}} \cdot I_{\text{нб расч.}} \quad (1.6)$$

где $k_{\text{отс.}} = 1,15 \div 1,3$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность расчета и необходимый запас;

¹⁾ Диапазон принят с учётом подавления апериодической составляющей тока при цифровой обработке сигналов в БМРЗ.

$I_{\text{нб расч}}$ - относительный расчётный максимальный ток небаланса, соответствующий максимальному току внешнего КЗ, проходящему через трансформатор по формуле (1.7)

$$I_{\text{нб расч}} = |I'_{\text{нб расч}}| + |I''_{\text{нб расч}}| + |I'''_{\text{нб расч}}|, \quad (1.7)$$

где $I'_{\text{нб расч}}$ - составляющая, обусловленная погрешностью ТТ;

$I''_{\text{нб расч}}$ - составляющая, обусловленная регулированием напряжения защищаемого трансформатора;

$I'''_{\text{нб расч}}$ - составляющая, обусловленная неточностью выравнивания токов плеч.

Составляющие относительного расчетного тока небаланса $I'_{\text{нб расч}}$, $I''_{\text{нб расч}}$, $I'''_{\text{нб расч}}$ вычисляются по формулам (1.8) - (1.10)

$$I'_{\text{нб расч}} = k_{\text{пер}} \cdot k_{\text{одн}} \cdot \varepsilon_{\text{макс}} \cdot I_{\text{кз макс}} / I_{\text{ном.тр.вн}}, \quad (1.8)$$

$$I''_{\text{нб расч}} = (U_{\text{рег.1}} \cdot k_{\text{ток.1}} + U_{\text{рег.2}} \cdot k_{\text{ток.2}}) \cdot I_{\text{кз макс}} / I_{\text{ном.тр.вн}}, \quad (1.9)$$

$$I'''_{\text{нб расч}} = \gamma \cdot I_{\text{кз макс}} / I_{\text{ном.тр.вн}}, \quad (1.10)$$

где $k_{\text{пер}} = 2,5 \div 5$ - коэффициент, учитывающий увеличение погрешности ТТ в переходном режиме при наличии апериодической составляющей тока;

$k_{\text{одн}} = 1$ - коэффициент однотипности ТТ;

$\varepsilon_{\text{макс}}$ - максимальное из значений относительных полных погрешностей ТТ сторон трансформатора в режиме, соответствующем току $I_{\text{к макс}}$;

$I_{\text{кз макс}}$ - периодическая составляющая максимального фазного тока внешнего КЗ (как правило, трехфазного металлического КЗ), протекающего через ТТ (в начальный момент времени КЗ), приведенная к стороне ВН, А;

$I_{\text{ном.тр.вн}}$ - номинальный первичный ток стороны ВН, А;

$U_{\text{рег.1}}$, $U_{\text{рег.2}}$ - относительные погрешности, обусловленные регулированием напряжения на сторонах защищаемого трансформатора;

$k_{\text{ток.1}}$, $k_{\text{ток.2}}$ - коэффициенты токораспределения, равные отношению тока, проходящего по стороне, где производится регулирование напряжения, в режиме рассматриваемого внешнего КЗ, к току КЗ;

$\gamma = 0,05$ - относительная погрешность цифрового выравнивания токов плеч.

Относительные погрешности принимают равными половине используемого диапазона регулирования, вычисляемого по формуле (1.11), но не менее 0,05

$$U_{\text{рег.1(2)}} = \frac{n-1}{2} \cdot \frac{\Delta U}{100}, \quad (1.11)$$

где n - количество ступеней регулирования;

ΔU - шаг регулирования напряжения, %.

В случае использования устройства ПБВ принимают $U_{\text{рег.1(2)}} = 0,05$.

Для упрощения расчетов допустимо принимать предельные значения коэффициентов $k_{\text{ток.1}} = k_{\text{ток.2}} = 1$, учитывая, что это ведет к снижению коэффициента чувствительности защиты.

Формула (1.9) составлена применительно к трехобмоточному трансформатору (автотрансформатору).

Для двухобмоточного трансформатора в правой части формулы (1.9) слагаемое $U_{\text{рег.2}}$, $k_{\text{ток.2}}$ не учитывают, а слагаемое принимают равным $k_{\text{ток.1}} = 1$.

1.2.4 Согласно [3] проверку чувствительности ДТО не производят.

1.3 Дифференциальная токовая защита с торможением

1.3.1 Общие принципы выбора уставок ДЗТ

1.3.1.1 Для уменьшения составляющей тока небаланса $I''_{\text{нб расч.}}$, вызванной регулированием напряжения, и повышения коэффициента чувствительности ДЗТ рекомендуется использовать БМРЗ-ТД, в которых обеспечивается учёт текущего положения устройства регулирования напряжения.

1.3.1.2 В БМРЗ-ТД предусмотрено два набора уставок ДЗТ: «грубые» и «чувствительные».

1.3.1.3 Расчёт «грубых» уставок производят для среднего положения регулятора напряжения, учитывая максимально возможное значение относительного тока небаланса, при отклонении регулятора напряжения на половину диапазона регулирования.

В большинстве случаев, в процессе эксплуатации трансформатора используют не весь диапазон регулирования (положение регулятора редко находится в положении, соответствующем максимальному значению $I''_{\text{нб расч.}}$), что приводит к использованию завышенных уставок ДЗТ.

В некоторых случаях, при включении реактора на стороне НН в зону защиты это может привести к невыполнению требований [1], установленных для коэффициента чувствительности защиты к металлическим КЗ за реактором.

1.3.1.4 Увеличение коэффициента чувствительности ДЗТ можно добиться путем снижения составляющей относительного тока небаланса $I''_{\text{нб расч.}}$ при автоматическом учёте текущего положения устройства регулирования напряжения, выполняемого алгоритмом ДЗТ БМРЗ.

1.3.1.5 Расчёт «чувствительных» уставок защиты, использующей информацию о текущем положении РПН, производят для значения тока $I''_{нб \text{ расч.}}$, вызванного отклонением регулятора напряжения от текущего положения на три ступени, но не менее чем на 5 % от номинального напряжения.

1.3.1.6 Переключение между группами «грубых» и «чувствительных» уставок происходит в БМРЗ автоматически. Условия переключения приведены в руководстве по эксплуатации на БМРЗ [1, 2].

1.3.1.7 При превышении значением относительного дифференциального тока I_d уставки $I_{нб}$ в течение времени, задаваемого уставкой $t_{нб}$, БМРЗ формирует сигнал «Небаланс» или «Небаланс Тр.».

Уставку по времени $t_{нб}$ задают исходя из условия отстройки от максимального времени действия резервных защит трансформатора.

1.3.1.8 При наличии трансформатора собственных нужд (ТСН) в зоне действия защиты расчёт уставок необходимо выполнять учитывая следующее:

- уставку начального тока срабатывания ДЗТ $I_{дзт \text{ нач}}$ отстраивают от дифференциального тока в защите, вызванного КЗ за ТСН;
- уставку сигнализации небаланса $I_{нб}$ отстраивают от максимального рабочего тока ТСН.

1.3.2 Выбор уставки начального тока срабатывания ДЗТ

1.3.2.1 Уставку начального тока срабатывания ДЗТ $I_{дзт \text{ нач}}$ выбирают из условия отстройки от расчетного максимального тока небаланса в нагрузочном режиме по аналогии с формулой (1.6).

1.3.2.2 Для БМРЗ-ТД, учитывающих текущее положение РПН, расчет выполняют дважды, сначала для группы «грубых» уставок, а затем для группы «чувствительных» уставок.

Если регулирование напряжения не применяется, «чувствительные» уставки следует принимать равными «грубым».

1.3.2.3 Уставку начального тока срабатывания ДЗТ $I_{дзт \text{ нач}}$ вычисляют по формуле (1.12)

$$I_{дзт \text{ нач}} = k_{отс} \cdot I_{нб \text{ расч.}}, \quad (1.12)$$

где $k_{отс} = 1,5$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность расчета и необходимый запас.

1.3.2.4 Значение тока $I_{\text{нб расч.}}$ для трёхобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов находят по формуле (1.13), а для двухобмоточных трансформаторов и трансформатора с расщепленной обмоткой по формуле (1.14) учитывая, что характеристика торможения [4] имеет первый излом при значении тока торможения $0,5 \cdot I_{\text{ном тр}}$

$$I_{\text{нб расч.}} = 0,5 \cdot (k_{\text{пер.}} \cdot k_{\text{одн.}} \cdot \varepsilon_{0,5} + U_{\text{рег.1}} \cdot k_{\text{ток.1}} + U_{\text{рег.2}} \cdot k_{\text{ток.2}} + \gamma) \quad (1.13)$$

$$I_{\text{нб расч.}} = 0,5 \cdot (k_{\text{пер.}} \cdot k_{\text{одн.}} \cdot \varepsilon_{0,5} + U_{\text{рег.}} + \gamma) \quad (1.14)$$

где $k_{\text{пер.}} = 1$ – коэффициент, учитывающий переходный режим (принято отсутствие апериодической составляющей тока в нагрузочном режиме);

$k_{\text{одн.}} = 1$ – коэффициент однотипности ТТ;

$\varepsilon_{0,5}$ – максимальное из значений относительных полных погрешностей ТТ сторон трансформатора в режиме, соответствующем $0,5 \cdot I_{\text{ном.тр.}}$;

$U_{\text{рег.1}}$, $U_{\text{рег.2}}$ – относительные погрешности, обусловленные регулированием напряжения на сторонах защищаемого трансформатора;

$k_{\text{ток.1}}$, $k_{\text{ток.2}}$ – коэффициенты токораспределения, равные отношению тока, проходящего по стороне, где производится регулирование напряжения, в режиме рассматриваемого внешнего КЗ к току КЗ;

$\gamma = 0,05$ – относительная погрешность цифрового выравнивания токов плеч.

Для группы «грубых» уставок относительные погрешности принимают равными половине используемого диапазона регулирования по формуле (1.15), но не менее 0,05

$$U_{\text{рег.1(2)}} = \frac{n-1}{2} \cdot \frac{\Delta U}{100} \quad (1.15)$$

где n – количество ступеней регулирования, ΔU – шаг регулирования напряжения, %.

Для группы «чувствительных» уставок принимают, но не менее 0,05

$$U_{\text{рег.1(2)}} = 3 \cdot \Delta U / 100,$$

где ΔU – шаг регулирования напряжения, %.

В случае использования устройства ПБВ принимают $U_{\text{рег.1(2)}} = 0,05$.

В целях упрощения расчетов допустимо принимать предельные значения коэффициентов $k_{\text{ток.1}} = k_{\text{ток.2}} = 1$, учитывая, что это ведет к снижению коэффициента чувствительности защиты.

1.3.2.6 Значение уставки $I_{\text{дзт нач.}}$ не рекомендуется выбирать менее 0,3 о.е.

По данным [4] ДЗТ с уставкой $I_{\text{дзт нач.}}$ от 0,3 до 0,5 о.е. обеспечивает требуемый коэффициент чувствительности к витковым замыканиям в переплетённых обмотках и межкатушечным замыканиям в любых обмотках.

1.3.3 Выбор уставки коэффициента торможения второго участка характеристики торможения ДЗТ

1.3.3.1 Коэффициент торможения $k_{\text{торм.2}}$ второго участка характеристики торможения ДЗТ выбирают исходя из условия отстройки тока срабатывания защиты от расчетного тока небаланса при токе торможения, соответствующем концу второго участка.

Второй участок характеристики торможения соответствует токам торможения от 0,5 до $1,5 \cdot I_{\text{ном.тр}}$. (рисунок 1.1).

Для БМРЗ-ТД, учитывающих текущее положение РПН, расчет выполняют дважды, сначала для группы «грубых» уставок, а затем для группы «чувствительных» уставок.

Если регулирование напряжения не применяется, «чувствительные» уставки следует принимать равными «грубым».

1.3.3.2 Коэффициент торможения $k_{\text{торм.2}}$ рассчитывают по формуле (1.16)

$$k_{\text{торм.2}} = \frac{I_{\text{дзт2}} - I_{\text{дзт нач.}}}{1,5 - 0,5} = I_{\text{дзт2}} - I_{\text{дзт нач.}}, \quad (1.16)$$

где $I_{\text{дзт2}}$ – ток срабатывание ДЗТ при токе торможения $1,5 \cdot I_{\text{ном.тр}}$;

$I_{\text{дзт нач.}}$ - уставка начального тока срабатывания ДЗТ.

1.3.3.3 Ток срабатывание ДЗТ $I_{\text{дзт2}}$ рассчитывают по формуле (1.17)

$$I_{\text{дзт2}} = k_{\text{отс.}} \cdot I_{\text{нб расч.2}}, \quad (1.17)$$

где $k_{\text{отс.}} = 1,15 \div 1,3$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность расчета и необходимый запас;

$I_{\text{нб расч.2}}$ – расчетное относительное значение тока небаланса, соответствующее току торможения $1,5 \cdot I_{\text{ном тр}}$.

1.3.3.4 Значение тока $I_{\text{нб расч.2}}$ для трёхобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов находят по формуле (1.18), а для двухобмоточных трансформаторов и трансформатора с расщепленной обмоткой по формуле (1.19) учитывая, что характеристика торможения имеет второй излом при значении тока торможения $1,5 \cdot I_{\text{ном.тр}}$.

$$I_{\text{нб расч.2}} = 1,5 \cdot (k_{\text{пер.}} \cdot k_{\text{одн.}} \cdot \varepsilon_{1,5} + U_{\text{рег.1}} \cdot k_{\text{ток.1}} + U_{\text{рег.2}} \cdot k_{\text{ток.2}} + \gamma), \quad (1.18)$$

$$I_{\text{нб расч.2}} = 1,5 \cdot (k_{\text{пер.}} \cdot k_{\text{одн.}} \cdot \varepsilon_{1,5} + U_{\text{рег.}} + \gamma), \quad (1.19)$$

где $k_{\text{пер.}} = 2$ – коэффициент, учитывающий увеличение погрешности ТТ в переходном режиме при наличии апериодической составляющей тока;

$k_{\text{одн.}} = 1$ – коэффициент однотипности ТТ;

$\varepsilon_{1,5}$ – максимальное из значений относительных полных погрешностей ТТ сторон трансформатора в режиме, соответствующем $1,5 \cdot I_{\text{ном тр}}$;

$U_{\text{рег.1}}, U_{\text{рег.2}}$ – относительные погрешности, обусловленные регулированием напряжения на сторонах защищаемого трансформатора;

$k_{\text{ток.1}}, k_{\text{ток.2}}$ – коэффициенты токораспределения, равные отношению тока, проходящего по стороне, где производится регулирование напряжения, в режиме рассматриваемого внешнего КЗ к току КЗ;

$\gamma = 0,05$ – относительная погрешность цифрового выравнивания токов плеч.

Для группы «грубых» уставок относительные погрешности принимают равными половине используемого диапазона регулирования по формуле (1.15), но не менее 0,05.

Для группы «чувствительных» уставок принимают по формуле (1.20), но не менее 0,05

$$U_{\text{рег.1(2)}} = \frac{n_{\text{рпн чув.}} \cdot \Delta U}{100} \quad (1.20)$$

где ΔU – шаг регулирования напряжения, %, $n_{\text{рпн чув.}}$ – количество ступеней РПН обеспечивающее изменение напряжения обмотки данной стороны не менее, чем на 5 % от номинального.

В случае использования устройства ПБВ принимают $U_{\text{рег.1(2)}} = 0,05$.

В целях упрощения расчетов допустимо принимать предельные значения коэффициентов $k_{\text{ток.1}} = k_{\text{ток.2}} = 1$, учитывая, что это ведет к снижению коэффициента чувствительности защиты.

1.3.3.5 Если значение $k_{\text{торм.2}}$, полученное в ходе расчёта, меньше минимально возможного для ввода в БМРЗ значения [1, 2], то в качестве значения уставки и для дальнейших расчётов в качестве коэффициента $k_{\text{торм.2}}$ следует принять минимально возможное для ввода в БМРЗ значение.

1.3.4 Выбор уставки коэффициента торможения третьего участка характеристики торможения ДЗТ

1.3.4.1 Коэффициент торможения $k_{\text{торм.3}}$ третьего участка характеристики торможения ДЗТ выбирают исходя из условия отстройки тока срабатывания защиты от расчетного тока небаланса при максимальном токе внешнего КЗ.

Для БМРЗ, учитывающих текущее положение РПН, расчет выполняют дважды, сначала для группы «грубых» уставок, а затем для группы «чувствительных» уставок.

Если регулирование напряжения не применяется, «чувствительные» уставки следует принимать равными «грубым».

1.3.4.2 Коэффициент торможения $k_{\text{торм.3}}$ третьего участка характеристики торможения ДЗТ рассчитывают по формуле (1.21)

$$k_{\text{торм.3}} = \frac{I_{\text{дто}} - I_{\text{дзт2}}}{I_{k \text{ торм.}} - I_{\text{торм.2}}}, \quad (1.21)$$

где $I_{\text{дто}}$ – уставка срабатывания ДТО, выбранная по (1.6);

$I_{\text{дзт2}}$ – ток срабатывания ДЗТ при токе торможения $1,5 \cdot I_{\text{ном.тр}}$;

$I_{k \text{ торм.}}$ – ток торможения, соответствующий максимальному току внешнего КЗ;

$I_{\text{торм.2}} = 1,5$ – ток торможения, соответствующий второму излому характеристики торможения.

При расчёте коэффициента торможения третьего участка группы «чувствительных» уставок вместо значения тока $I_{\text{дто}}$ следует использовать значение тока $I_{\text{дто чув.}}$.

Значение тока $I_{\text{дто чув.}}$ следует рассчитывать аналогично значению тока $I_{\text{дто}}$, заменив в формуле (1.9) $U_{\text{рег.1}}$, $U_{\text{рег.2}}$ на значения, равные $3 \cdot \Delta U / 100$ (ΔU – шаг регулирования напряжения в процентах), но не менее 0,05.

1.3.4.3 Ток торможения $I_{k \text{ торм.}}$, соответствующий максимальному току внешнего КЗ, вычисляют по формуле (1.22)

$$I_{k \text{ торм.}} = \left(1 - \frac{k_{\text{пер.}} \cdot \varepsilon_{\text{макс.}}}{2} \right) \cdot \frac{I_{\text{кз тр.макс.}}}{I_{\text{ном.тр.вн}}}, \quad (1.22)$$

где $k_{\text{пер.}} = 2,5 \div 5$ – коэффициент, учитывающий увеличение погрешности ТТ в переходном режиме при наличии апериодической составляющей тока;

$I_{\text{кз тр.макс.}}$ – периодическая составляющая максимального фазного тока внешнего КЗ (как правило, трехфазного металлического КЗ), протекающего через ТТ (в начальный момент времени КЗ), приведенная к стороне ВН, А;

$\varepsilon_{\text{макс.}}$ – максимальное из значений относительных полных погрешностей ТТ сторон трансформатора в режиме, соответствующем току $I_{\text{кз тр.макс.}}$;

$I_{\text{ном.тр.вн}}$ – номинальный вторичный ток стороны ВН трансформатора (автотрансформатора).

1.3.5 Проверка чувствительности ДЗТ

1.3.5.1 Согласно руководящим указаниям [6], чувствительность ДЗТ следует определять при металлическом КЗ на выводах защищаемого трансформатора, при его работе на расчётном ответвлении.

Расчётными режимами работы подстанции и питающих систем являются реальные режимы, обуславливающие минимальный ток при расчётном виде КЗ.

1.3.5.2 Согласно [3] коэффициент чувствительности защиты должен быть около 2.

Если обеспечение этого или близкого значения коэффициента чувствительности связано со значительным усложнением защиты или технически невозможно, допустимо снижение коэффициента чувствительности дифференциальной защиты до значения около 1,5 в следующих случаях:

- ✓ при КЗ на выводах низшего напряжения трансформатора мощностью менее 80 МВА;
- ✓ в режиме включения трансформатора под напряжение, а также для кратковременных режимов его работы (например, при отключении одной из питающих сторон);
- ✓ в режиме КЗ за реактором, установленным на стороне низшего напряжения и входящим в зону дифференциальной защиты.

Чувствительность дифференциальной защиты трансформатора при КЗ за реактором допустимо не обеспечивать при наличии других защит, охватывающих реактор и удовлетворяющих требованиям чувствительности.

1.3.5.3 Коэффициент чувствительности ДЗТ при металлическом КЗ определяют по формуле (1.23)

$$k_{\text{чув.}} = \frac{I_{\text{кз мин.}} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{мин.}})}{I_{\text{ном.тр.вн}} \cdot I_{\text{дзт нач.}}}, \quad (1.23)$$

где $I_{\text{кз мин.}}$ – минимальное значение периодической составляющей тока КЗ в защищаемой зоне, приведённое к стороне ВН, А;

$\varepsilon_{\text{мин.}}$ - максимальное из значений относительных полных погрешностей ТТ сторон трансформатора в режиме, соответствующем току $I_{\text{кз мин.}}$;

$I_{\text{дзт нач.}}$ - уставка начального тока срабатывания ДЗТ.

1.4 Выбор уставки сигнализации небаланса

1.4.1 Уставку сигнализации небаланса $I_{\text{нб}}$ выбирают из условия отстройки от расчетного максимального тока небаланса в нагрузочном режиме по формуле (1.24)

$$I_{\text{нб}} = k_{\text{отс.}} \cdot I_{\text{нб расч.}}, \quad (1.24)$$

где $k_{\text{отс.}} = 1,1$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность расчёта и необходимый запас;

$I_{\text{нб расч.}}$ – относительный расчетный ток небаланса при токе торможения, соответствующем максимальному рабочему току трансформатора.

Значение уставки $I_{\text{нб}}$ рекомендуется уточнить после ввода трансформатора в эксплуатацию на основании данных о фактическом токе небаланса в нагрузочном режиме.

1.4.2 Относительный расчётный ток небаланса $I_{\text{нб расч.}}$ следует рассчитывать в соответствии с п. 1.4.1 с учётом следующих изменений:

- значение 0,5 в формулах (1.13) и (1.14) следует заменить на относительное значение максимального рабочего длительного тока трансформатора 1,0;

- значение $\varepsilon_{0,5}$ следует заменить на $\varepsilon_{\text{раб.макс.}}$.

1.4.3 Уставку по времени $t_{\text{нб}}$ следует отстроить от максимального времени действия резервных защит трансформатора по формуле (1.25)

$$t_{\text{нб}} = k_{\text{отс.}} \cdot t_{\text{рез.макс.}}, \quad (1.25)$$

где $k_{\text{отс.}} = 1,5$ – коэффициент отстройки, учитывающий необходимый запас;

$t_{\text{рез.макс.}}$ – максимальная уставка по времени действия резервных защит трансформатора.

1.5 Выбор уставок ДЗТ при наличии ТСН в зоне защиты

1.5.1 Выбор уставок ДЗТ и проверку чувствительности защиты при наличии в зоне защиты ТСН следует проводить аналогично описанному в п.п. 1.3.1 - 1.3.3 с учётом особенностей, приведённых ниже.

1.5.2 Для обеспечения селективности действия защиты уставку начального тока срабатывания ДЗТ, рассчитанную по формуле (1.12), дополнительно необходимо отстроить от дифференциального тока в защите, вызванного КЗ за ТСН по формуле (1.26)

$$I_{\text{дзт нач.}} = k_{\text{отс.}} \cdot \frac{I_{\text{к тсн вн макс.}}}{I_{\text{ном.тр.вн}}}, \quad (1.26)$$

где $k_{\text{отс.}} = 1,5$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность расчёта и необходимый запас;

$I_{к\text{ ТСН вН макс.}}$ - периодическая составляющая максимального фазного тока КЗ за ТСН (как правило, трехфазного металлического КЗ), приведенная к стороне ВН, А;

$I_{\text{ном.тр.вн}}$ - номинальный первичный ток стороны ВН, А.

1.5.3 В ходе расчёта уставки сигнализации небаланса дополнительно следует учитывать максимальный рабочий ток ТСН, увеличивающий значение тока небаланса в нагрузочном режиме.

Уставку сигнализации небаланса $I_{\text{нб}}$, в случае наличия ТСН в зоне защиты, следует выбирать по формуле (1.27)

$$I_{\text{нб}} = k_{\text{отс.}} \cdot (I_{\text{нб расч.}} + I_{\text{ТСН раб.}}), \quad (1.27)$$

где $k_{\text{отс.}} = 1,1$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность расчёта и необходимый запас;

$I_{\text{нб расч.}}$ - относительный расчетный ток небаланса в соответствии с п. 1.4.2;

$I_{\text{ТСН раб.}}$ - относительное значение максимального рабочего тока ТСН, приведенное к стороне ВН.

1.6 Выбор уставок блокирования ДЗТ при возникновении БТН

1.6.1 Уставку ИПБ $k_{\text{ибп}}$ рекомендуется устанавливать 0,15 (см. п. 1.1.13). В процессе эксплуатации значение уставки $k_{\text{ибп}}$ может быть уточнено.

1.6.2 Функцию перекрёстного блокирования ДЗТ рекомендуется использовать для трансформаторов, группа соединения обмоток которых отличается от 0 или 6.

Перекрёстное блокирование может привести к замедлению действия защиты в случае наложения режима КЗ на режим, сопровождающийся возникновением БТН [7].

Поэтому решение об использовании функции перекрёстного блокирования принимают индивидуально, для каждого рассматриваемого случая.

Функцию перекрёстного блокирования использовать не рекомендуется, если возможен оперативный анализ причин отключения трансформатора.

В этом случае, если анализ покажет, что причиной отключения явилось недостаточное для блокирования ДЗТ значение ИПБ в одном из «контуров» защиты в режиме БТН, возможно выполнить повторное включение трансформатора под напряжение.

В противном случае, функция перекрёстного блокирования ДЗТ может быть использована.

1.6.3 Уставку по времени ограничения длительности перекрёстного режима блокирования $t_{\text{пб}}$ для трансформаторов малой и средней мощности рекомендуется принимать равной 1 с., для трансформаторов большой мощности – 2 с.

Значение уставки $t_{пб}$ рекомендуется уточнить по опыту эксплуатации.

1.7 Выбор уставок блокирования ДЗТ при перевозбуждении трансформатора

1.7.1 Режим перевозбуждения трансформатора возможен при повышении напряжения обмотки свыше номинального или при снижении частоты. Кроме повышения напряжения или снижения частоты, этот режим характеризуется появлением в дифференциальном токе пятой, седьмой гармонических составляющих. Так как насыщение сердечников силового трансформатора происходит в оба полупериода, то в токе намагничивания отсутствует постоянная составляющая.

При перевозбуждении увеличиваются потери в трансформаторе на гистерезис и вихревые токи, происходит нагрев до недопустимых температур конструктивных элементов, что приводит к нагреву изоляции и ее повреждению.

Блокировка дифференциальной защиты в режиме перевозбуждения выполняется при помощи фиксации в дифференциальном токе пятой гармоники [9].

1.7.2 Рекомендованная уставка блокировки ДЗТ при перевозбуждении по содержанию пятой гармоники в дифференциальном токе 30-40 % от тока первой гармоники дифференциального тока по формуле (1.28)

$$k_{\text{гармон.5}} = 0,30 \quad (1.28)$$

В дальнейшем уставка может быть уточнена по опыту эксплуатации.

1.7.3 Уставку по времени ограничения длительности перекрёстного режима блокирования $t_{пб}$ для трансформаторов малой и средней мощности рекомендуется принимать равной 1 с., для трансформаторов большой мощности – 2 с.

Значение уставки $t_{пб}$ рекомендуется уточнить по опыту эксплуатации.

1.7.4 Пример выбора уставок дифференциальной защиты трансформатора с торможением рассмотрен в Приложении А.

2 Дифференциальная токовая защита ошиновки с торможением

2.1 Блоки БМРЗ для защиты ошиновок

2.1.1 Для дифференциальной защиты ошиновок используются БМРЗ-ДЗШ [15] и БМРЗ-ТД [2].

2.1.2 БМРЗ-ДЗШ может использоваться для защиты ошиновок с пятью плечами. БМРЗ-ТД может использоваться для создания одной или двух ошиновок с количеством плеч от двух до четырех.

При реализации дифференциальной ошиновки защиты используются решения, ранее положительно себя зарекомендовавшие. В качестве измеряемых величин используются расчетные значения тока присоединений защищаемой секции шин.

В БМРЗ реализована возможность реализации «гибкой» логики, настройки и адаптации под различные первичные электрические схемы и различное электротехническое оборудование.

2.1.3 Дифференциальные защиты в БМРЗ выполнены на схожих принципах, что позволяет использовать данную методику для обоих исполнений.

2.1.4 Дифференциальная токовая защита ошиновки является защитой с абсолютной селективностью, основанной на непосредственном сравнении значений и фаз токов всех присоединений защищаемой ошиновки.

2.1.5 Для правильного функционирования защиты необходимо, чтобы ТТ присоединений были установлены за выключателями (рисунок 2.1). Зона действия защиты ограничивается местом установки ТТ присоединений.

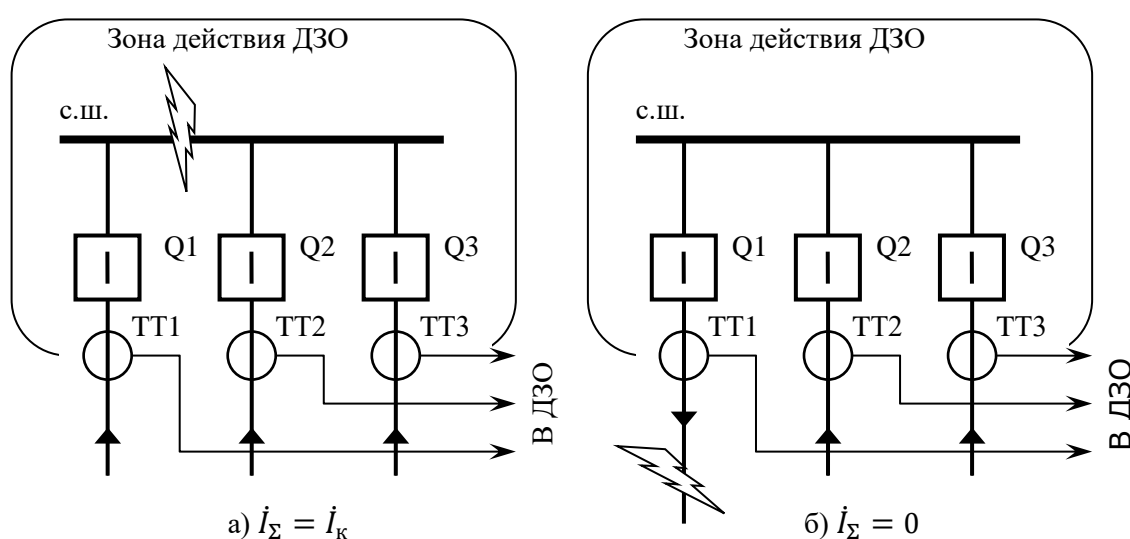


Рисунок 2.1 - Принцип действия дифференциальной токовой защиты

Каждое присоединение формирует так называемое «плечо» дифференциальной защиты [10]. В БМРЗ обеспечивается цифровое выравнивание токов, что позволяет подключать БМРЗ сразу к ТТ без использования промежуточных ТТ.

При подключении устройства защиты к ТТ присоединений за положительное направление токов принимают их направление в сторону защищаемого объекта.

2.1.6 При возникновении КЗ в зоне действия защиты суммарный вторичный ток ТТ (называемый дифференциальным) будет равен току КЗ – $I_{\Sigma} = I_{к}$ (рисунок 2.1, а).

При отсутствии КЗ и/или при внешнем КЗ дифференциальный ток в идеальных условиях будет равен нулю – $I_{\Sigma} = 0$ (рисунок 2.1, б).

2.1.7 В реальных условиях в нормальном режиме работы схемы возникает дифференциальный ток небаланса, значение которого увеличивается по мере увеличения сквозного тока через объект.

Причина возникновения тока небаланса – погрешности, вносимые ТТ и устройствами релейной защиты.

2.1.8 При внешних КЗ влияние погрешностей ТТ может быть значительным, что приводит к необходимости увеличения уставки срабатывания и, следовательно, снижению чувствительности защиты к КЗ в зоне действия защиты.

2.1.9 Для повышения чувствительности наряду с ДТО применяют ДЗТ – дифференциальную защиту с торможением, ток срабатывания которой изменяется в зависимости от тока торможения (сквозного тока, проходящего через защищаемый объект).

2.2 Особенности дифференциальной защиты в БМРЗ

2.2.1 Цифровое выравнивание токов «плеч»

2.2.1.1 В БМРЗ, предназначенных для защиты ошиновки, предусмотрено цифровое выравнивание токов «плеч» защиты, что позволяет использовать ТТ присоединений с разными коэффициентами трансформации.

Выравнивание токов защит ошиновки осуществляется с использованием коэффициентов трансформации каждого присоединения. Для перевода в относительные единицы для БМРЗ-ДЗШ используется номинальный ток ТТ (задается уставкой), для БМРЗ-ТД используется расчетный вторичный ток стороны силового трансформатора, к которой подключена ошиновка.

Коэффициент цифрового выравнивания каждого присоединения $k_{\text{цпв}}$ определяют по формуле (2.1)

$$k_{\text{цпв}} = \frac{k_{\text{тт прис.}}}{k_{\text{тт баз.}}}, \quad (2.1)$$

где $k_{\text{тт прис.}}$ – коэффициент трансформации ТТ присоединения;

$k_{\text{тт баз.}}$ – коэффициент трансформации ТТ базисного присоединения.

За базисное присоединение выбирают присоединение с наибольшим номинальным первичным током ТТ (для БМРЗ-ДЗШ), плечо к которому подключена ошиновка для БМРЗ-ТД.

Для определения действующего значения дифференциального тока $I_{\text{д}}$ в БМРЗ происходит суммирование токов всех «плеч» по формуле (2.2)

$$I_{\text{д}} = \frac{|\sum_{\text{п}} (k_{\text{цпв}} \cdot i_{\text{п}})|}{I_{\text{ном}}}, \quad (2.2)$$

где $i_{\text{п}}$ – вектор вторичного фазного тока присоединения, А;

$I_{\text{ном}}$ – номинальный вторичный ток ТТ (БМРЗ-ДЗШ), номинальный вторичный ток стороны силового трансформатора (БМРЗ-ТД).

2.2.1.2 Действующее значение тока торможения $I_{\text{т}}$ БМРЗ вычисляет, как полусумму действующих значений токов всех «плеч» по формуле (2.3)

$$I_{\text{т}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sum_{\text{п}} (k_{\text{цпв}} \cdot |i_{\text{п}}|)}{I_{\text{ном}}}. \quad (2.3)$$

2.3 Дифференциальная токовая отсечка

2.3.1 Общие сведения о работе ДТО

2.3.1.1 ДТО предназначена для быстрого и селективного отключения КЗ со значительным дифференциальным током в зоне действия защиты. ДТО, как вспомогательный элемент дифференциальной защиты, рекомендуется всегда применять совместно с ДЗТ.

2.3.1.2 Срабатывание ДТО при превышении дифференциальным током заданной уставки происходит без выдержки времени, без торможения. Возврат ДТО происходит при снижении дифференциального тока ниже уставки срабатывания защиты (с учётом коэффициента возврата).

2.3.2 Выбор уставок срабатывания ДТО

2.3.2.1 Уставку срабатывания ДТО всех пусковых органов выбирают по условию отстройки от расчётного максимального тока небаланса.

Расчётным для определения максимального тока небаланса выбирают присоединение, ТТ которого имеет наибольшую погрешность при прохождении через него тока внешнего КЗ.

2.3.2.2 Максимальный расчётный ток небаланса $I_{\text{нб макс}}$ при максимальном токе внешнего КЗ определяют по формуле (2.4)

$$I_{\text{нб макс}} = (\varepsilon_{\text{макс}} \cdot k_a \cdot k_{\text{одн}} + \gamma) \cdot I_{\text{кз макс}}, \quad (2.4)$$

где $\varepsilon_{\text{макс}}$ - максимальное значение полной погрешности ТТ расчётного присоединения (10 % при выполнении требований [11])¹⁾;

$k_a = 2 \div 5$ - коэффициент, учитывающий увеличение погрешности при аperiodической составляющей тока КЗ;

$k_{\text{одн}} = 0,5$ (для однотипных ТТ) или 1 (для разнотипных ТТ) - коэффициент однотипности ТТ;

$\gamma = 0,05$ - погрешность цифрового выравнивания токов «плеч»;

$I_{\text{кз макс}}$ - периодическая составляющая максимально возможного первичного тока КЗ (в начальный момент времени КЗ), проходящего при внешнем КЗ по ТТ присоединения, являющегося расчётным, А.

Коэффициент k_a обусловлен возможным насыщением ТТ аperiodической составляющей тока КЗ. Чем меньше время до насыщения ТТ, тем больше должен быть выбран этот коэффициент.

2.3.2.3 Уставку срабатывания ДТО $I_{\text{дто}}$ вычисляют по формуле (2.5)

$$I_{\text{дто}} = k_n \cdot I_{\text{нб макс}}, \quad (2.5)$$

где $k_n = 1,5$ - коэффициент надежности.

2.3.2.3 При опробовании присоединений от ошиновки (только для БМРЗ-ДЗШ) срабатывание ДТО происходит по другой уставке, которую можно при необходимости загрузить.

При отсутствии силовых трансформаторов на опробуемых присоединениях загрузка ДТО не требуется.

¹⁾ Для ТТ, выпущенных в соответствии с ГОСТ 7746-55, действительная кратность первичного тока, соответствующая 10 % погрешности, может быть на 20 % ниже установленной заводом-изготовителем.

При наличии силовых трансформаторов на опробуемых присоединениях дополнительную уставку ДТО необходимо также отстроить от максимального БТН силового трансформатора по формуле (2.6)

$$I_{\text{дто опр.}} = k_{\text{бтн}} \cdot I_{\text{ном}}, \quad (2.6)$$

где $k_{\text{бтн}} = 5$ – коэффициент броска тока намагничивания;

$I_{\text{ном}}$ – номинальный ток силового трансформатора, А.

2.3.2.4 Проверку чувствительности ДТО производить нет необходимости.

2.4 Дифференциальная токовая защита с торможением

2.4.1 Общие сведения о работе ДЗТ

2.4.1.1 ДЗТ предназначена для быстрого и селективного отключения всех видов КЗ в зоне действия защиты.

Высокую чувствительность ДЗТ обеспечивает применение торможения защиты при возрастании сквозного тока, протекающего через защищаемый объект. Торможение учитывает увеличение погрешности ТТ (в том числе более 10 %) при возрастании проходящего через него тока [8].

2.4.1.2 В БМРЗ, дифференциальной защиты ошиновки предусмотрен один пусковой орган ДЗТ, зона действия которого охватывает всю ошиновку.

2.4.1.3 Отдельная ступень защиты при обрыве вторичных цепей ТТ действует на сигнализацию с выдержкой времени и может блокировать избирательные органы ДЗТ.

2.4.2 Выбор уставок срабатывания ДЗТ

2.4.2.1 На рисунке 2.2 представлен общий вид характеристик ДЗТ и ДТО.

2.4.2.2 Уставку начального тока срабатывания органов ДЗТ $I_{\text{дзт нач.}}$ ошиновки вычисляют по формуле (2.7)

$$I_{\text{дзт нач.}} = k_{\text{отс.}} \cdot I_{\text{нагр. макс.}}, \quad (2.7)$$

где $k_{\text{отс.}} = 1,2$ – коэффициент отстройки от дифференциального тока, возникающего при обрыве вторичных цепей ТТ;

$I_{\text{нагр. макс.}}$ – максимальный ток нагрузочного режима (первичный ток нагрузки базисного присоединения), А.

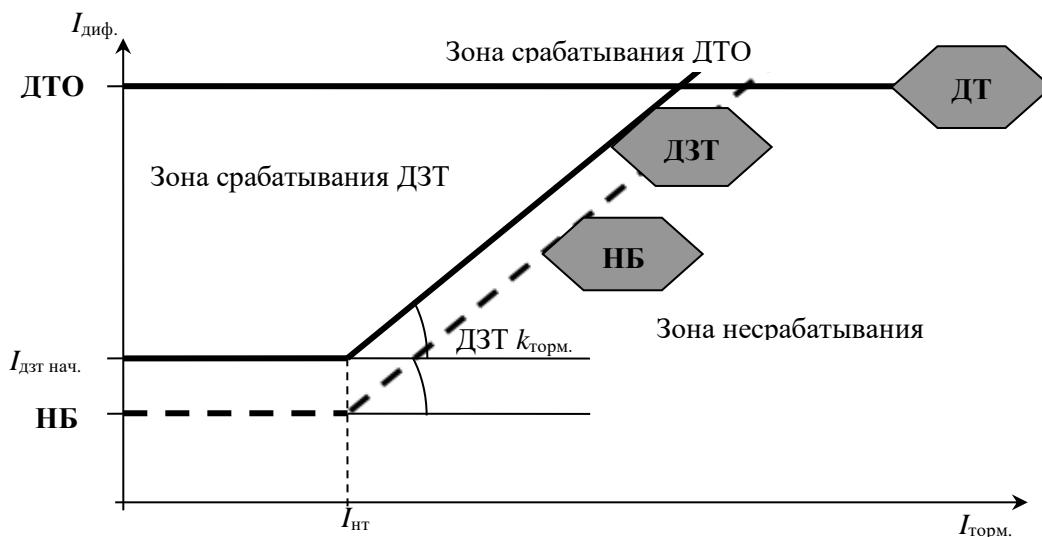


Рисунок 2.2 - Характеристики ДТО и ДЗТ

2.4.2.3 Максимальный ток небаланса в рабочем режиме $I_{\text{нб раб.}}$ определяют по формуле (2.8)

$$I_{\text{нб раб.}} = (\varepsilon_{\text{нагр.макс.}} + \gamma) \cdot I_{\text{нагр.макс.}} \quad (2.8)$$

где $\varepsilon_{\text{нагр.макс.}} = 0,1$ - наибольшая расчётная полная погрешность ТТ при максимальном токе нагрузочного режима;

$\gamma = 0,05$ - погрешность цифрового выравнивания токов «плеч».

2.4.2.4 Уставку срабатывания $I_{\text{нб сраб.}}$ ступени ДЗО, действующей на сигнализацию небаланса и блокирование ДЗО при обрыве вторичных цепей ТТ, вычисляют по формуле (2.9)

$$I_{\text{нб сраб.}} = k_{\text{отс.}} \cdot I_{\text{нб раб.}} \quad (2.9)$$

где $k_{\text{отс.}} = 1,4$ - коэффициент отстройки;

$I_{\text{нб раб.}}$ – максимальный ток небаланса в рабочем режиме.

В результате превышения дифференциальным током уставки $I_{\text{нб сраб.}}$ в течение времени, определяемого уставкой $t_{\text{нб}}$, происходит блокирование ДТО и ДЗТ и срабатывает орган сигнализации.

В БМРЗ-ТД, в отличие от остальных БМРЗ, реализована ДЗО, в которой блокирование по току небаланса производится с учетом коэффициента торможения, равного коэффициенту торможения ($k_{\text{торм.}}$) выбранного для ДЗТ (см. п. 2.4.2.6).

Уставку по времени $t_{\text{нб}}$ следует определять исходя из условия отстройки от максимального времени действия резервных защит отходящих линий.

2.4.2.5 После выбора уставки срабатывания $I_{\text{нб сраб.}}$ необходимо проверить выполнение условия по формуле (2.10)

$$I_{\text{нб сраб.}} < 0,9 \cdot I_{\text{нагр.мин}}, \quad (2.10)$$

где $I_{\text{нагр.мин}}$ – минимальное значение рабочего тока наименее мощного присоединения, А.

В случае, если условие (2.10) не выполняется, значение уставки $I_{\text{нб сраб.}}$ необходимо определить исходя из опыта эксплуатации.

2.4.2.6 Коэффициент торможения $k_{\text{торм.}}$ участка торможения ДЗТ вычисляются по формуле (2.11)

$$k_{\text{торм.}} = \frac{I_{\text{дто}} - I_{\text{нб раб.}}}{I_{\text{кз макс.}} - I_{\text{нагр.макс.}}}. \quad (2.11)$$

Для надежной работы защиты при КЗ в зоне её действия, значение коэффициента $k_{\text{торм.}}$ должно быть не более 1,2. Если расчетное значение $k_{\text{торм.}} > 1,2$, необходимо принять меры по уменьшению погрешности измерительных ТТ, обусловленной током $I_{\text{кз макс.}}$, например, снизить нагрузку на вторичные цепи ТТ.

2.4.2.7 Уставка по току начала торможения $I_{\text{нт}}$ по формуле (2.12)

$$I_{\text{нт}} = I_{\text{нагр.макс.}} \cdot \left(1 + \frac{1,05}{k_{\text{т}}} \right). \quad (2.12)$$

Формула (2.12) получена исходя из геометрических свойств характеристик, изображенных на рисунке 2.2, а также формул (2.8) и (2.9).

2.4.3 Выбор уставок для чувствительного органа дифференциальной защиты

2.4.3.1 При опробовании секции или шины в минимальном режиме (от одного питающего присоединения) токи КЗ на шине снижаются. Для обеспечения необходимой чувствительности защиты в этом случае алгоритм, предусмотренный в БМРЗ, вводит в работу комплект «чувствительного» пускового и избирательного органов, аналогичный основному комплекту, имеющий меньшие уставки срабатывания (иначе - работающий по более чувствительным уставкам).

2.4.3.2 В алгоритме предусмотрено автоматическое введение в работу комплекта «чувствительных» органов при срабатывании основного комплекта на отключение. Такая особенность алгоритма обеспечивает «удержание» защиты в сработавшем состоянии при отключении мощных питающих присоединений и снижении тока КЗ.

2.4.3.3 «Чувствительные» уставки, используемые при опробовании шин, отстраивают от тока небаланса ДЗТ неотключаемых присоединений нагрузки.

Отстройку выполняют с учетом тока самозапуска двигателей, броска тока намагничивания силовых трансформаторов, токов качаний или асинхронного хода, которые могут возникнуть между присоединениями системы (секции) шин.

Ток срабатывания $I_{дзт\ нач.ч}$ по условиям отстройки от неотключаемых присоединений определяют по формуле (2.13)

$$I_{дзт\ нач.ч} = k_n \cdot \varepsilon_{ном} \cdot (k_{сзп} \cdot I_{расч.1} + k_{бтн} \cdot I_{расч.2} + I_{расч.3} + \dots), \quad (2.13)$$

где $k_n = 1,5$ – коэффициент запаса;

$\varepsilon_{ном} = 0,1$ – полная погрешность ТТ, установленного на присоединении питания шин;

$k_{сзп}$ – коэффициент самозапуска, учитывающий увеличение тока при самозапуске заторможенных двигателей. Значение коэффициента выбирают в диапазоне от 1,5 до 3 в зависимости от номинального пускового тока подключенных электродвигателей;

$I_{расч.1}$ – расчетное значение рабочего тока неотключаемого присоединения, содержащего двигательную нагрузку с самозапуском заторможенных двигателей, А;

$k_{бтн} = 5$ – коэффициент броска тока намагничивания;

$I_{расч.2}$ – расчетное значение рабочего тока неотключаемого присоединения, содержащего силовые трансформаторы, А;

$I_{расч.3}$ – расчетное значение рабочего тока неотключаемого присоединения, не содержащего силовых трансформаторов и двигательной нагрузки с самозапуском, А.

Ток срабатывания $I_{дзт\ нач.ч}$ по условиям отстройки от токов качаний или асинхронного хода определяют по формуле (2.14)

$$I_{дзт\ нач.ч} = k_n \cdot \varepsilon_{ном} \cdot I_{кач.}, \quad (2.14)$$

где $I_{кач.}$ – ток качаний или асинхронного хода, А.

В качестве уставки $I_{дзт\ нач.ч}$ выбирают большее из значений, вычисленных по формулам (2.13) и (2.14).

2.4.3.4 Коэффициент торможения для чувствительных органов $k_{торм.ч} = k_{торм.}$

2.4.3.5 Ток начала торможения «чувствительных» органов $I_{нт\ ч.} = I_{нт.}$

2.4.4 Выбор уставок для зоны дополнительного торможения

2.4.4.1 В составе пускового органа ДЗТ реализовано дополнительное торможение защиты при внешнем КЗ, сопровождающемся насыщением трансформаторов тока. Дополнительное торможение вводится при превышении током торможения заданной уставки насыщения $I_{нас.}$ (зона дополнительного торможения показана на рисунке 2.3) и действует на задержку срабатывания ДЗТ на время $t_{торм.}$

2.4.4.2 Ток срабатывания зоны дополнительного торможения с учетом условия отстройки от максимального нагрузочного режима по формуле (2.15)

$$I_{\text{нас. пред}} = k_{\text{отс.}} \cdot I_{\text{нагр. макс.}}, \quad (2.15)$$

где $k_{\text{отс.}} = 1,5$ – коэффициент отстройки;

$I_{\text{нагр. макс.}}$ – максимальный ток нагрузки, А.

Коэффициент торможения зоны безусловного срабатывания ДЗТ всегда принимается равным 1,8.

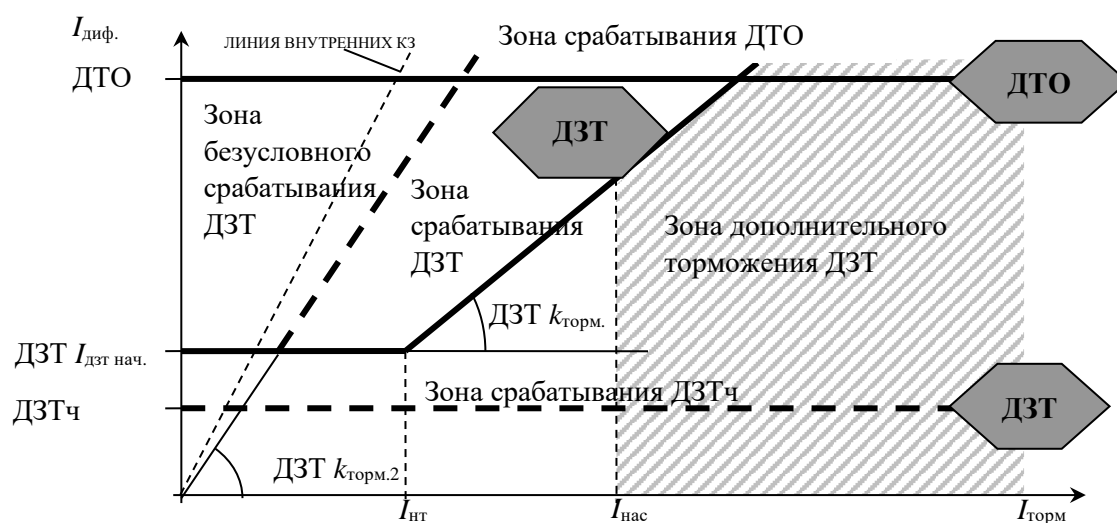


Рисунок 2.3 - Характеристики ДТО и ДЗТ

2.4.4.3 Длительность дополнительного торможения принимается равной времени затухания апериодической составляющей по формуле (2.16)

$$t_{\text{торм.}} = 3 \cdot T_a, \quad (2.16)$$

где T_a – постоянная времени сети, с.

2.4.4.4 Коэффициент торможения зоны безусловного срабатывания принимают равным $k_{\text{торм.2}} = 1,8$.

2.4.4.5 Длительность дополнительного торможения принимают равной времени затухания апериодической составляющей в сети по формуле (2.17)

$$t_{\text{торм.}} = 3 \cdot T_c, \quad (2.17)$$

где T_c - постоянная времени сети, с.

2.4.4.6 Поверка чувствительности «чувствительного» органа дифференциальной защиты шин производят аналогично методике, приведенной, в п. 2.4.5, если расчетное значение коэффициента чувствительности не соответствует требованиям [3], необходимо принять меры, способствующие уменьшению уставки $I_{дзт\ нач.ч.}$.

2.4.5 Проверка чувствительности ДЗТ

2.4.5.1 Коэффициент чувствительности ДЗТ рассчитывают по формуле

$$k_{\text{чув.норм.}} = \frac{I_{\text{кз мин.}}}{I_{\text{дзт нач.}}}, \quad (2.18)$$

где $I_{\text{кз мин.}}$ – периодическая составляющая тока металлического КЗ (в начальный момент времени КЗ) в минимальном режиме работы, А.

Расчетное значение коэффициента чувствительности должно соответствовать требованиям быть около 2 [3]. Для режима опробования ошиновки (шин) значение коэффициента чувствительности может быть около 1,5.

2.4.5.2 Если расчетное значение коэффициента чувствительности не соответствует требованиям [3], необходимо принять меры, способствующие уменьшению уставки $I_{\text{дзт нач.}} (I_{\text{дзт нач.ч.}})$.

2.4.5.3 Пример выбора уставок дифференциальной защиты ошиновки с торможением рассмотрен в Приложении Б.

2.5 Блокирование защиты при броске тока намагничивания силового трансформатора

2.5.1 Принцип действия

2.5.1.1 При опробовании по схеме с «открытым плечом» присоединения, содержащего силовой трансформатор (автотрансформатор), в присоединении появляется ток, значение которого из-за насыщения магнитопровода трансформатора может быть соизмеримо с токами внутренних КЗ.

2.5.1.2 Отстройку ДТО от БТН в режиме опробования обеспечивают выбором соответствующей уставки по току срабатывания (см. п. 2.3.2.3).

2.5.1.3 Отстройку ДЗТ от БТН в режиме опробования обеспечивают с помощью алгоритма ИПБ.

Алгоритм ИПБ выявляет режим БТН и блокирует работу ДЗТ, тем самым исключая ложное срабатывание ДЗТ при включении трансформатора (автотрансформатора). Такой вариант отстройки позволяет не увеличивать начальный ток срабатывания и коэффициент торможения, сохранив требуемый коэффициент чувствительности защиты.

Алгоритм ИПБ блокирует ДЗТ только при выполнении опробования присоединения с «открытым плечом» и не влияет на работу ДТО.

2.5.1.4 Количественным признаком БТН является наличие второй гармоники в дифференциальном токе. Известно [7], что в периодическом БТН доля второй гармонической составляющей около 15 %. В аperiodическом БТН доля второй гармонической составляющей намного больше и составляет до 40 %.

2.5.1.5 В БМРЗ ДЗШ и ДЗО вычисление параметра ИПБ $k_{ибп}$, на основе которого работает алгоритм ИПБ, происходит по формуле (2.19)

$$k_{ибп} = \frac{|I_{(100)диф}|}{|I_{(50)диф}|}, \quad (2.19)$$

где $I_{(100)диф}$ – действующее значение второй гармоники в дифференциальном токе, А;

$I_{(50)диф}$ – действующее значение первой гармоники в дифференциальном токе, А.

2.5.1.6 Блокирование ДЗТ по соответствующей фазе происходит при превышении расчетным параметром $k_{ибп}$ заданной уставки.

2.5.1.7 Для исключения излишнего блокирования ДЗТ применяют ограничение времени действия алгоритма ИПБ.

Максимально допустимое время действия алгоритма ИПБ задают уставкой $t_{ибп макс}$. По истечении заданного времени с момента возникновения БТН блокирование ДЗТ прекращается.

2.5.1.8 Для повышения эффективности блокирования ДЗТ при возникновении периодических БТН применяют перекрестное блокирование.

Перекрестное блокирование действует на все три фазных органа ДЗТ при срабатывании алгоритма ИПБ хотя бы в одном из них.

2.5.1.9 Для исключения излишнего блокирования ДЗТ режим перекрестного блокирования вводится временно с момента срабатывания алгоритма ИПБ и действует до истечения времени, заданного уставкой $t_{пб ибп}$. По завершении заданного времени блокирование действует только пофазно.

2.5.2 Выбор уставок

2.5.2.1 Уставку срабатывания ИПБ $k_{ибп}$ выбирают по условию срабатывания ИПБ при включении силового трансформатора на холостой ход и возникновении периодического БТН, используя формулу (2.20)

$$k_{ибп} = \frac{0,15 \cdot (1 + k_{гарм.})}{k_{отс}}, \quad (2.20)$$

где $k_{\text{гарм.}} = 0,2 \div 0,65$ – коэффициент гармонических искажений дифференциального тока;

$k_{\text{отс}} = 1,1 \div 1,5$ – коэффициент отстройки.

Для силовых трансформаторов, группа соединения обмоток которых отличается от «0» или «6», необходимо выбирать минимальное значение коэффициента отстройки $k_{\text{отс}}$ в связи с высокой вероятностью возникновения периодических БТН.

Значение уставки $k_{\text{ибп}}$ рекомендуется уточнить по опыту эксплуатации с учётом специфических свойств конкретного объекта.

2.5.2.2 Уставку $t_{\text{ибп макс}}$ определяют по формуле (2.21)

$$t_{\text{ибп макс.}} = k_{\text{отс.}} \cdot \tau \cdot \ln \left(\frac{k_{\text{бтн}} \cdot I_{\text{ном.}}}{I_{\text{дзт нач.}}} \right), \quad (2.21)$$

где $k_{\text{отс.}} = 1,15 \div 1,3$ – коэффициент отстройки;

τ – постоянная затухания БТН, с;

$k_{\text{бтн}} = 5$ – коэффициент БТН;

$I_{\text{ном.}}$ – номинальный ток силового трансформатора, А;

$I_{\text{дзт нач.}}$ – начальный ток срабатывания ДЗТ, А.

Значение $t_{\text{ибп макс.}}$ рекомендуется уточнить по опыту эксплуатации с учётом специфических свойств конкретного объекта.

2.5.2.3 В соответствии с рекомендациями, приведенными в [12], постоянную затухания БТН определяют по одной из двух формул, приведенных ниже.

Если трансформатор (автотрансформатор) включают со стороны обмотки, соединенной в звезду, то используют формулу (2.22)

$$\tau = \frac{x_c + x_B}{\omega \cdot (r_c + r_T)}. \quad (2.22)$$

При включении со стороны обмотки, соединенной в треугольник, применяют формулу (2.23)

$$\tau = \frac{3 \cdot x_c + x_B}{\omega \cdot (3 \cdot r_c + r_T)}, \quad (2.23)$$

где x_c – реактивное сопротивление питающей сети, Ом;

x_B – реактивное сопротивление первичной обмотки насыщенного трансформатора, принимаемое равным реактивному сопротивлению обмотки, при замене стали воздухом (в (2.23) – для обмотки одного стержня), Ом;

ω – угловая частота сети, рад/с, ($\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_c$, где $f_c = 50$ Гц – частота сети);

r_c – активное сопротивление питающей сети, Ом (при отсутствии данных допустимо принять $r_c = 0,1 \cdot x_c$);

r_T – активное сопротивление обмотки, на которую подаётся напряжение при включении (в (2.23) – для обмотки одного стержня), Ом.

Реактивное сопротивление обмотки насыщенного трансформатора x_B определяют по формуле (2.24)

$$x_B = x_{*T}^{(1)} \cdot \frac{U_{\text{тр.вн. ном.}}^2}{S_{\text{ном.тр}}} \quad (2.24)$$

где $x_{*T}^{(1)}$ – сопротивление трансформатора при однофазном включении, % [13]. При отсутствии данных о значении $x_{*T}^{(1)}$ для ориентировочных расчетов можно воспользоваться формулами из таблицы 2.1;

$U_{\text{тр.вн. ном.}}$ – номинальное напряжение стороны трансформатора (в данном случае стороны ВН), с которой производится включение, кВ;

$S_{\text{ном.тр}}$ – номинальная мощность трансформатора, МВ·А.

Активное сопротивление обмотки трансформатора r_T при отсутствии паспортных данных может быть определено по формуле (2.25)

$$r_T = \frac{\Delta P_{\text{кз}} \cdot U_{\text{тр.вн. ном.}}^2}{2 \cdot S_{\text{ном.тр}}^2} \cdot 10^{-3}, \quad (2.25)$$

где $\Delta P_{\text{кз}}$ – потери короткого замыкания в трансформаторе, кВт.

Значение сопротивления r_T рекомендуется уточнить, используя опытные данные о сопротивлении соответствующей обмотки постоянному току.

2.5.2.4 Для силовых трансформаторов (автотрансформаторов) с группой соединения обмоток «0» или «б» перекрестное блокирование необязательно, поэтому принимают $t_{\text{пб ипб}} = 0$.

Таблица 2.1 - Формулы для расчета $x_{*T}^{(1)}$

Элемент	Мощность, МВ·А	Формула для расчета $x_{*T}^{(1)}$, %
Трансформаторы 220 кВ	6,3 – 63,0	$\frac{12,7 + u_k}{1,35}$
	75 – 125	$\frac{21,4 + u_k}{1,35}$
Трансформаторы ¹⁾ 110 - 330 кВ	Любая, при $u_{k \text{ вн-сн}} > u_{k \text{ вн-нн}}$ ^{2), 3)}	$3,7 + u_k$
	Любая, при $u_{k \text{ вн-сн}} < u_{k \text{ вн-нн}}$ ⁴⁾	$\frac{13,9 + u_k}{1,38}$
Автотрансформаторы 220 кВ	32 - 63	$\frac{12,7 + u_k}{1,3}$
Автотрансформаторы 220 - 330 кВ	75; 120 - 180	$\frac{25,7 + u_k}{1,31}$
	200 - 240	$\frac{35 + u_k}{1,28}$
<p>¹⁾ Включены со стороны среднего напряжения.</p> <p>²⁾ Значение u_k дано в процентах для среднего положения РПН.</p> <p>Для трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов соответствует наибольшему из напряжений КЗ между обмоткой, со стороны которой производится включение, и одной из двух других обмоток.</p> <p>Для автотрансформаторов должно быть приведено к проходной мощности автотрансформатора.</p> <p>³⁾ С обмотками среднего напряжения, расположенными под обмотками высшего и низшего напряжения.</p> <p>⁴⁾ С обмотками среднего напряжения, расположенными между обмотками высшего и низшего напряжения.</p>		

2.5.2.5 Для силовых трансформаторов, группа соединения обмоток которых отличается от «0» или «б», принимают $t_{пб \text{ ипб}} = t_{пб \text{ макс.}}$.

2.5.2.6 Значение $t_{пб \text{ ипб}}$ рекомендуется уточнять по опыту эксплуатации с учётом специфических свойств конкретного объекта.

3 Дифференциальная токовая защита шин с торможением

3.1 Блоки БМРЗ для защиты шин

3.1.1 Для дифференциальной защиты шин используются БМРЗ-ДЗШ [14].

3.1.2 БМРЗ защищает от 6 до 16 присоединений, в этом случае необходимо устанавливать по одному БМРЗ на каждую защищаемую фазу шин.

При реализации дифференциальной защиты шин используются решения, ранее положительно себя зарекомендовавшие. В качестве измеряемых величин используются расчетные значения тока присоединений защищаемой секции шин.

В БМРЗ реализована возможность реализации «гибкой» логики, настройки и адаптации под различные первичные электрические схемы и различное электротехническое оборудование.

3.1.3 Особенностью БМРЗ является возможность фиксации присоединений за разными секциями шин, контроль фиксации и три пусковых органа для охвата всей системы шин (пусковой орган – ПО) и каждой секции в отдельности (избирательный орган – ИО).

3.2 Общие сведения о дифференциальной токовой защите шин

3.2.1 Дифференциальная токовая защита шин является защитой с абсолютной селективностью, основанной на непосредственном сравнении значений и фаз токов всех присоединений защищаемой ошиновки.

3.2.2 Выбор уставок дифференциальной защиты шин в общем случае выполняется аналогично представленной в главе 2 методике.

3.2.3 Для защиты шин дополнительно нужно учитывать следующее:

✓ характеристики срабатывания избирательных и пусковых органов выбирают аналогичными, а их уставки рассчитывают с использованием параметров всех присоединений, независимо от того, за какой секцией (первой или второй) шин они зафиксированы;

✓ при изменении рабочей схемы сборной системы шин необходимо выполнить расчет уставок, учитывающий другую фиксацию присоединений;

✓ для ступени сигнализации небаланса при обрыве вторичных цепей ТТ уставку срабатывания также рассчитывают независимо от фиксации присоединений за той или иной секцией шин.

3.3 Цифровое выравнивание токов «плеч»

3.3.1 В БМРЗ-ДЗШ [14, 15], предназначенных для защиты шин, предусмотрено цифровое выравнивание токов «плеч» защиты, что позволяет использовать ТТ присоединений с разными коэффициентами трансформации.

Выравнивание токов защит шин осуществляется с использованием коэффициентов трансформации каждого присоединения. Для перевода в относительные единицы используется номинальный ток ТТ.

Коэффициент цифрового выравнивания каждого присоединения $k_{цпв}$ определяют по формуле (3.1)

$$k_{цпв} = \frac{k_{тт \text{ прис.}}}{k_{тт \text{ баз.}}} \quad (3.1)$$

где $k_{тт \text{ прис.}}$ – коэффициент трансформации ТТ присоединения;

$k_{тт \text{ баз.}}$ – коэффициент трансформации ТТ базисного присоединения.

За базисное присоединение выбирают присоединение с наибольшим номинальным первичным током ТТ.

Для определения действующего значения дифференциального тока I_d в БМРЗ происходит суммирование токов всех «плеч» по формуле (3.2)

$$I_d = \frac{|\sum_{п} (k_{цпв} \cdot i_{п})|}{I_{ном}} \quad (3.2)$$

где $i_{п}$ – вектор вторичного фазного тока присоединения, А;

$I_{ном}$ – номинальный вторичный ток ТТ (БМРЗ-ДЗШ), номинальный вторичный ток стороны силового трансформатора (БМРЗ-ТД).

3.3.2 Действующее значение тока торможения I_T БМРЗ вычисляет, как полусумму действующих значений токов всех «плеч» по формуле (3.3)

$$I_T = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sum_{п} (k_{цпв} \cdot |i_{п}|)}{I_{ном}} \quad (3.3)$$

3.4 Дифференциальная токовая отсечка

3.4.1 Общие сведения о работе ДТО

3.4.1.1 ДТО предназначена для быстрого и селективного отключения КЗ со значительным дифференциальным током в зоне действия защиты. ДТО, как вспомогательный элемент дифференциальной защиты, рекомендуется всегда применять совместно с ДЗТ.

3.4.1.2 Срабатывание ДТО при превышении дифференциальным током заданной уставки происходит без выдержки времени, без торможения. Возврат ДТО происходит при снижении дифференциального тока ниже уставки срабатывания защиты (с учётом коэффициента возврата).

Для системы шин, состоящей из двух секций, соединенных секционным выключателем (СВ), или двух шин, соединенных шиносоединительным выключателем (ШСВ), в БМРЗ-ДЗШ для дифференциальной защиты шин предусмотрено три пусковых органа.

Зоны действия ПО I с.ш. и ПО II с.ш. (рисунок 3.1) охватывают секции шин (шины) по отдельности. Зона действия ПО (I с.ш. + II с.ш.) охватывает всю систему шин целиком.

3.4.1.3 При рабочей фиксации присоединений введены два пусковых органа ДТО с охватом соответствующих секций шин (шин), действующих на селективное отключение поврежденной секции шин (шины).

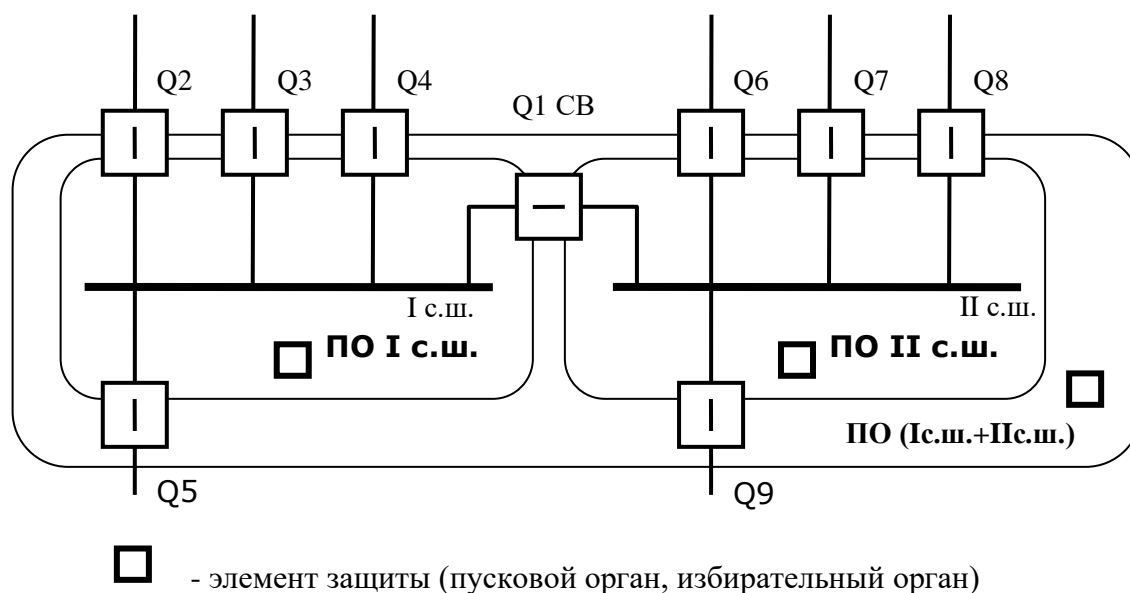


Рисунок 3.1 - Зоны действия пусковых органов ДТО

3.4.1.4 При нарушении рабочей фиксации присоединений, алгоритм, предусмотренный в БМРЗ, выводит селективные органы ДТО ПО I с.ш. и ПО II с.ш. из работы, вводит пусковой орган ДТО ПО (I с.ш. + II с.ш.), охватывающий всю систему шин и отключающий при КЗ всю систему шин. Нарушение рабочей фиксации алгоритм БМРЗ определяет по факту поступления сигнала на дискретный вход БМРЗ «Нарушение фиксации».

Эквивалентная схема действия пусковых органов ДТО приведена на рисунке 3.2.

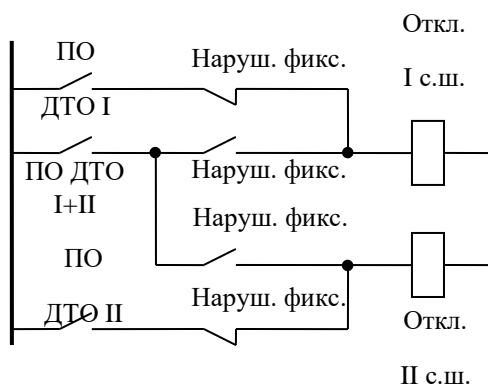


Рисунок 3.2 - Эквивалентная схема действия пусковых органов ДТО

3.4.2 Выбор уставок срабатывания ДТО

3.4.2.1 Выбор уставок дифференциальной токовой отсечки шин производится аналогично рассмотренному ранее выбору уставок дифференциальной токовой отсечки ошиновки в п. 2.3.

3.6 Дифференциальная токовая защита с торможением

3.6.1 Общие сведения о работе ДЗТ

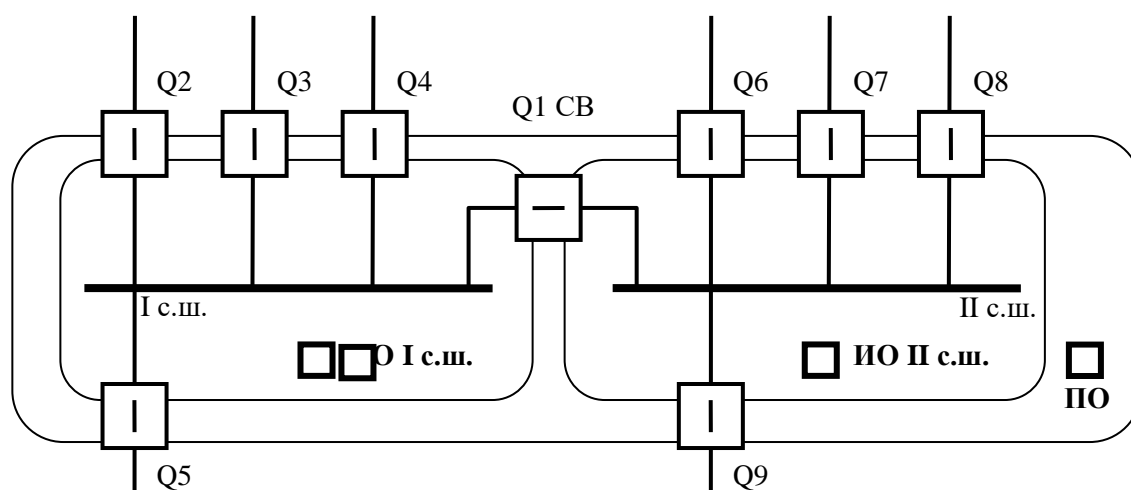
3.6.1.1 ДЗТ предназначена для быстрого и селективного отключения всех видов КЗ в зоне действия защиты.

3.6.1.2 Высокую чувствительность ДЗТ обеспечивает применение торможения защиты при возрастании сквозного тока, протекающего через защищаемый объект. Торможение учитывает увеличение погрешности ТТ (в том числе более 10 %) при возрастании проходящего через него тока [8].

3.6.1.3 ДЗТ системы сборных шин выполнена с использованием пускового органа ПО, зона действия которого охватывает всю систему шин, и двух избирательных органов - ИО I с.ш. и ИО II с.ш. - охватывающих секции шин (шины) по отдельности (рисунок 3.3).

Для пускового и избирательных органов могут быть заданы собственные характеристики срабатывания.

3.6.1.4 При сохранении рабочей фиксации присоединений пусковой и избирательные органы ДЗТ введены. При срабатывании пускового и одного из избирательных органов алгоритм защиты осуществляет селективное отключение секций шин (шин).



□ - элемент защиты (пусковой орган, избирательный орган)

Рисунок 3.3 - Зоны действия пусковых и избирательных органов ДЗТ

3.6.1.5 При нарушении рабочей фиксации присоединений алгоритм, предусмотренный в БМРЗ, выводит (шунтирует) избирательные органы ИО ДЗТ, пусковой орган ПО ДЗТ обеспечивает отключение всей системы шин при КЗ (рисунок 3.4).

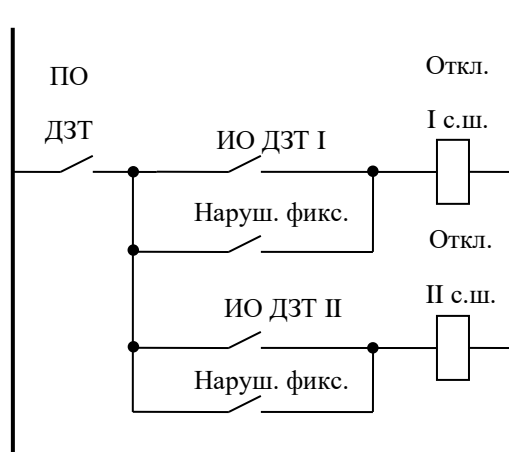


Рисунок 3.4 - Эквивалентная схема действия пусковых и избирательных органов ДЗТ

3.6.1.6 Минимальный ток срабатывания избирательных органов отстраивают от тока небаланса, возникающего при обрыве вторичных цепей ТТ.

3.6.1.7 Отдельная ступень защиты при обрыве вторичных цепей ТТ действует на сигнализацию с выдержкой времени и может блокировать избирательные органы ДЗТ.

3.6.2 Выбор уставок срабатывания ДЗТ

3.6.2.1 Выбор уставок дифференциальной защиты шин с торможением производится аналогично рассмотренному ранее выбору уставок дифференциальной защиты ошиновки с торможением в п. 2.4.

3.7 Отключение выключателей по сигналу УРОВ от внешних устройств

3.7.1 Алгоритм УРОВ предназначен для отключения КЗ, сопровождающихся отказом выключателей или защит участка, на котором выявлено КЗ.

Для сборных шин алгоритм УРОВ должен действовать в соответствии с рекомендациями, приведенными в [16] – отключать данную систему (секцию) шин при КЗ на отходящем присоединении либо на соседней системе (секции) шин, сопровождающимся отказом соответствующего выключателя на отключение.

Так, например, при отказе выключателя $Q5$ (рисунок 3.5) происходит отключение по сигналу УРОВ всех остальных выключателей первой секции шин - $Q1$ СВ, $Q2$, $Q3$, $Q4$.

3.7.2 Пуск алгоритма УРОВ происходит от защит присоединений. Алгоритм УРОВ входит в состав автоматики управления выключателем присоединения и при срабатывании формирует сигнал на вход приемника УРОВ («УРОВп») защиты шин.

В БМРЗ, обеспечивающих защиту шин, предусмотрены входы «УРОВп 1» и «УРОВп 2» для соответствующих секций (шин), что обеспечивает действие УРОВ на отключение соответствующей секции (шины) при сохранении рабочей фиксации присоединений.

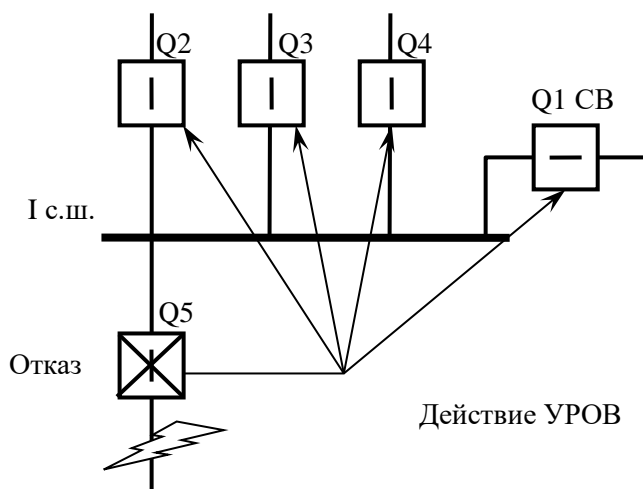


Рисунок 3.5 - Принцип работы УРОВ при КЗ на присоединении

Поступление сигнала «УРОВп 1» или «УРОВп 2» при нарушенной рабочей фиксации присоединений приводит к формированию сигналов на отключение всей системы шин (см. рисунок 3.6).

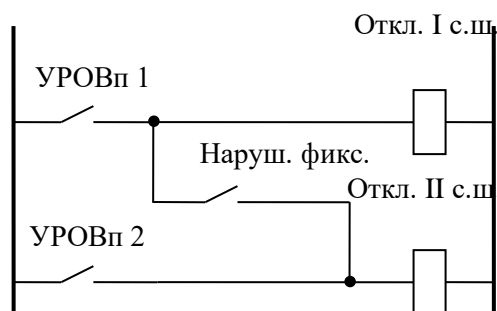


Рисунок 3.6 - Эквивалентная схема действия приемника УРОВ на отключение секций шин

3.7.3 Нарушение рабочей фиксации алгоритм БМРЗ определяет по факту поступления сигнала на дискретный вход «нарушение фиксации».

3.8 Отключение КЗ в «мертвой» зоне между ТТ и СВ/ШСВ

3.8.1 Принцип действия

3.8.1.1 При использовании выносных ТТ (см. ТТ1 на рисунке 3.7) на присоединении секционного или шиносоединительного выключателя КЗ в зоне между ТТ и выключателем (так называемой «мертвой» зоне) не может быть селективно отключено без выдержки времени.

Это связано с тем, что без отключения СВ невозможно определить на какой из секций шин возникло КЗ, как при использовании одного ТТ на СВ, так и при использовании двух ТТ.

3.8.1.2 При выполнении схемы с одним ТТ, ДЗШ сначала излишне отключает неповрежденную секцию (шину), затем, при продолжении КЗ, распознаваемого по току, протекающему через ТТ1, отключает поврежденную секцию (шину) с выдержкой времени.

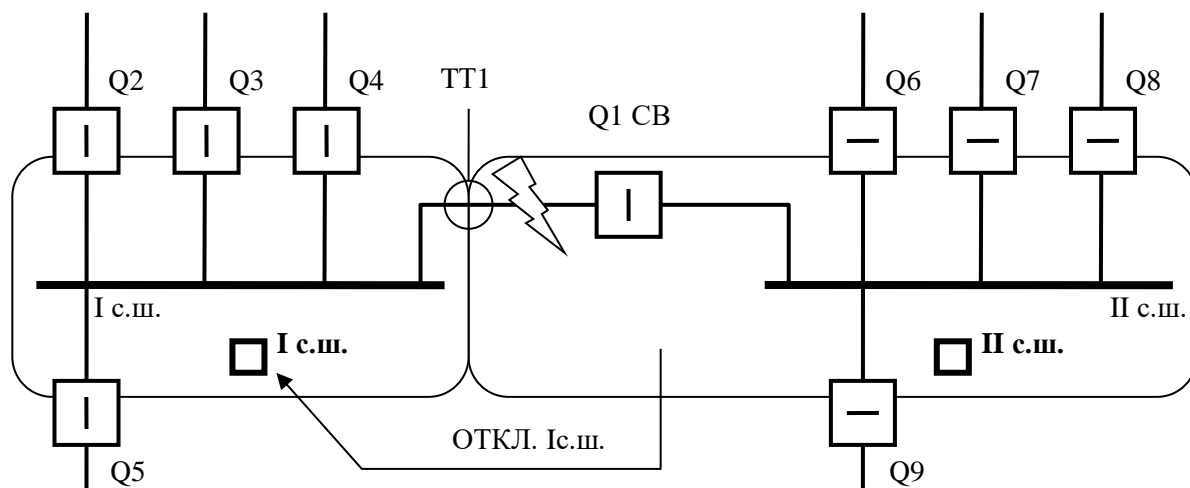


Рисунок 3.7 – Схема неселективного отключения КЗ в зоне между ТТ и СВ при использовании одного ТТ

3.8.1.3 Сохранение селективности действия защиты возможно только при условии предварительного отключения СВ и введении задержки действия ДЗШ на отключение остальных присоединений.

3.8.1.4 При этом «плечо» секционного выключателя дифференциальной защиты должно «открываться» после отключения СВ, что приводит к изменению зоны охвата избирательного органа (см. стрелку серого цвета на рисунке 3.8) и обеспечивает селективное отключение КЗ (более подробно описано в п. 3.9.2).

3.8.1.5 Для сохранения селективности задержка действия ДЗШ должна осуществляться при любом КЗ.

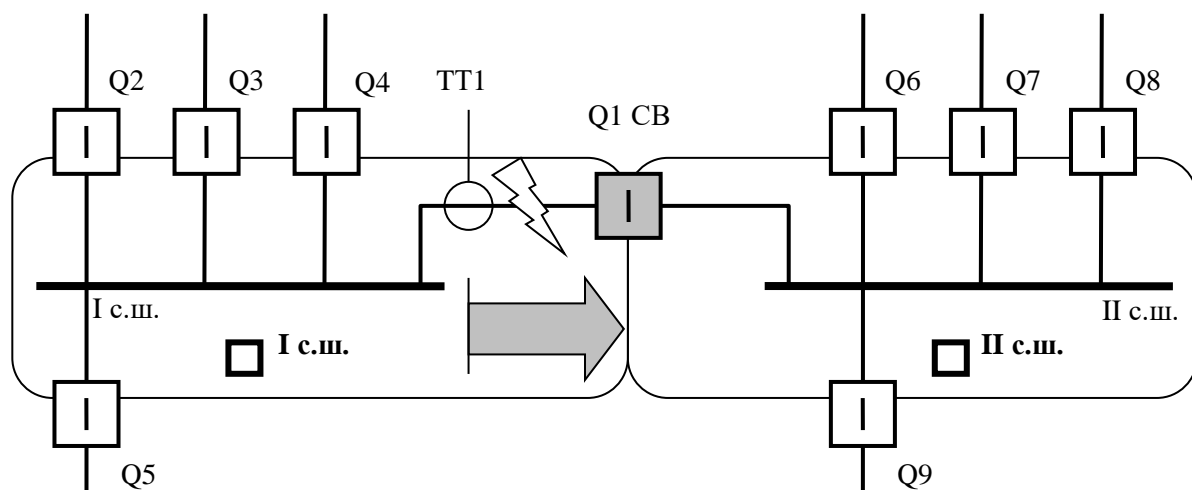


Рисунок 3.8 – Схема селективного отключения КЗ в зоне между ТТ и СВ с выдержкой времени при использовании одного ТТ

3.8.1.6 При выполнении схемы с двумя ТТ (см. ТТ1 и ТТ2 на рисунке 3.9), КЗ в этой же точке приводит к срабатыванию обоих избирательных органов и неселективному отключению обеих секций (шин) без выдержки времени.

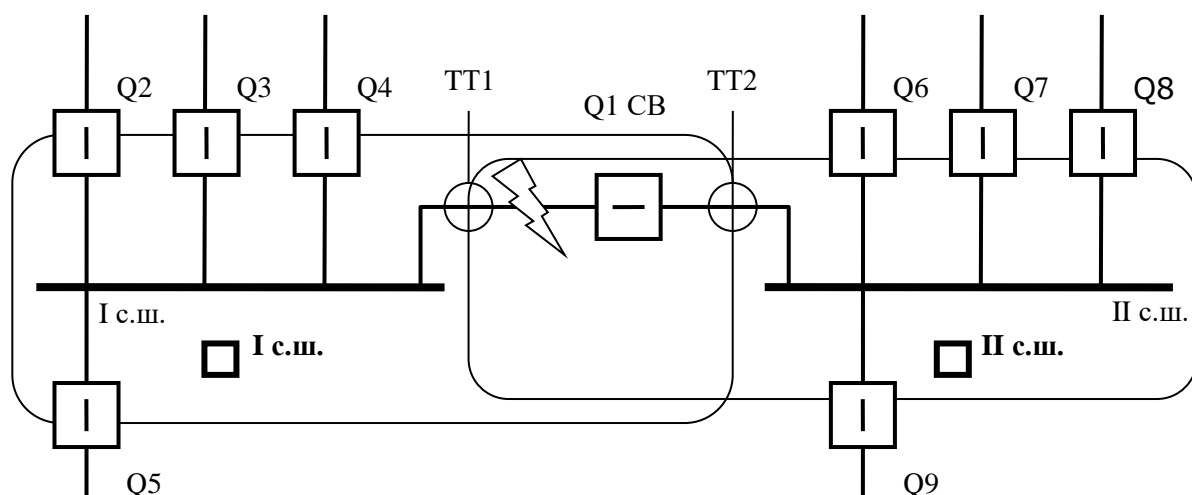


Рисунок 3.9 – Схема неселективного отключения КЗ в зоне между ТТ и СВ при использовании двух ТТ

3.8.1.7 Сохранение селективности действия защиты возможно только при условии предварительного отключения секционного выключателя СВ и введении задержки действия ДЗШ на отключение остальных присоединений. При этом «плечи» секционного выключателя дифференциальной защиты должны «открываться» после отключения СВ (как описано в п. 3.9.2), что приводит к изменению зон охвата избирательных органов (см. стрелки серого цвета на рисунке 3.10), обеспечивая тем самым возврат избирательного органа неповрежденной секции (шины) и селективное отключение КЗ.

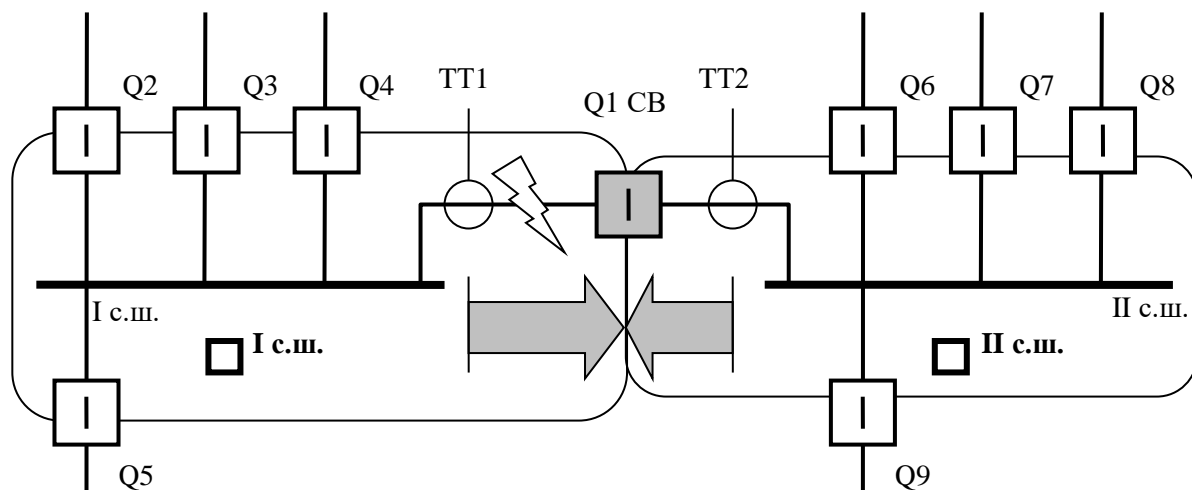


Рисунок 3.10 – Схема селективного отключения КЗ в зоне между ТТ и СВ с выдержкой времени при использовании двух ТТ

3.8.1.8 Задержка действия ДЗШ для сохранения селективности вводится автоматически только при возникновении рассматриваемых случаев КЗ, распознаваемых по факту срабатывания избирательных органов обеих секций (шин).

Максимальное полное время действия защиты с предварительным отключением секционного выключателя (см. рисунки 3.8, 3.10), учитывающее время срабатывания защиты, отключения выключателя и возврата пускового органа неповрежденной секции, должно удовлетворять основным требованиям по времени отключения повреждений, включая требование минимизации области и степени повреждения элемента энергосистемы (ЭС).

Если данное требование не может быть удовлетворено, целесообразно предусмотреть неселективное отключение при КЗ в зоне между ТТ и СВ, учитывая редкость случаев КЗ в «мертвой» зоне.

3.8.1.9 В БМРЗ, в зависимости от исполнения, могут быть реализованы различные варианты отключения КЗ в зоне между ТТ и СВ/ШСВ в соответствии со схемами, приведенными на рисунках 3.7, 3.8, 3.9, 3.10.

3.8.2 Выбор уставок

3.8.2.1 Время срабатывания защиты $t_{рез.↔ СВ}$, необходимое для обеспечения селективности при КЗ в «мертвой» зоне СВ/ШСВ, при работе в соответствии с рисунком 3.7, отстраивают от максимального времени отключения СВ $t_{СВ}$ по формуле (3.4)

$$t_{рез.↔ СВ} = t_{СВ} + t_{пром.реле} + t_{возвр.} + t_{зап.}, \quad (3.4)$$

где $t_{пром.реле}$ – время действия промежуточных реле, с;

$t_{возвр.} = 0,03$ с – время возврата защиты;

$t_{зап.} = 0,01 \div 0,03$ с - время, учитывающее возможные дополнительные задержки.

Суммарное время, состоящее из выдержки $t_{рез.↔ СВ}$ и времени отключения выключателей присоединений (с учетом промежуточных реле), должно удовлетворять основным требованиям по времени отключения КЗ.

3.8.2.2 Уставку срабатывания $I_{мин}$ реле минимального тока необходимо выбирать по возможности минимальной.

Рекомендуемое значение уставки составляет 5 – 10 % от номинального тока ТТ присоединения.

В некоторых случаях минимальное значение уставки может быть ограничено по условиям отстройки от максимального емкостного тока, от токов через емкостные делители и т.д.

3.8.2.3 Выдержку времени $t_{\text{св откл}}$ отключения, при предварительном делении системы шин путем отключения СВ/ШСВ в соответствии с рисунками 3.8, 3.10 определяют аналогично выдержке времени $t_{\text{рез.з} \rightarrow \text{св}}$.

Суммарное время, состоящее из выдержки $t_{\text{св откл}}$ и времени отключения выключателей присоединений (с учетом времени действия промежуточных реле), должно удовлетворять основным требованиям по времени отключения КЗ.

3.9 Опробование шин и присоединений

3.9.1 В БМРЗ-ДЗШ предусмотрено выполнение опробования шин от присоединений.

Опробование секции шин путем подачи напряжения от присоединения или соседней секции осуществляется при постановке секции (шины) под напряжение, в том числе и при выполнении автоматического повторного включения (АПВ).

При наличии повреждения на опробуемой секции (шине), БМРЗ обеспечивает селективное отключение только опробуемой секции (шины) без выдержки времени.

Поскольку при выполнении опробования ток КЗ может быть меньше расчетного, опробование может выполняться с применением для опробуемой секции (шины) отдельной группы «чувствительных» пусковых органов.

При опробовании присоединения по схеме «закрытого плеча» путем подачи напряжения на присоединение от шины или секции шин дополнительно может вводиться выдержка времени действия защиты шин на отключение, что исключает излишнее отключение системы шин.

При наличии повреждения на опробуемом присоединении, отключение присоединения осуществляется защитой присоединения при минимальной выдержке времени.

3.9.2 При опробовании присоединения по схеме «открытого плеча» путем подачи напряжения на присоединение от шины или секции шин, зона действия защиты расширяется на всё опробуемое присоединение (рисунок 3.11), а ток, протекающий через опробуемое присоединение, вызывает увеличение дифференциального тока в защите.

При срабатывании защиты БМРЗ отключает только выключатель опробуемого присоединения.

При опробовании присоединений по схеме «открытого плеча» нагрузка на другом конце присоединения должна быть отключена.

3.9.3 Для ликвидации КЗ на шинах, которые могут возникнуть во время проведения опробования, время действия режима опробования присоединения по схеме «открытого плеча» ограничивается. В случае поступления сигнала «УРОВ» от присоединений, режим опробования снимается без выдержки времени.

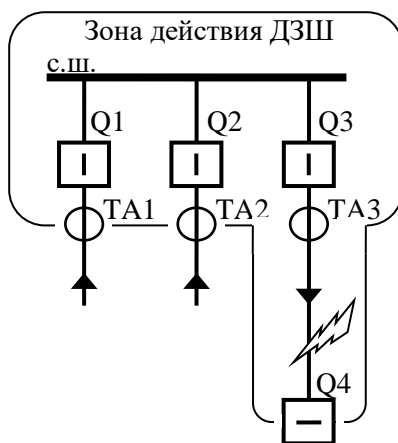


Рисунок 3.11 – Расширения зоны защиты при опробовании присоединения по схеме «открытого плеча»

При опробовании присоединений шин по схеме с «открытым плечом», алгоритм ДТО обеспечивает отключение присоединений при КЗ с током большой кратности.

При использовании данной схемы ток опробуемого присоединения исключается из расчёта. Дифференциальный ток будет примерно равен току опробуемого присоединения.

В связи с этим, необходимо отстроить уставку тока срабатывания ДТО от значения БТН силового трансформатора присоединения, если он находится в опробуемой зоне.

Поэтому при выполнении опробования присоединения по схеме «с открытым плечом» может происходить снижение чувствительности ДТО.

При выполнении опробования присоединения от шин по схеме с «открытым плечом» ДЗТ остается в работе и обеспечивает отключение опробуемого присоединения.

3.9.4 При выявлении БТН силового трансформатора, находящегося в зоне опробования, происходит блокирование ДЗТ.

Максимальная длительность блокирования ДЗТ ограничена для исключения излишнего блокирования защиты.

Блокирование ДЗТ при бросках тока намагничивания вводится только для режима опробования присоединения по схеме с «открытым плечом». Возврат режима опробования происходит только при отсутствии блокирования.

3.9.5 Выбор режима опробования с «открытым плечом» или с «закрытым плечом», выбор опробуемого присоединения осуществляются оперативно, подачей дискретных сигналов на соответствующие дискретные входы БМРЗ.

3.10 Выбор остальных уставок

3.10.1 В БМРЗ-ДЗШ может использоваться ряд других уставок, обеспечивающих действие алгоритмов автоматики:

- $t_{\text{откл}}$ – время дополнительного удержания контактов выходного реле срабатывания защиты (отключения) в замкнутом состоянии после возврата защиты или иной причины отключения;

- $t_{\text{бл. апв}}$ – время дополнительного удержания сигнала блокирования АПВ с момента возврата выходного реле срабатывания защиты (отключения);

- $I_{\text{мин}}$ - уставка реле минимального тока.

Уставку $t_{\text{откл}}$ определяют по характеристикам реле в цепях отключения выключателя и времени отключения выключателя.

Рекомендуемое значение уставки $t_{\text{откл}}$ - не менее 0,1 с.

3.10.2 В случае, если УРОВ выключателя не предусматривает контроль тока присоединения, необходимо согласовать уставку $t_{\text{откл}}$ с уставкой по времени УРОВ.

3.10.3 Уставку $t_{\text{бл. апв}}$ выбирают с учетом особенностей автоматики управления выключателем.

3.10.4 Пример выбора уставок дифференциальной защиты шин с торможением рассмотрен в Приложении В.

3.10.5 Пример выбора уставок дифференциальной защиты шин с торможением и префиксацией рассмотрен в Приложении Г.

4 Неполная дифференциальная токовая защита шин с торможением

4.1 Общие сведения о неполной дифференциальной токовой защите шин

4.1.1 Неполная дифференциальная защита шин (НДЗШ) реализована в БМРЗ-ЗШД [17] является защитой с абсолютной селективностью, основанной на непосредственном сравнении значений и фаз токов трех генерирующих присоединений (вводной выключатель (ВВ) от энергосистемы, СВ, ввод от генераторов) с блокирующим сигналом от пусковых органов основных защит отходящих линий, которые не подключены к НДЗШ.

При реализации неполной дифференциальной защиты шин используются решения, ранее положительно себя зарекомендовавшие. В качестве измеряемых величин используются расчетные значения тока присоединений защищаемой секции шин.

В БМРЗ реализована возможность реализации «гибкой» логики, настройки и адаптации под различные первичные электрические схемы и различное электротехническое оборудование.

4.1.2 Для правильного функционирования защиты необходимо, чтобы ТТ присоединений были установлены за выключателями (рисунок 4.1). Зона действия защиты ограничивается местом установки ТТ присоединений, которые непосредственно подключены к НДЗШ, а также блокировкой при пуске основной защиты присоединений, которые не подключены к НДЗШ [18].

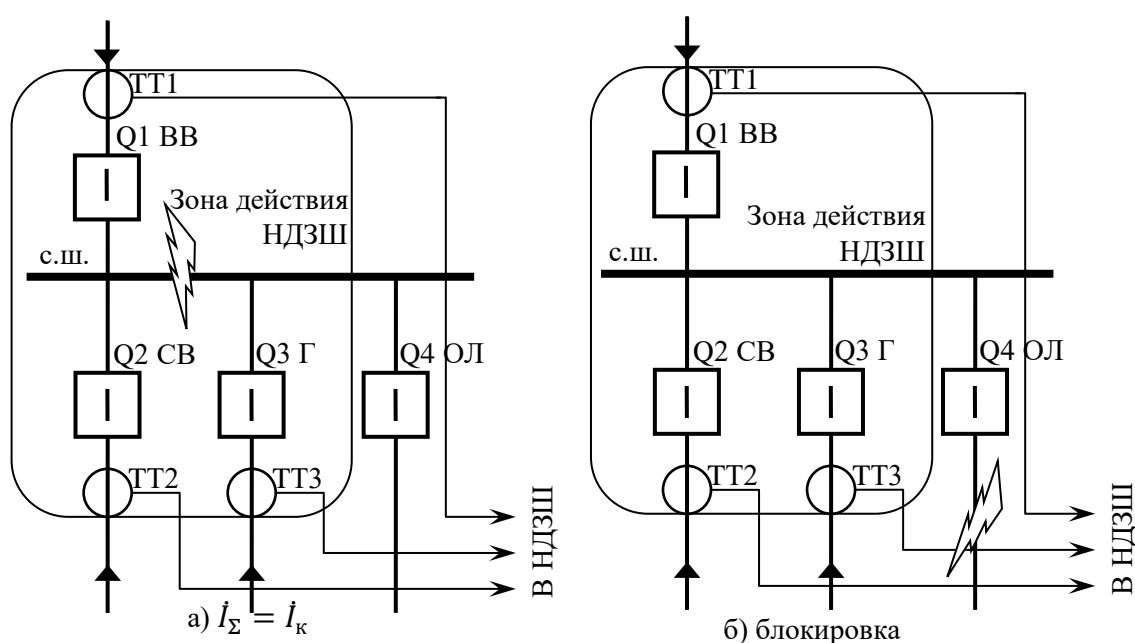


Рисунок 4.1 - Принцип действия неполной дифференциальной токовой защиты шин

При подключении БМРЗ к ТТ присоединений за положительное направление токов принимают их направление в сторону защищаемого объекта.

4.1.3 При возникновении КЗ в зоне действия защиты суммарный вторичный ток ТТ (называемый дифференциальным) будет равен току КЗ – $I_{\Sigma} = I_k$ (рисунок 4.1, а), если от БМРЗ основной защиты присоединения, неподключенного к НДЗШ, не придет сигнал блокировки, то защита сработает на отключение с выдержкой времени $t_{ндзш} = 0,15$ с.

При наличии сигнала блокировки по пуску основной защиты присоединения, не подключенного к НДЗШ, придет блокирующий сигнал, то защита не сработает (рисунок 4.1, б).

4.2 Выбор уставок защит для НДЗШ производится аналогично ранее рассмотренному в п. 2.4 и п. 3.2.

4.2.1 Пример выбора уставок НДЗШ рассмотрен в Приложении Д.

5 Дифференциальная защита токоограничивающего реактора с торможением

5.1 В БМРЗ-153-УЗТ [1] реализована функция дифференциальной защиты токоограничивающего реактора с торможением.

Дифференциальную токовую защиту применяют в качестве основной быстродействующей защитой от повреждений на выводах, а также от внутренних повреждений [3].

5.2 Дифференциальная токовая защита токоограничивающего реактора является защитой с абсолютной селективностью, основанной на непосредственном сравнении значений и фаз токов всех присоединений.

При реализации дифференциальной защиты токоограничивающего реактора используются решения, ранее положительно себя зарекомендовавшие. В качестве измеряемых величин используются расчетные значения тока сторон токоограничивающего реактора.

В БМРЗ реализована возможность реализации «гибкой» логики, настройки и адаптации под различные первичные электрические схемы и различное электротехническое оборудование.

Подключения всех ТТ должны обеспечивать подачу вторичных токов положительного направления на входы БМРЗ. За положительное направление токов сторон принято направление токов в сторону защищаемого объекта.

5.3 Зона действия защиты ограничивается местом установки ТТ присоединений.

5.4 Коэффициенты трансформации ТТ пользователь задаёт в виде уставок.

5.5 В БМРЗ в идеальном случае в нагрузочном режиме и в режиме внешнего КЗ дифференциальный ток отсутствует.

На практике в нагрузочном режиме и режиме внешнего КЗ возникает дифференциальный ток (ток небаланса), вызванный погрешностями ТТ, погрешностью выравнивания токов сторон.

Ток небаланса тем больше, чем больше значения токов сторон.

5.6 В БМРЗ дифференциальной защиты токоограничивающего реактора реализованы два вида дифференциальной токовой защиты: ДТО и ДЗТ.

Уставку срабатывания ДТО задают больше максимально возможного значения тока небаланса в режиме внешнего КЗ.

При этом, во многих случаях ДТО может не обеспечить требуемый [3] коэффициент чувствительности к КЗ.

Для обеспечения требуемого коэффициента чувствительности защиты используют ДЗТ [6].

5.7 Выбор уставок защит для дифференциальной защиты токоограничивающего реактора с торможением производится аналогично ранее рассмотренному в п. 1.

5.8 Пример выбора уставок дифференциальной защиты токоограничивающего реактора с торможением рассмотрен в Приложении Е.

6 Токовая защита нулевой последовательности с торможением

6.1 В БМРЗ-ТД [2] реализована дополнительная функция токовая защита нулевой последовательности с торможением (ТЗНПТ) от замыканий на землю, применение которой на стороне ВН (110 - 220 кВ) трансформатора, как правило, позволяет повысить чувствительность защиты при КЗ в обмотке ВН трансформатора на землю вблизи заземленной нейтрали.

Указанная функция может применяться для обмоток трансформатора, имеющих глухозаземленную нейтраль. В настоящих Указаниях, эта защита рассматривается применительно только к обмотке ВН трехобмоточного (двухобмоточного) трансформатора.

При реализации токовая защита нулевой последовательности с торможением используются решения, ранее положительно себя зарекомендовавшие. В качестве измеряемых величин используются расчетные значения тока стороны ВН трансформатора.

В БМРЗ реализована возможность реализации «гибкой» логики, настройки и адаптации под различные первичные электрические схемы и различное электротехническое оборудование.

6.2 Условием применения ТЗНПТ является наличие трансформатора тока, установленного в цепи заземления нейтрали и подключаемого к отдельному измерительному входу БМРЗ.

6.3 Защищаемая зона ограничивается ТТ в нейтрали и фазными ТТ на стороне ВН трансформатора.

6.4 При замыкании на землю в защищаемой зоне, в нейтрали будет протекать ток, ток нулевой последовательности, измеряемый как геометрическая сумма токов фаз ТТ на стороне ВН трансформатора, соединенных по схеме «звезда с нулем».

При КЗ на землю вне защищаемой зоны, в нейтрали будет протекать ток одинаковый с током $3I_0$ фазных ТТ на стороне ВН. Указанные токи будут находиться в противофазе.

В ТЗНПТ используется принцип направленного торможения. Характеристика срабатывания и возврата защиты представлена на рисунке 6.1.

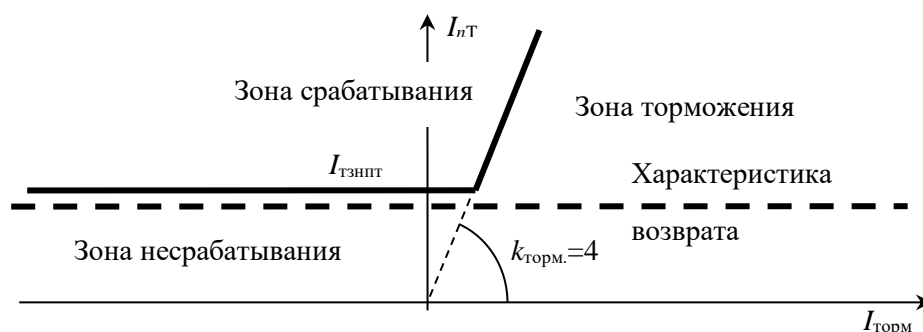


Рисунок 6.1 - Характеристика срабатывания и возврата ТЗНПТ

6.5 В ТЗНПТ применено торможение, которое принципиально отличаются от обычных способов торможения, рассмотренных ранее. В ТЗНПТ используется принцип направленного торможения. Значение тормозного тока определяется по формуле (6.1):

$$I_{\text{торм.}} = \left| \sum_k \dot{3}I_{0k} - I_{nT} \right| - \left| \sum_k \dot{3}I_{0k} + I_{nT} \right|, \quad (6.1)$$

где $\dot{3}I_{0k}$ – расчетный вектор тока нулевой последовательности стороны трансформатора (сторон автотрансформатора), соединенной с выводом нейтрали. Ток торможения положительный в случае внешних однофазных коротких замыканий и его значение составляет до двух значений тока, измеряемого в нейтрали, в зависимости от токораспределения и погрешности измерительных трансформаторов тока. При внутренних коротких замыканиях ток торможения отрицательный. Поэтому даже малое значение тока нулевой последовательности может привести к отключению, и наоборот, при внешних повреждениях имеет место сильное торможение.

Срабатывание защиты происходит в случае превышения действующим значением тока нейтрали заданной уставки и произведения тока торможения $I_{\text{торм.}}$ на коэффициент торможения $k_{\text{торм.}}$. Возврат защиты происходит при снижении тока нейтрали ниже уставки срабатывания с учетом коэффициента возврата, без учета зоны торможения.

6.6 Значение коэффициента торможения $k_{\text{торм.}} = 4$ в БМРЗ фиксировано, что обеспечивает достаточно эффективное торможение при значительных фазных погрешностях измерительных ТТ.

6.7 Уставка по току срабатывания ТЗНПТ определяется относительно номинального тока данной стороны трансформатора $I_{\text{ТЗНПТ}}/I_{\text{ном.тр.вн}}$, первоначально рекомендуется выбирать уставку срабатывания ТЗНПТ по току нейтрали применяя формулу (6.2)

$$I_{\text{ТЗНПТ}} = 0,15 \text{ о. е.} \quad (6.2)$$

В дальнейшем уставка может быть уточнена по опыту эксплуатации.

6.8 Проверка чувствительности ТЗНПТ производится при коротком замыкании на землю на стороне ВН трансформатора.

Коэффициент чувствительности ТЗНПТ определяется при металлическом КЗ на землю на выводах обмотки ВН защищаемого трансформатора при работе его в расчетном режиме, обуславливающим минимальный ток в нейтрали трансформатора (больше или равен 2) по формуле (6.3)

$$k_{\text{чув.}} = \frac{I_{\text{кз мин.}}}{I_{\text{тзпт}}}, \quad (6.3)$$

где $I_{\text{кз мин.}}$ - минимальное значение периодической составляющей тока в нейтрали трансформатора при коротком замыкании на землю в защищаемой зоне.

Расчетное значение коэффициента чувствительности должно быть больше или равно 2.

6.9 Для исключения срабатывания защиты при включении силового трансформатора из-за возникновения броска тока намагничивания в БМРЗ осуществляется блокирование защиты. Информационный признак блокирования рассчитывается как отношение действующего значения второй гармоники к действующему значению первой гармоники тока нейтрали.

Рекомендованная уставка блокировки ТЗНПТ при БТН по содержанию второй гармоники в дифференциальном токе 15 % от тока первой гармоники дифференциального тока «контура» принимается согласно формуле (6.4)

$$k_{\text{гармон.2}} = 0,15. \quad (6.4)$$

В дальнейшем уставка может быть уточнена по опыту эксплуатации.

6.10 Пример выбора уставок ТЗНПТ рассмотрен в Приложении Ж.

Приложение А

Пример выбора уставок для двухобмоточного трансформатора

А.1 Исходные данные

Схема распределительного устройства [19, 20], для защиты, которого будут выбраны уставки дифференциальной защиты трансформатора с торможением, для БМРЗ-ТД [2], приведена на рисунок А.1.

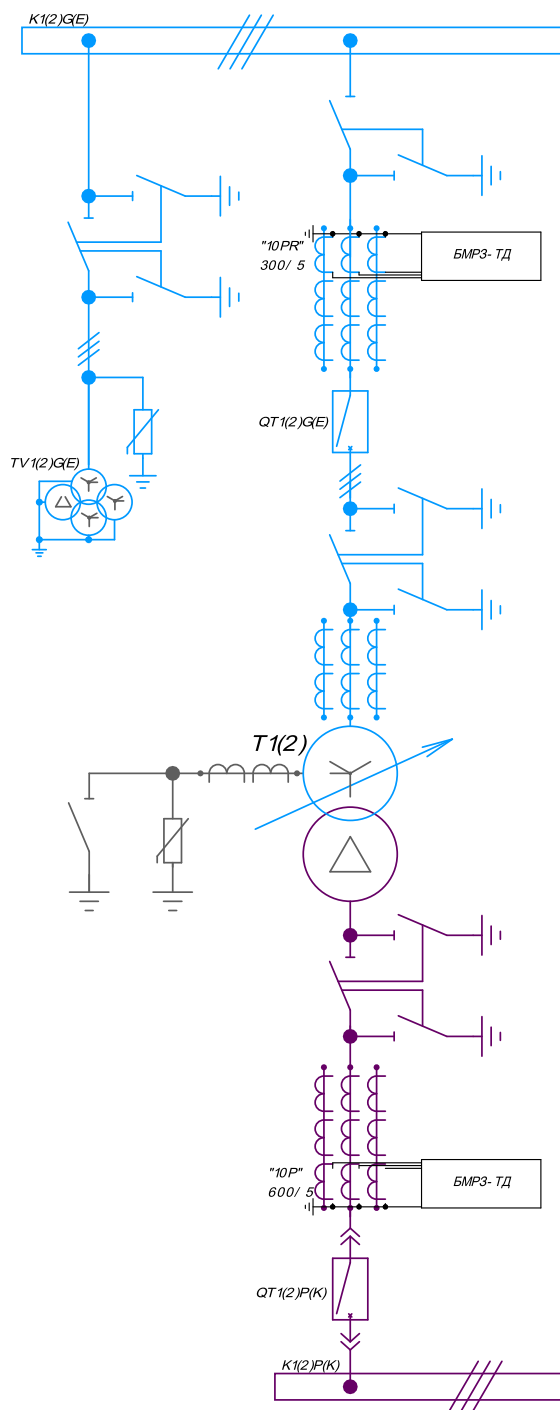


Рисунок А.1 - Схема распределительного устройства с распределением по обмоткам трансформаторов тока дифференциальной защиты трансформатора

Токи коротких замыканий, приведенные к шинам 110 кВ, к которым подключен понижающий трансформатор 110/10 кВ типа ТМН-6300/110:

- в нормальном режиме работы энергосистемы (максимальный ток КЗ) $I_{\text{КЗ макс.}}^{(3)} = 4,08$ кА;

- в минимальном режиме работы энергосистемы (минимальный ток КЗ) $I_{\text{КЗ мин.}}^{(3)} = 1,65$ кА.

Коэффициенты трансформации трансформаторов тока дифференциальной защиты с торможением:

- со стороны ВН

$$k_{\text{ТТ ВН}} = \frac{I_{\text{НОМ. ВН ТТ}}}{I_{\text{НОМ. ВН ТТ ВТ}}} = \frac{300}{5} = 60,$$

где $I_{\text{НОМ. ВН ТТ}} = 300$ А – номинальный первичный ток ТТ стороны ВН силового трансформатора;

$I_{\text{НОМ. ВН ТТ ВТ}} = 5$ А – номинальный вторичный ток ТТ;

- со стороны НН

$$k_{\text{ТТ НН}} = \frac{I_{\text{НОМ.НН ТТ}}}{I_{\text{НОМ.НН ТТ ВТ.}}} = \frac{600}{5} = 120,$$

где $I_{\text{НОМ.НН ТТ}} = 600$ А – номинальный первичный ток ТТ стороны НН силового трансформатора;

- $I_{\text{НОМ.НН ТТ ВТ.}} = 5$ А – номинальный вторичный ток ТТ.

Характеристики трансформатора согласно [21]:

- тип - ТМН-6300/110;

- схема и группа соединения обмоток - У_Н/Д – 11;

- $S_{\text{НОМ.тр.}} = 6,3$ МВ·А - номинальная мощность;

- $U_{\text{тр.ВН ном.}} = 115$ кВ - номинальное напряжение стороны ВН;

- $U_{\text{тр.НН ном.}} = 11$ кВ - номинальное напряжение стороны НН;

- $u_{\text{к ср.}} = 10,5$ % - напряжение короткого замыкания трансформатора,

соответствующее среднему положению РПН;

- $u_{\text{к рпн-}} = 10,58$ % - напряжение короткого замыкания трансформатора,

соответствующее крайнему положению РПН в «минус»;

- $u_{\text{к рпн+}} = 11,72$ % - напряжение короткого замыкания трансформатора,

соответствующее крайнему положению РПН в «плюс»;

- $n_{\text{рпн}} = 9$ - количество ступеней регулирования напряжения (± 9 ступеней

регулирования РПН);

- $\Delta U_{\text{рпн}} = 1,78$ % - шаг регулирования напряжения.

Номинальный ток трансформатора, со стороны ВН при среднем положении РПН

$$I_{\text{ном тр.вн}} = \frac{S_{\text{ном тр.}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{тр.вн ном.}}} = \frac{6,3 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 115 \cdot 10^3} = 31,6 \text{ А.}$$

Эквивалентное сопротивление энергосистемы в нормальном режиме работы (максимальный ток КЗ), приведенное к шинам 110 кВ (рисунок А.2)

$$z_{\text{с.макс.}} = \frac{U_{\text{норм.реж.}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{кз макс.}}^{(3)}} = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot 4,08} = 16,27 \text{ Ом,}$$

где $U_{\text{норм реж}} = 115$ кВ –напряжение предшествующего нормального режима работы энергосистемы [22], при отсутствии результатов расчетов нормального режима, допустимо принимать равным номинальным междуфазным напряжениям [23].

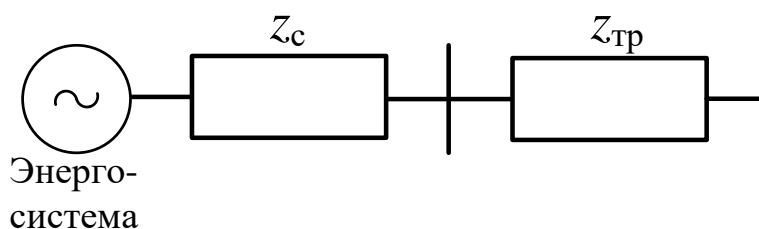


Рисунок А.2 - Схема замещения

Эквивалентное сопротивление энергосистемы в послеаварийном режиме (наложение аварии на ремонт) работы (минимальный ток КЗ), приведенное к шинам 110 кВ

$$z_{\text{с.мин.}} = \frac{U_{\text{авар.реж.}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{кз мин.}}^{(3)}} = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot 1,65} \approx 40,17 \text{ Ом,}$$

где $U_{\text{авар.реж.}} = 115$ кВ – напряжение предшествующего послеаварийного режима (наложение аварии на ремонт) работы энергосистемы [22], при отсутствии результатов расчетов нормального режима, допустимо принимать равным номинальному междуфазному напряжению [23].

Максимальное сопротивление трансформатора рассчитывается с учетом результатов расчета в послеаварийного режима (наложение аварии на ремонт) работы энергосистемы с учетом действительного коэффициента трансформации трансформатора, при отсутствии таких данных допустимо рассчитывать сопротивление с учетом максимального положения РПН (в «плюс»), не превышающего допустимое напряжение сети согласно [23]. Так как в [21] $u_{k \text{ ср}}$ приведено, только для трех положений РПН, необходимо пересчитать его используя линейную зависимость [24]

$$u_{k \text{ прив.}} = \frac{u_{k \text{ рпн+}} - u_{k \text{ ср.}}}{n_{\text{рпн}}} \cdot n_{\text{рпн макс.}} + u_{k \text{ ср.}} = \frac{11,72 - 10,5}{9} \cdot 6 + 10,5 = 11,31 \%,$$

где $n_{\text{рпн макс}} = 6$ – ближайшее большее положение РПН, по отношению к максимально допустимому напряжению, согласно ГОСТ 721-77.

Полное сопротивление трансформатора, при крайнем положении РПН «в плюс», с учетом требований

$$z_{\text{тр.макс.}} = \frac{u_{k \text{ прив.}} \cdot U_{\text{макс.}}^2}{100 \cdot S_{\text{ном.тр.}}} = \frac{11,31 \cdot (126 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 6,3 \cdot 10^6} \approx 285,1 \text{ Ом,}$$

где $U_{\text{макс}} = 126 \text{ кВ}$ – наибольшее рабочее напряжение электрооборудования допустимое в сети 110 кВ [23].

Минимальное напряжение стороны ВН трансформатора с учетом РПН

$$U_{\text{мин.}} = U_{\text{тр. вн ном.}} \cdot \left(1 - \frac{\Delta U_{\text{рпн}} \cdot n_{\text{рпн}}}{100}\right) = 115 \cdot \left(1 - \frac{1,78 \cdot 9}{100}\right) = 96,6 \text{ кВ.}$$

Полное сопротивление трансформатора, при крайнем положении РПН «в минус», [21]

$$z_{\text{тр.мин.}} = \frac{u_{k \text{ рпн-}} \cdot U_{\text{мин.}}^2}{100 \cdot S_{\text{ном.тр.}}} = \frac{10,58 \cdot (96,6 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 6,3 \cdot 10^6} = 156,7 \text{ Ом.}$$

Минимальный ток трехфазного КЗ за трансформатором, приведенный к стороне ВН трансформатора

$$I_{\text{кз тр.мин.}}^{(3)} = \frac{U_{\text{макс.}}}{\sqrt{3} \cdot (z_{\text{с.мин.}} + z_{\text{тр.макс.}})} = \frac{126 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot (40,17 + 285,1)} = 224 \text{ А.}$$

Минимальный ток двухфазного КЗ за трансформатором, приведенный к стороне ВН трансформатора

$$I_{\text{кз тр.мин.}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\text{кз тр.мин.}}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 224 = 193,7 \text{ А.}$$

Максимальный ток трехфазного КЗ за трансформатором, приведенный к стороне ВН трансформатора

$$I_{\text{кз тр.макс.}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot (z_{\text{с.макс.}} + z_{\text{тр.мин.}})} = \frac{110 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot (16,27 + 156,7)} = 367,2 \text{ А,}$$

где $U_{\text{ном}} = 110 \text{ кВ}$ – номинальное междуфазное напряжение сети в сети 110 кВ [23].

А.2 Выбор уставки дифференциальной токовой отсечки

Составляющие относительного расчетного тока небаланса, для дифференциальной токовой отсечки

$$\begin{aligned} I_{\text{нб расч.дто}} &= (k_{\text{пер.}} \cdot k_{\text{одн.}} \cdot \varepsilon_{\text{макс.}} + U_{\text{рег.1}} \cdot k_{\text{ток.1}} + \gamma) \cdot \frac{I_{\text{кз тр.макс.}}^{(3)}}{I_{\text{ном.тр.вн}}} = \\ &= (2,5 \cdot 1 \cdot 0,1 + 0,16 \cdot 1 + 0,05) \cdot \frac{367,2}{31,6} = 5,34 \text{ о. е.} \end{aligned}$$

Отстройка от расчётного максимального тока небаланса

$$I_{\text{дто}} = k_{\text{отс.}} \cdot I_{\text{нб расч.дто}} = 1,2 \cdot 5,34 = 6,41 \text{ о. е.}$$

Проверка дифференциальной токовой отсечки по чувствительности не требуется.

А.3 Выбор уставки дифференциальной защиты с торможением

Составляющие относительного расчетного тока небаланса, для дифференциальной защиты с торможением, начального тока

$$\begin{aligned} I_{\text{нб расч.дзт нач.}} &= 0,5 \cdot (k_{\text{пер.}} \cdot k_{\text{одн.}} \cdot \varepsilon_{0,5} + U_{\text{рег.1}} \cdot k_{\text{ток.1}} + \gamma) = \\ &= 0,5 \cdot (1 \cdot 1 \cdot 0,1 + 0,16 \cdot 1 + 0,05) = 0,16 \text{ о. е.} \end{aligned}$$

Уставка срабатывания для дифференциальной защиты с торможением

$$I_{\text{дзт нач.}} = k_{\text{отс.}} \cdot I_{\text{нб расч.дзт нач.}} = 1,5 \cdot 0,16 = 0,23 \text{ о. е.},$$

согласно рекомендациям, начальная уставка срабатывания дифференциальной защиты с торможением принимается не менее 0,3, поэтому окончательно принимается уставка $I_{\text{дзт нач.}} = 0,3 \text{ о. е.}$

Проверка по чувствительности (не менее 2,0) [3]

$$k_{\text{чув.дзт}} = \frac{I_{\text{кз тр.мин.}}^{(2)} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{мин.}})}{I_{\text{ном.тр.вн}} \cdot I_{\text{дзт нач.}}} = \frac{193,7 \cdot (1 - 0,1)}{31,6 \cdot 0,3} = 18,37.$$

Составляющие относительного расчетного тока небаланса, для дифференциальной защиты с торможением, второго участка.

$$\begin{aligned} I_{\text{нб расч.дзт}} &= 1,5 \cdot (k_{\text{пер.}} \cdot k_{\text{одн.}} \cdot \varepsilon_{1,5} + U_{\text{рег.1}} \cdot k_{\text{ток.1}} + \gamma) = \\ &= 1,5 \cdot (2 \cdot 1 \cdot 0,1 + 0,16 \cdot 1 + 0,05) = 0,62 \text{ о. е.} \end{aligned}$$

Уставка срабатывания для дифференциальной защиты с торможением

$$I_{\text{дзт2}} = k_{\text{отс.}} \cdot I_{\text{нб расч.дзт}} = 1,2 \cdot 0,62 = 0,74 \text{ о. е.}$$

Коэффициент торможения для второго участка (первого наклонного участка)

$$k_{\text{торм.2}} = I_{\text{дзт2}} - I_{\text{дзт нач.}} = 0,74 - 0,3 = 0,44 \text{ о. е.}$$

Ток торможения, соответствующий максимальному току внешнего КЗ

$$I_{\text{к торм.}} = \left(1 - \frac{k_{\text{пер.}} \cdot \varepsilon_{\text{макс.}}}{2}\right) \cdot \frac{I_{\text{кз тр.макс.}}^{(3)}}{I_{\text{ном.тр.вн}}} = \left(1 - \frac{2,5 \cdot 0,1}{2}\right) \cdot \frac{367,2}{31,6} = 10,61 \text{ о. е.}$$

Коэффициент торможения, для третьего участка характеристики торможения ДЗТ

$$k_{\text{торм.3}} = \frac{I_{\text{дто}} - I_{\text{дзт2}}}{I_{\text{к торм.}} - I_{\text{торм.2}}} = \frac{6,41 - 0,74}{10,61 - 1,5} = 0,65 \text{ о. е.}$$

Составляющие относительного расчетного тока небаланса, для сигнализации небаланса

$$\begin{aligned} I_{\text{нб расч.сигн.}} &= 1,0 \cdot (k_{\text{пер.}} \cdot k_{\text{одн.}} \cdot \varepsilon_{\text{раб.макс.}} + U_{\text{рег.1}} \cdot k_{\text{ток.1}} + \gamma) = \\ &= 1,0 \cdot (1 \cdot 1 \cdot 0,1 + 0,16 \cdot 1 + 0,05) = 0,31 \text{ о. е.} \end{aligned}$$

Уставка сигнализации небаланса

$$I_{\text{нб синг.}} = k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{нб расч.сигн.}} = 1,1 \cdot 0,31 = 0,34 \text{ о. е.}$$

Выдержка времени срабатывания сигнализации небаланса

$$t_{\text{нб синг.}} = k_{\text{отс}} \cdot t_{\text{с.з.тр.вн.}} = 1,5 \cdot 2,1 = 3,15 \text{ с,}$$

где $t_{\text{с.з.тр.вн.}} = 2,1 \text{ с}$ – время срабатывания резервной защиты трансформатора со стороны обмотки ВН.

А.4 Выбор уставки дифференциальной токовой отсечки чувствительной ступени

Составляющие относительного расчетного тока небаланса, для дифференциальной токовой отсечки

$$\begin{aligned} I_{\text{нб расч.дто чув.}} &= \left(k_{\text{пер.}} \cdot k_{\text{одн.}} \cdot \varepsilon_{\text{макс.}} + \frac{n_{\text{рпн чув.}} \cdot \Delta U_{\text{рпн.}}}{100} \cdot k_{\text{ток.1}} + \gamma \right) \cdot \frac{I_{\text{кз тр.макс.}}^{(3)}}{I_{\text{ном.тр.вн}}} = \\ &= \left(2,5 \cdot 1 \cdot 0,1 + \frac{3 \cdot 1,78}{100} \cdot 1 + 0,05 \right) \cdot \frac{367,2}{31,6} \approx 4,11 \text{ о. е.,} \end{aligned}$$

где $n_{\text{рпн чув.}} = 3$ – минимальное большее количество ступеней РПН, при котором происходит изменение напряжения трансформатора стороны ВН, не менее чем на 5 %.

Отстройка от расчётного максимального тока небаланса

$$I_{\text{дто чув.}} = k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{нб расч.дто чув.}} = 1,2 \cdot 4,11 = 4,92 \text{ о. е.}$$

Проверка дифференциальной токовой отсечки по чувствительности не требуется.

А.5 Выбор уставки дифференциальной защиты с торможением чувствительной ступени

Составляющие относительного расчетного тока небаланса, для дифференциальной защиты с торможением, начального тока

$$\begin{aligned} I_{\text{нб расч.дзт нач.чув.}} &= 0,5 \cdot \left(k_{\text{пер.}} \cdot k_{\text{одн.}} \cdot \varepsilon_{\text{макс.}} + \frac{n_{\text{рпн чув.}} \cdot \Delta U_{\text{рпн.}}}{100} \cdot k_{\text{ток.1}} + \gamma \right) = \\ &= 0,5 \cdot \left(1 \cdot 1 \cdot 0,1 + \frac{3 \cdot 1,78}{100} \cdot 1 + 0,05 \right) \approx 0,1 \text{ о. е.} \end{aligned}$$

Уставка срабатывания для дифференциальной защиты с торможением

$$I_{\text{дзт нач.чув}} = k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{нб расч.дзт нач.чув.}} = 1,5 \cdot 0,16 = 0,24 \text{ о. е.,}$$

согласно рекомендациям, начальная уставка срабатывания дифференциальной защиты с торможением принимается не менее 0,3, поэтому окончательно принимается уставка $I_{\text{дзт нач.чув}} = 0,3 \text{ о. е.}$

Проверка по чувствительности (не менее 2,0) [3]

$$k_{\text{чув.дзт чув.}} = \frac{I_{\text{кз тр.мин.}}^{(2)} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{мин.}})}{I_{\text{ном.тр.вн}} \cdot I_{\text{дзт нач.чув.}}} = \frac{193,7 \cdot (1 - 0,1)}{31,6 \cdot 0,3} \approx 18,37.$$

Составляющие относительного расчетного тока небаланса, для дифференциальной защиты с торможением, второго участка

$$\begin{aligned} I_{\text{нб расч.дзт чув.}} &= 1,5 \cdot \left(k_{\text{пер.}} \cdot k_{\text{одн.}} \cdot \varepsilon_{\text{макс.}} + \frac{n_{\text{рпн чув.}} \cdot \Delta U_{\text{рпн}}}{100} \cdot k_{\text{ток.1}} + \gamma \right) = \\ &= 1,5 \cdot \left(2 \cdot 1 \cdot 0,1 + \frac{3 \cdot 1,78}{100} \cdot 1 + 0,05 \right) = 0,46 \text{ о. е.} \end{aligned}$$

Уставка срабатывания для дифференциальной защиты с торможением

$$I_{\text{дзт2 чув.}} = k_{\text{отс.}} \cdot I_{\text{нб расч.дзт чув.}} = 1,2 \cdot 0,46 = 0,55 \text{ о. е.}$$

Коэффициент торможения для второго участка (первого наклонного участка)

$$k_{\text{торм.2 чув.}} = I_{\text{дзт2 чув.}} - I_{\text{дзт нач.чув.}} = 0,55 - 0,3 = 0,25 \text{ о. е.}$$

Коэффициент торможения, для третьего участка характеристики торможения ДЗТ

$$k_{\text{торм.3 чув.}} = \frac{I_{\text{дто чув.}} - I_{\text{дзт2 чув.}}}{I_{\text{к торм.}} - I_{\text{торм.2}}} = \frac{4,92 - 0,55}{10,61 - 1,5} = 0,5 \text{ о. е.}$$

Уставка блокировки ДЗТ при БТН по содержанию второй гармоники в дифференциальном токе 15 % от тока первой гармоники

$$k_{\text{гарм.2}} = 0,15.$$

Уставку по времени ограничения длительности перекрёстного режима блокирования

$$t_{\text{пб}} = 1,0 \text{ с.}$$

А.6 Результаты выбора уставок дифференциальной защиты с торможением трансформатора

В таблицу А.1 сведены уставки дифференциальной защиты с торможением трансформатора с рассчитанные выше.

Таблица А.1 - Уставки защиты

Уставки	Обозначение	Значение
Ток срабатывания ДТО, о.е.	$I_{\text{дто}}$	6,41
Начальный ток срабатывания ДЗТ, о.е.	$I_{\text{дзт нач.}}$	0,3
Коэффициент торможения второго участка ДЗТ	$k_{\text{торм.2}}$	0,44
Коэффициент торможения третьего участка ДЗТ	$k_{\text{торм.3}}$	0,65
ИПБ, о.е.	$k_{\text{гарм.2}}$	0,15
Время ограничения длительности перекрёстного режима блокирования, с	$t_{\text{пб}}$	1
Чувствительная ступень		
Ток срабатывания ДТО, о.е.	$I_{\text{дто чув.}}$	4,92
Начальный ток срабатывания «чувствительного» органа ДЗТ, о.е.	$I_{\text{дзт нач.чув.}}$	0,24
Коэффициент торможения второго участка «чувствительного» органа ДЗТ	$k_{\text{торм.2 чув.}}$	0,25
Коэффициент торможения третьего участка «чувствительного» органа ДЗТ	$k_{\text{торм.3 чув.}}$	0,5

Приложение Б

Пример выбора уставок для дифференциальной защиты ошиновки

Б.1 Исходные данные

В минимальном режиме работы энергосистемы (минимальный ток КЗ) $I_{\text{КЗ мин.}}^{(3)} = 1,61 \text{ кА}$.

Схема распределительного устройства [19, 20], для защиты, которого будут выбраны уставки дифференциальной защиты шин с торможением, для БМРЗ-ТД [2], приведена на рисунок Б.1.

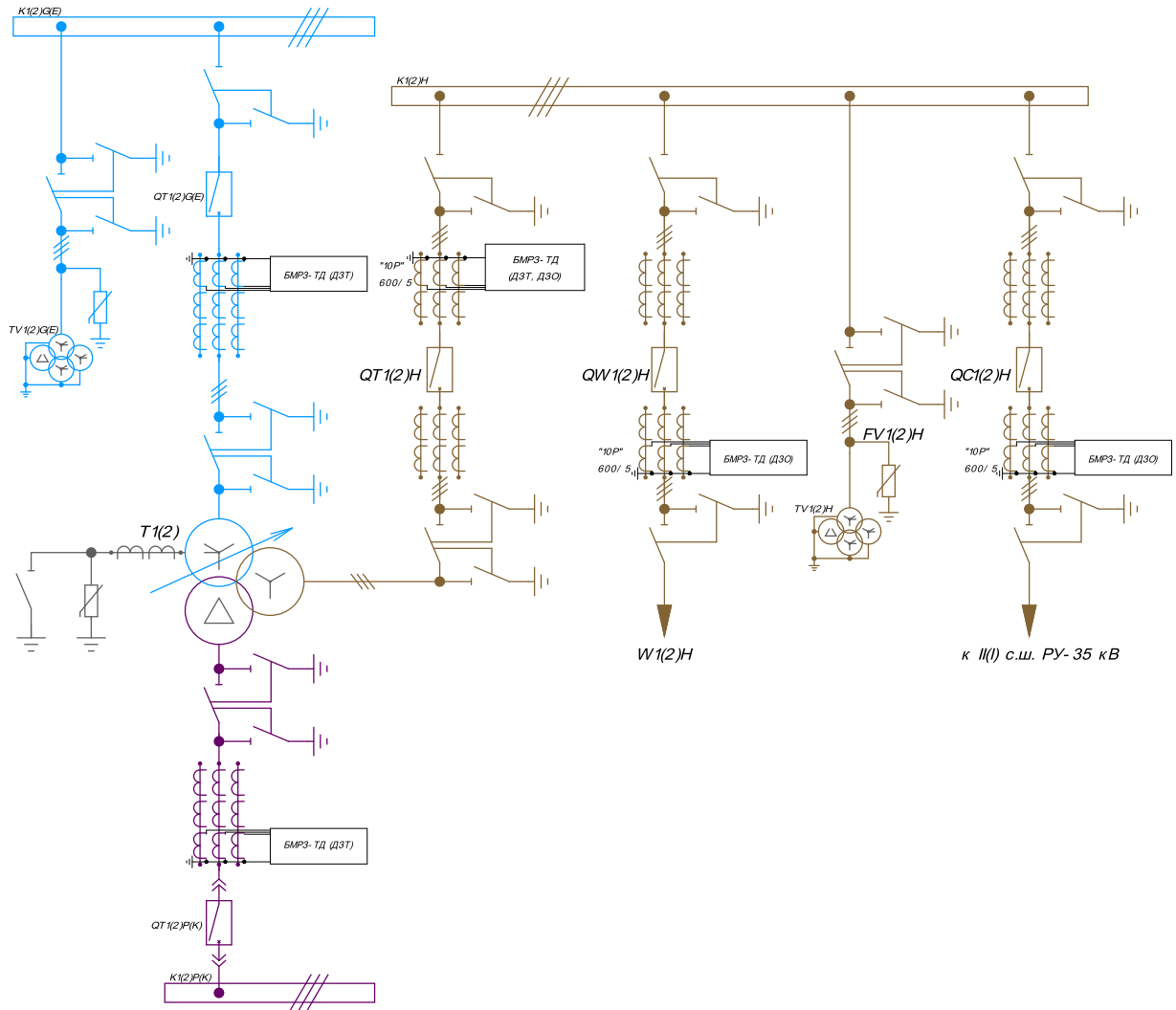


Рисунок. Б.1 Схема распределительного устройства с распределением по обмоткам трансформаторов тока дифференциальной защиты ошиновки

Токи подпитки коротких замыканий, приведенные к шинам 35 кВ, для которых производится расчет дифференциальной защиты ошиновки с торможением:

- в нормальном режиме работы энергосистемы (максимальный ток КЗ) $I_{\text{КЗ макс.}}^{(3)} = 8,03 \text{ кА}$;
- в минимальном режиме работы энергосистемы (минимальный ток КЗ) $I_{\text{КЗ мин.}}^{(3)} = 1,61 \text{ кА}$.

Коэффициент трансформации трансформаторов тока для дифференциальной защиты шин с торможением

$$k_{\text{ТТ } 1} = \frac{I_{\text{НОМ. ТТ } 1}}{I_{\text{НОМ. ТТ ВТ}}} = \frac{600}{5} = 120,$$

где $I_{\text{НОМ. ТТ } 1} = 600 \text{ А}$ – номинальный первичный ток ТТ; $I_{\text{НОМ. ТТ ВТ}} = 5 \text{ А}$ – номинальный вторичный ток ТТ.

Б.2 Выбор уставки дифференциальной токовой отсечки

Максимальный расчетный ток небаланса при максимальном токе внешнего КЗ

$$I_{\text{НБ макс.}} = (\varepsilon_{\text{макс.}} \cdot k_a \cdot k_{\text{одн.}} + \gamma) \cdot I_{\text{КЗ макс.}}^{(1)} = (0,1 \cdot 3 \cdot 0,5 + 0,05) \cdot 8,03 \cdot 10^3 = 1605,5 \text{ А},$$

где $\varepsilon_{\text{макс.}} = 0,1$ - полная погрешность ТТ с классом точности 10Р [25];

$k_a = 3$ - коэффициент апериодической составляющей;

$k_{\text{одн.}} = 0,5$ - коэффициент однотипности ТТ;

$\gamma = 0,05$ - коэффициент цифрового выравнивания.

Уставка срабатывания дифференциальной токовой отсечки

$$I_{\text{дто пред.}} = k_n \cdot I_{\text{НБ макс.}} = 1,5 \cdot 1605,5 = 2408,4 \text{ А},$$

где $k_n = 1,5$ – коэффициент надежности.

Для ввода полученных уставок в БМРЗ-ТД переводят полученные в именованных единицах значения уставок в относительные единицы, учитывая, что номинальный ток базисного присоединения $I_{\text{НОМ. баз.}} = I_{\text{НОМ. ТТ } 1} = 600 \text{ А}$.

Уставка срабатывания дифференциальной токовой отсечки защиты шин, в относительных единицах

$$I_{\text{дто баз. пред.}} = \frac{I_{\text{дто пред.}}}{I_{\text{НОМ. баз.}}} = \frac{2408,4}{600} \approx 4,01 \text{ о. е.}$$

Б.3 Выбор уставки дифференциальной защиты ошиновки

Уставка начального тока срабатывания дифференциальной защиты шин с торможением

$$I_{\text{дэт нач.}} = k_{\text{отс.}} \cdot I_{\text{нагр. макс.}} = 1,2 \cdot 525 = 630 \text{ А},$$

где $k_{\text{отс.}} = 1,2$ - коэффициент отстройки;

$I_{\text{нагр. макс.}} = 525 \text{ А}$ - максимальный ток нагрузки выбирается на основании результатов расчетов режимов, приведенных в составе проектной документации том «Балансы и режимы» или его аналоге.

Уставка срабатывания начального тока срабатывания дифференциальной защиты шин, в относительных единицах

$$I_{\text{дзт нач. баз.}} = \frac{I_{\text{дзт нач.}}}{I_{\text{ном.баз.}}} = \frac{630}{600} \approx 1,05 \text{ о. е.}$$

Проверка по чувствительности (не менее 2,0) [3]

$$k_{\text{чув.дзт}} = \frac{I_{\text{кз мин.}}^{(2)}}{I_{\text{дзт нач. ут.}}} = \frac{1,39 \cdot 10^3}{630} = 2,21,$$

где минимальный ток короткого замыкания на шинах

$$I_{\text{кз мин.}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\text{кз мин.}}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 1,61 \approx 1,39 \text{ кА.}$$

Максимальный ток небаланса в рабочем режиме

$$I_{\text{нб раб.}} = (\varepsilon_{\text{нагр.макс.}} + \gamma) \cdot I_{\text{нагр.макс.}} = (0,1 + 0,05) \cdot 525 = 78,73 \text{ А,}$$

где $\varepsilon_{\text{нагр.макс.}} = 0,1$ - максимальная погрешность трансформаторов тока [25].

Ток сигнализации небаланса с действием на сигнал

$$I_{\text{нб сраб.}} = k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{нб раб.}} = 1,2 \cdot 78,73 = 94,48 \text{ А.}$$

Уставка тока сигнализации небаланса, в относительных единицах

$$I_{\text{нб сраб. баз.}} = \frac{I_{\text{нб сраб.}}}{I_{\text{ном.баз.}}} = \frac{94,48}{600} = 0,16 \text{ о. е.}$$

Уставку по времени с учетом отстройки от максимального времени действия резервных защит отходящих линий

$$t_{\text{нб}} = t_{\text{с.з.}} + \Delta t = 2,1 + 0,3 = 2,4 \text{ с,}$$

где $t_{\text{с.з.}} = 2,1$ с – наибольшее время срабатывания ступени резервной защиты трансформатора;

$\Delta t = 0,3$ с - ступень селективности для микропроцессорных устройств релейной защиты.

Коэффициент торможения дифференциальной защиты шин с торможением

$$k_{\text{торм.}} = \frac{I_{\text{дто}} - I_{\text{нб раб.}}}{I_{\text{кз макс.}}^{(3)} - I_{\text{нагр.макс.}}} = \frac{2408,4 - 78,73}{8,03 \cdot 10^3 - 525} = 0,31.$$

Ток уставки начала торможения дифференциальной защиты шин с торможением

$$I_{\text{нт}} = I_{\text{нагр.макс.}} \cdot \left(1 + \frac{1,05}{k_{\text{торм.}}}\right) = 525 \cdot \left(1 + \frac{1,05}{0,31}\right) = 2303 \text{ А.}$$

Уставка тока начала торможения дифференциальной защиты шин, в относительных единицах

$$I_{\text{нт баз.пред.}} = \frac{I_{\text{нт}}}{I_{\text{ном.баз.}}} = \frac{2303}{600} = 3,84 \text{ о. е.}$$

Б.4 Результаты выбора уставок дифференциальной защиты ошиновки

В таблицу Б.1 сведены уставки дифференциальной защиты ошиновки, рассчитанные выше.

Таблица Б.1. - Уставки дифференциальной защиты ошиновки защиты

Уставки	Обозначение	Значение
Ток срабатывания ДТО, о.е.	$I_{\text{дто баз.}}$	4,01
Начальный ток срабатывания ПО ДЗТ, о.е.	$I_{\text{дзт нач.}}$	1,05
Ток начала торможения ПО ДЗТ, о.е.	$I_{\text{нт баз.}}$	3,84
Коэффициент торможения ПО ДЗТ	$k_{\text{торм.}}$	0,31
Ток сигнализации небаланса, о.е.	$I_{\text{нб сраб. баз.}}$	0,16
Выдержка времени сигнализации небаланса, с	$t_{\text{нб}}$	2,4

Приложение В

Пример выбора уставок для дифференциальной защиты шин

В.1 Исходные данные

Схема распределительного устройства [19, 20], для защиты, которого будут выбраны уставки дифференциальной защиты шин, для БМРЗ-ДЗШ [15], приведена на рисунок В.1.

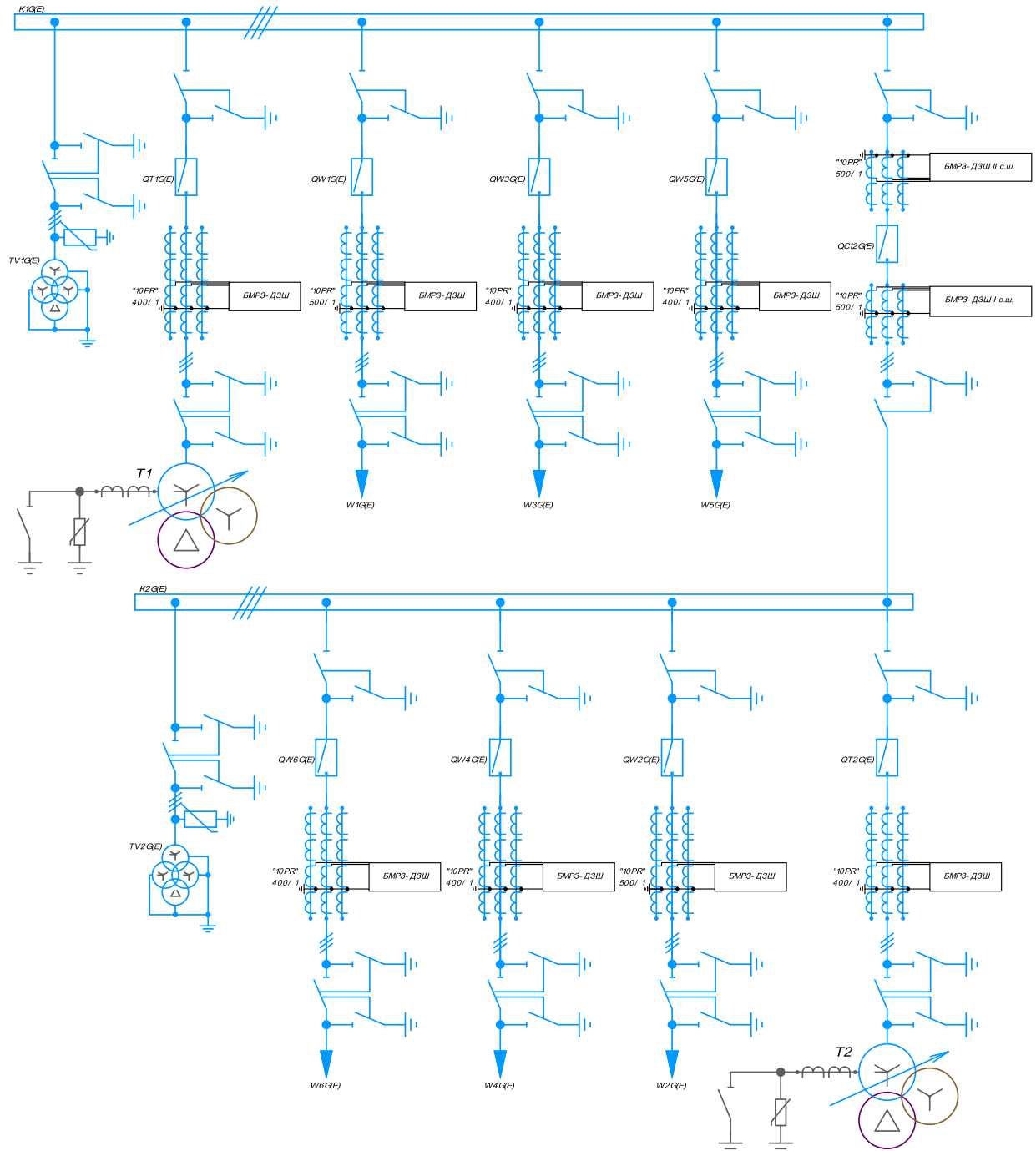


Рисунок. В.1 - Схема распределительного устройства с распределением по обмоткам трансформаторов тока дифференциальной защиты шин

Токи подпитки коротких замыканий, приведенные к шинам 110 кВ, для которых производится расчет дифференциальной защиты шин с торможением:

- в нормальном режиме работы энергосистемы (максимальный ток КЗ) $I_{\text{КЗ макс.}}^{(3)} = 1,55 \text{ кА}$;
- в нормальном режиме работы энергосистемы (максимальный ток КЗ) $I_{\text{КЗ макс.}}^{(1)} = 1,91 \text{ кА}$;
- в минимальном режиме работы энергосистемы (минимальный ток КЗ) $I_{\text{КЗ мин.}}^{(3)} = 1,15 \text{ кА}$;
- в минимальном режиме работы энергосистемы (минимальный ток КЗ) $I_{\text{КЗ мин.}}^{(1)} = 1,05 \text{ кА}$.

Коэффициенты трансформации трансформаторов тока дифференциальной защиты шин с торможением

$$k_{\text{ТТ } 1} = \frac{I_{\text{НОМ. ТТ } 1}}{I_{\text{НОМ. ТТ ВТ}}} = \frac{500}{1} = 500,$$

где $I_{\text{НОМ. ТТ } 1} = 500 \text{ А}$ – номинальный первичный ток ТТ;

$I_{\text{НОМ. ТТ ВТ}} = 1 \text{ А}$ – номинальный вторичный ток ТТ.

Коэффициенты трансформации трансформаторов тока дифференциальной защиты шин с торможением

$$k_{\text{ТТ } 2} = \frac{I_{\text{НОМ. ТТ } 2}}{I_{\text{НОМ. ТТ ВТ}}} = \frac{400}{1} = 400,$$

где $I_{\text{НОМ. ТТ } 2} = 400 \text{ А}$ – номинальный первичный ток ТТ;

$I_{\text{НОМ. ТТ ВТ}} = 1 \text{ А}$ – номинальный вторичный ток ТТ.

В.2 Выбор уставки дифференциальной токовой отсечки

Максимальный расчетный ток небаланса при максимальном токе внешнего КЗ

$$I_{\text{НБ макс.}} = (\varepsilon_{\text{макс.}} \cdot k_a \cdot k_{\text{одн.}} + \gamma) \cdot I_{\text{КЗ макс.}}^{(1)} = (0,1 \cdot 3 \cdot 1 + 0,05) \cdot 1,91 \cdot 10^3 = 668,5 \text{ А},$$

где $\varepsilon_{\text{макс.}} = 0,1$ - полная погрешность ТТ с классом точности 10Р [26];

$k_a = 3$ - коэффициент апериодической составляющей;

$k_{\text{одн.}} = 1$ - коэффициент однотипности ТТ;

$\gamma = 0,05$ - коэффициент цифрового выравнивания.

Уставка срабатывания дифференциальной токовой отсечки

$$I_{\text{дто пред.}} = k_n \cdot I_{\text{НБ макс.}} = 1,5 \cdot 668,5 = 1005 \text{ А},$$

где $k_n = 1,5$ – коэффициент надежности.

Для ввода полученных уставок в БМРЗ-ДЗШ переводят полученные в именованных единицах значения уставок в относительные единицы, учитывая, что номинальный ток базисного присоединения $I_{\text{НОМ. баз.}} = I_{\text{НОМ. ТТ } 1} = 500 \text{ А}$.

Уставка срабатывания дифференциальной токовой отсечки защиты шин, в относительных единицах

$$I_{\text{дто баз. пред.}} = \frac{I_{\text{дто пред.}}}{I_{\text{НОМ. баз.}}} = \frac{1005}{500} = 2,01 \text{ о. е.}$$

В.3 Выбор уставки дифференциальной защиты шин

Уставка начального тока срабатывания дифференциальной защиты шин с торможением

$$I_{\text{дзт нач.}} = k_{\text{отс.}} \cdot I_{\text{нагр.макс.}} = 1,2 \cdot 380,36 = 456,44 \text{ А,}$$

где $k_{\text{отс.}} = 1,2$ - коэффициент отстройки;

$I_{\text{нагр.макс.}} = 380,36 \text{ А}$ - максимальный ток нагрузки выбирается на основании результатов расчетов режимов, приведенных в составе проектной документации том «Балансы и режимы» или его аналоге.

Уставка срабатывания начального тока срабатывания дифференциальной защиты шин, в относительных единицах

$$I_{\text{дзт нач. баз.}} = \frac{I_{\text{дзт нач.}}}{I_{\text{ном.баз.}}} = \frac{456,44}{500} \approx 0,91 \text{ о. е.,}$$

тогда уточнённая уставка срабатывания начального тока срабатывания дифференциальной защиты шин, с учетом коэффициента трансформации и диапазона уставок принятых в БМРЗ-ДЗШ в первичных значениях составит

$$I_{\text{дзт нач. ут.}} = I_{\text{дзт нач.}} \cdot I_{\text{ном.баз.}} = 0,91 \cdot 500 = 455 \text{ А.}$$

Проверка по чувствительности (не менее 2,0) [3]

$$k_{\text{чув.дзт}} = \frac{I_{\text{кз мин.}}^{(2)}}{I_{\text{дзт нач. ут.}}} = \frac{1,0 \cdot 10^3}{455} = 2,19,$$

где $I_{\text{кз мин.}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\text{кз мин.}}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 1,15 \approx 1,0 \text{ кА}$ – минимальный ток короткого замыкания на шинах.

Максимальный ток небаланса в рабочем режиме

$$I_{\text{нб раб.}} = (\varepsilon_{\text{нагр.макс.}} + \gamma) \cdot I_{\text{нагр.макс.}} = (0,1 + 0,05) \cdot 380,36 = 57,05 \text{ А,}$$

где $\varepsilon_{\text{нагр.макс.}} = 0,1$ - максимальная погрешность трансформаторов тока [26].

Ток сигнализации небаланса с действием на сигнал

$$I_{\text{нб сраб.}} = k_{\text{отс.}} \cdot I_{\text{нб раб.}} = 1,2 \cdot 57,05 = 68,47 \text{ А.}$$

Уставка тока сигнализации небаланса, в относительных единицах

$$I_{\text{нб сраб. баз.}} = \frac{I_{\text{нб сраб.}}}{I_{\text{ном.баз.}}} = \frac{68,47}{500} = 0,14 \text{ о. е.}$$

Уставку по времени с учетом отстройки от максимального времени действия резервных защит отходящих линий

$$t_{\text{нб}} = t_{\text{с.з.}}^{III} + \Delta t = 2,4 + 0,3 = 2,7 \text{ с,}$$

где $t_{\text{с.з.}}^{III} = 2,4 \text{ с}$ – наибольшее время срабатывания третьей или четвертой ступени резервной защиты линии;

$\Delta t = 0,3$ с - ступень селективности для микропроцессорных устройств релейной защиты линии.

Коэффициент торможения дифференциальной защиты шин с торможением

$$k_{\text{торм.}} = \frac{I_{\text{дто}} - I_{\text{нб раб.}}}{I_{\text{кз макс.}}^{(1)} - I_{\text{нагр.макс.}}} = \frac{1005 - 68,47}{1,91 \cdot 10^3 - 380,36} = 0,62.$$

Ток уставки начала торможения дифференциальной защиты шин с торможением

$$I_{\text{нт}} = I_{\text{нагр.макс.}} \cdot \left(1 + \frac{1,05}{k_{\text{торм.}}}\right) = 380,36 \cdot \left(1 + \frac{1,05}{0,62}\right) = 1025 \text{ А.}$$

Уставка тока начала торможения дифференциальной защиты шин, в относительных единицах

$$I_{\text{нт баз.пред.}} = \frac{I_{\text{нт}}}{I_{\text{ном.баз.}}} = \frac{1025}{500} = 2,05 \text{ о. е.}$$

Ток срабатывания зоны дополнительного торможения $I_{\text{нас}}$, рассчитаем из условия отстройки от максимального нагрузочного режима

$$I_{\text{нас. пред}} = k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{нагр.макс.}} = 1,5 \cdot 380,36 = 570,54 \text{ А.}$$

Уставка тока срабатывания зоны дополнительного торможения дифференциальной защиты шин, в относительных единицах

$$I_{\text{нас. баз. пред.}} = \frac{I_{\text{нас. пред}}}{I_{\text{ном.баз.}}} = \frac{570,54}{500} = 1,14 \text{ о. е.}$$

Коэффициент торможения зоны безусловного срабатывания ДЗТ всегда принимается равным 1,8

$$k_{\text{торм.2}} = 1,8.$$

Длительность дополнительного торможения $t_{\text{торм}}$ примем равной времени затухания апериодической составляющей

$$t_{\text{торм.}} = 3 \cdot T_a = 3 \cdot 0,015 \approx 0,05 \text{ с.}$$

Постоянная времени сети

$$T_a = \frac{x_{\Sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{сети}} \cdot r_{\Sigma}} = \frac{101,86}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 22,19} = 0,015 \text{ с,}$$

где $f_{\text{сети}} = 50$ Гц – номинальная частота сети;

x_{Σ} - результирующее реактивное сопротивление цепи короткого замыкания;

r_{Σ} - результирующее реактивное сопротивление цепи короткого замыкания. Для расчета постоянной времени симметричного короткого замыкания достаточно результирующего сопротивления прямой последовательности, а для однофазного замыкания результирующего сопротивления всех последовательностей.

В.4 Выбор уставок срабатывания «чувствительных» органов дифференциальной защиты шин

Ток уставки срабатывания «чувствительных» органов дифференциальной защиты шин с торможением

$$I_{\text{дзт нач.ч.}} = k_n \cdot \varepsilon_{\text{ном}} \cdot k_{\text{бтн}} \cdot I_{\text{раб.макс.}} = 1,5 \cdot 0,1 \cdot 5 \cdot 401 = 301,22 \text{ А,}$$

где $k_{\text{бтн}} = 5$ – коэффициент учета броска тока намагничивания трансформатора [8];

$$I_{\text{раб.макс.}} = I_{\text{ном тр.}} = 401 \text{ А – номинальный ток силового трансформатора.}$$

Отстройка от максимального тока качания не производилась по причине наличия питания только от источника с одной стороны.

Уставка срабатывания чувствительного органа начального тока срабатывания дифференциальной защиты шин, в относительных единицах

$$I_{\text{дзт нач.ч. баз.}} = \frac{I_{\text{дзт нач.ч.}}}{I_{\text{ном.баз.}}} = \frac{301,22}{500} \approx 0,6 \text{ о. е.,}$$

тогда уточнённая уставка срабатывания начального тока срабатывания дифференциальной защиты шин, с учетом коэффициента трансформации и диапазона уставок принятых в БМРЗ-ДЗШ в первичных значениях составит

$$I_{\text{дзт нач.ч. ут.}} = I_{\text{дзт нач.ч. баз.}} \cdot I_{\text{ном.баз.}} = 300 \text{ А.}$$

Проверка по чувствительности дифференциальной защиты шин для чувствительных органов (не менее 2,0) [3]

$$k_{\text{чув.дзт ч}} = \frac{I_{\text{кз min}}^{(2)}}{I_{\text{дзт нач.ч. ут.}}} = \frac{1,0 \cdot 10^3}{300} = 3,32.$$

В.5 Результаты выбора уставок дифференциальной защиты шин

В таблицу В.1 сведены уставки дифференциальной защиты шин, рассчитанные выше.

Таблица В.1 - Уставки защиты

Уставки	Обозначение	Значение
Ток срабатывания ДТО, о.е.	$I_{\text{дто баз.}}$	2,01
Начальный ток срабатывания ПО ДЗТ, о.е.	$I_{\text{дзт нач.}}$	0,91
Ток начала торможения ПО ДЗТ, о.е.	$I_{\text{нт баз.}}$	2,05
Коэффициент торможения ПО ДЗТ	$k_{\text{торм.}}$	0,62
Ток срабатывания зоны дополнительного торможения ПО ДЗТ, о.е.	$I_{\text{нас. баз.}}$	1,14
Коэффициент торможения зоны безусловного срабатывания ПО ДЗТ	$k_{\text{торм.2}}$	1,8
Длительность дополнительного торможения ПО ДЗТ, с	$t_{\text{торм.}}$	0,05
Ток сигнализации небаланса, о.е.	$I_{\text{нб сраб. баз.}}$	0,14
Выдержка времени сигнализации небаланса, с	$t_{\text{нб}}$	2,7
Чувствительная ступень		
Ток срабатывания чувствительного ПО ДЗТ, о.е.	$I_{\text{дзт нач.ч. баз.}}$	0,6

Приложение Г

Пример выбора уставок для дифференциальной защиты шин с перефиксацией присоединений

Г.1 Исходные данные

Схема распределительного устройства [19, 20], для защиты, которого будут выбраны уставки дифференциальной защиты шин с перефиксацией присоединений, для БМРЗ-ДЗШ [14], приведена на рисунок Г.1.

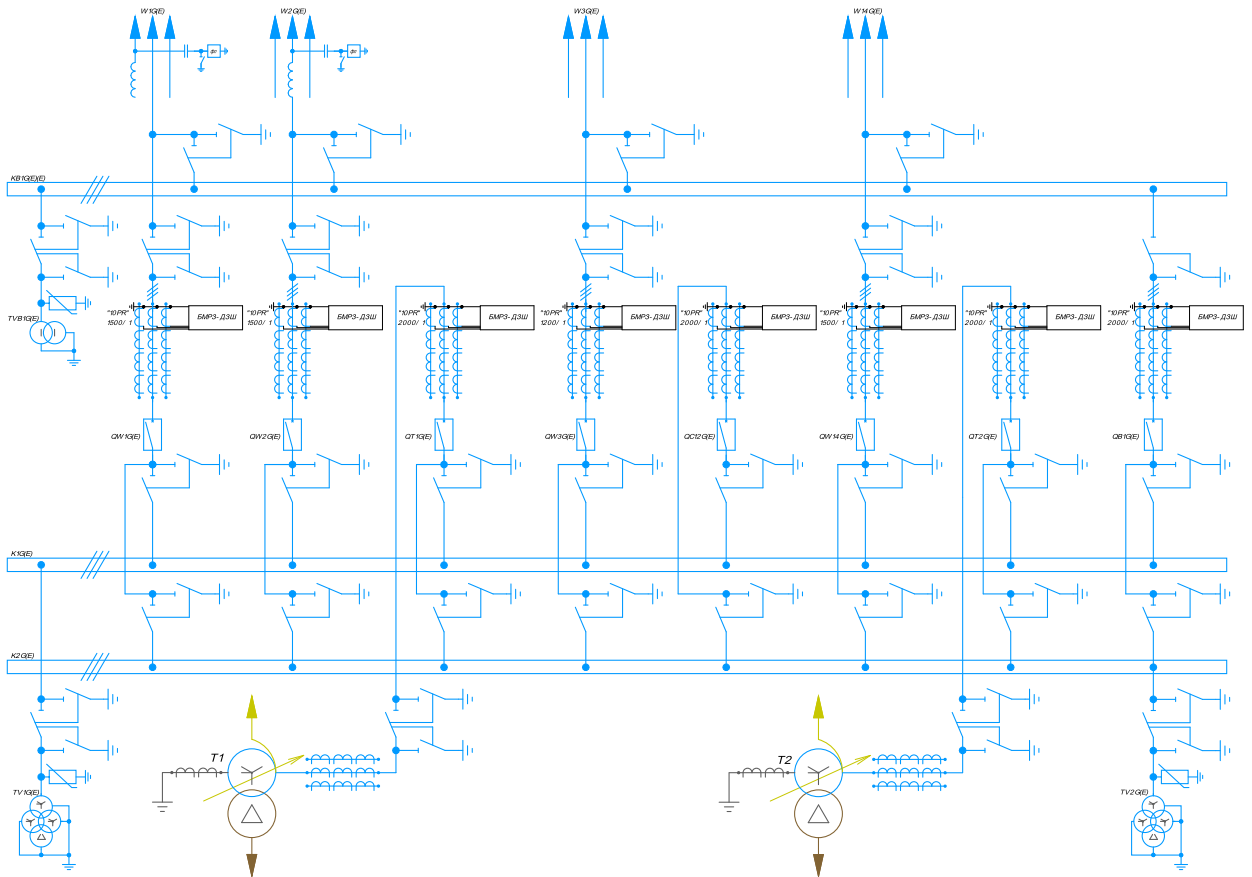


Рисунок. Г.1 - Схема распределительного устройства с распределением по обмоткам трансформаторов тока дифференциальной защиты шин

Токи подпитки коротких замыканий, приведенные к шинам 110 кВ, для которых производится расчет дифференциальной защиты шин с перефиксацией присоединений:

- в нормальном режиме работы энергосистемы (максимальный ток КЗ) $I_{\text{КЗ макс.}}^{(3)} = 18,03 \text{ кА};$
- в нормальном режиме работы энергосистемы (максимальный ток КЗ) $I_{\text{КЗ макс.}}^{(1)} = 16,24 \text{ кА};$
- в минимальном режиме работы энергосистемы (минимальный ток КЗ) $I_{\text{КЗ мин.}}^{(3)} = 14,81 \text{ кА};$
- в минимальном режиме работы энергосистемы (минимальный ток КЗ) $I_{\text{КЗ мин.}}^{(1)} = 13,32 \text{ кА}.$

Коэффициенты трансформации трансформаторов тока дифференциальной защиты шин с торможением

$$k_{\text{ТТ } 1} = \frac{I_{\text{НОМ. ТТ } 1}}{I_{\text{НОМ. ТТ ВТ}}} = \frac{2000}{1} = 2000,$$

где $I_{\text{НОМ. ТТ } 1} = 2000 \text{ А}$ – номинальный первичный ток ТТ;

- $I_{\text{НОМ. ТТ ВТ}} = 1 \text{ А}$ – номинальный вторичный ток ТТ.

Коэффициенты трансформации трансформаторов тока дифференциальной защиты шин с торможением

$$k_{\text{ТТ } 2} = \frac{I_{\text{НОМ. ТТ } 2}}{I_{\text{НОМ. ТТ ВТ}}} = \frac{1500}{1} = 1500,$$

где $I_{\text{НОМ. ТТ } 2} = 1500 \text{ А}$ – номинальный первичный ток ТТ;

$I_{\text{НОМ. ТТ ВТ}} = 1 \text{ А}$ – номинальный вторичный ток ТТ.

Коэффициенты трансформации трансформаторов тока дифференциальной защиты шин с торможением

$$k_{\text{ТТ } 3} = \frac{I_{\text{НОМ. ТТ } 3}}{I_{\text{НОМ. ТТ ВТ}}} = \frac{1200}{1} = 1200,$$

где $I_{\text{НОМ. ТТ } 3} = 120 \text{ А}$ – номинальный первичный ток ТТ;

$I_{\text{НОМ. ТТ ВТ}} = 1 \text{ А}$ – номинальный вторичный ток ТТ.

Г.2 Выбор уставки дифференциальной токовой отсечки

Максимальный расчетный ток небаланса при максимальном токе внешнего КЗ

$$I_{\text{Нб макс.}} = (\varepsilon_{\text{макс.}} \cdot k_a \cdot k_{\text{одн.}} + \gamma) \cdot I_{\text{КЗ макс.}}^{(3)} = (0,1 \cdot 3 \cdot 1 + 0,05) \cdot 18,03 \cdot 10^3 = 6308,8 \text{ А},$$

где $\varepsilon_{\text{макс.}} = 0,1$ - полная погрешность ТТ [26];

$k_a = 3$ - коэффициент апериодической составляющей;

$k_{\text{одн.}} = 1$ - коэффициент однотипности ТТ;

$\gamma = 0,05$ - коэффициент цифрового выравнивания.

Уставка срабатывания дифференциальной токовой отсечки

$$I_{\text{дто пред.}} = k_n \cdot I_{\text{Нб макс.}} = 1,5 \cdot 6308,8 = 9460 \text{ А},$$

где $k_n = 1,5$ – коэффициент надежности.

Для ввода полученных уставок в БМРЗ-ДЗШ переводят полученные в именованных единицах значения уставок в относительные единицы, учитывая, что номинальный ток базисного присоединения $I_{\text{НОМ.баз.}} = I_{\text{НОМ. ТТ } 1} = 2000 \text{ А}$.

Уставка срабатывания дифференциальной токовой отсечки защиты шин, в относительных единицах

$$I_{\text{дто баз. пред.}} = \frac{I_{\text{дто пред.}}}{I_{\text{НОМ.баз.}}} = \frac{9460}{2000} = 4,73 \text{ о. е.}$$

Г.3 Выбор уставки дифференциальной защиты шин

Уставка начального тока срабатывания дифференциальной защиты шин с торможением

$$I_{\text{дзт нач.пред.1}} = k_{\text{отс.}} \cdot I_{\text{нагр.макс.}} = 1,2 \cdot 1336 = 1603,22 \text{ А,}$$

где $k_{\text{отс.}} = 1,2$ - коэффициент отстройки;

$I_{\text{нагр.макс.}} = 1336 \text{ А}$ - максимальный ток нагрузки выбирается на основании результатов расчетов режимов, приведенных в составе проектной документации том «Балансы и режимы» или его аналоге.

Уставка срабатывания начального тока срабатывания дифференциальной защиты шин, в относительных единицах

$$I_{\text{дзт нач. баз.}} = \frac{I_{\text{дзт нач.}}}{I_{\text{ном.баз.}}} = \frac{1603,2}{2000} \approx 0,8 \text{ о. е.,}$$

тогда уточнённая уставка срабатывания начального тока срабатывания дифференциальной защиты шин, с учетом коэффициента трансформации и диапазона уставок принятых в БМРЗ-ДЗШ в первичных значениях составит

$$I_{\text{дзт нач. ут.}} = I_{\text{дзт нач.}} \cdot I_{\text{ном.баз.}} = 0,8 \cdot 2000 = 1600 \text{ А.}$$

Проверка по чувствительности (не менее 2,0) [3]

$$k_{\text{чув.дзт}} = \frac{I_{\text{кз мин.}}^{(2)}}{I_{\text{дзт нач. ут.}}} = \frac{12,83 \cdot 10^3}{1600} = 8,02,$$

где $I_{\text{кз мин.}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\text{кз мин.}}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 14,81 \approx 12,83 \text{ кА}$ – минимальный ток короткого замыкания на шинах.

Максимальный ток небаланса в рабочем режиме

$$I_{\text{нб раб.}} = (\varepsilon_{\text{нагр.макс.}} + \gamma) \cdot I_{\text{нагр.макс.}} = (0,1 + 0,05) \cdot 1336 = 200,4 \text{ А,}$$

где $\varepsilon_{\text{нагр.макс.}} = 0,1$ - максимальная погрешность трансформаторов тока [26].

Ток сигнализации небаланса с действием на сигнал

$$I_{\text{нб сраб.}} = k_{\text{отс.}} \cdot I_{\text{нб раб.}} = 1,2 \cdot 200,4 = 240,48 \text{ А.}$$

Уставка тока сигнализации небаланса, в относительных единицах

$$I_{\text{нб сраб. баз.}} = \frac{I_{\text{нб сраб.}}}{I_{\text{ном.баз.}}} = \frac{240,48}{2000} = 0,12 \text{ о. е.}$$

Уставку по времени с учетом отстройки от максимального времени действия резервных защит отходящих линий

$$t_{\text{нб}} = t_{\text{с.з.}}^{\text{III}} + \Delta t = 2,4 + 0,3 = 2,7 \text{ с,}$$

где $t_{\text{с.з.}}^{\text{III}} = 2,4 \text{ с}$ – наибольшее время срабатывания третьей или четвертой ступени резервной защиты линии;

$\Delta t = 0,3$ с. - степень селективности для микропроцессорных устройств релейной защиты линии.

Коэффициент торможения дифференциальной защиты шин с торможением

$$k_{\text{торм.}} = \frac{I_{\text{ДТО}} - I_{\text{нб. раб.}}}{I_{\text{кз макс.}}^{(3)} - I_{\text{нагр. макс.}}} = \frac{9460 - 200,48}{18,03 \cdot 10^3 - 1336} = 0,55.$$

Ток уставки начала торможения дифференциальной защиты шин с торможением

$$I_{\text{нт}} = I_{\text{нагр. макс.}} \cdot \left(1 + \frac{1,05}{k_{\text{торм.}}}\right) = 1336 \cdot \left(1 + \frac{1,05}{0,55}\right) = 3887 \text{ А.}$$

Уставка тока начала торможения дифференциальной защиты шин, в относительных единицах

$$I_{\text{нт баз. пред.}} = \frac{I_{\text{нт}}}{I_{\text{ном. баз.}}} = \frac{3887}{2000} \approx 1,94 \text{ о. е.}$$

Ток срабатывания зоны дополнительного торможения $I_{\text{нас}}$, рассчитаем из условия отстройки от максимального нагрузочного режима

$$I_{\text{нас. пред}} = k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{нагр. макс.}} = 1,5 \cdot 1336 = 2004,03 \text{ А.}$$

Уставка тока срабатывания зоны дополнительного торможения дифференциальной защиты шин, в относительных единицах

$$I_{\text{нас. баз. пред.}} = \frac{I_{\text{нас. пред}}}{I_{\text{ном. баз.}}} = \frac{2004,03}{2000} \approx 1 \text{ о. е.}$$

Коэффициент торможения зоны безусловного срабатывания ДЗТ всегда принимается равным 1,8

$$k_{\text{торм.2}} = 1,8.$$

Длительность дополнительного торможения $t_{\text{торм}}$ примем равной времени затухания апериодической составляющей

$$t_{\text{торм.}} = 3 \cdot T_a = 3 \cdot 0,015 \approx 0,05 \text{ с.}$$

Постоянная времени сети

$$T_a = \frac{x_{\text{с}\Sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{сети}} \cdot r_{\text{с}\Sigma}} = \frac{4,06}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,94} = 0,015 \text{ с,}$$

где $f_{\text{сети}} = 50$ Гц – номинальная частота сети;

$x_{\text{с}\Sigma}$ - результирующее реактивное сопротивление цепи короткого замыкания;

$r_{\text{с}\Sigma}$ - результирующее реактивное сопротивление цепи короткого замыкания. Для расчета постоянной времени симметричного короткого замыкания достаточно результирующего сопротивления прямой последовательности, а для однофазного замыкания результирующего сопротивления всех последовательностей.

Г.4 Выбор уставок срабатывания «чувствительных» органов дифференциальной защиты шин

Ток уставки срабатывания «чувствительных» органов дифференциальной защиты шин с торможением

$$I_{\text{дзт нач.ч.пред.1}} = k_n \cdot \varepsilon_{\text{ном}} \cdot k_{\text{бтн}} \cdot I_{\text{раб.макс.}} = 1,5 \cdot 0,1 \cdot 5 \cdot 954,3 = 715,72 \text{ А,}$$

где $k_{\text{бтн}} = 5$ – коэффициент учета броска тока намагничивания трансформатора [8];

$$I_{\text{раб.макс.}} = I_{\text{ном тр.}} = 954,3 \text{ А – номинальный ток силового автотрансформатора.}$$

Отстройка от максимального тока качания

$$I_{\text{дзт нач.ч.}} = k_{\text{над}} \cdot \varepsilon_{\text{ном}} \cdot I_{\text{кач.макс.}} = 1,5 \cdot 0,1 \cdot 5,86 \cdot 10^3 = 878,85 \text{ А,}$$

где $k_{\text{над}} = 1,5$ – коэффициент надежности.

Из двух предварительно выбранных уставок начального тока срабатывания «чувствительных» органов дифференциальной защиты шин с торможением выбираем большую $I_{\text{дзт нач.ч.}} = I_{\text{дзт нач.ч.пред.2}} = 878,85 \text{ А.}$

Уставка срабатывания чувствительного органа начального тока срабатывания дифференциальной защиты шин, в относительных единицах

$$I_{\text{дзт нач.ч. баз.}} = \frac{I_{\text{дзт нач.ч.}}}{I_{\text{ном.баз.}}} = \frac{878,85}{2000} \approx 0,44 \text{ о. е.,}$$

тогда уточнённая уставка срабатывания начального тока срабатывания дифференциальной защиты шин, с учетом коэффициента трансформации и диапазона уставок принятых в БМРЗ-ДЗШ в первичных значениях составит

$$I_{\text{дзт нач.ч. ут.}} = I_{\text{дзт нач.ч. баз.}} \cdot I_{\text{ном.баз.}} = 0,44 \cdot 2000 = 880 \text{ А.}$$

Проверка по чувствительности дифференциальной защиты шин с торможением для чувствительных органов (не менее 2,0) [3]

$$k_{\text{чув.дзт ч}} = \frac{I_{\text{кз min}}^{(2)}}{I_{\text{дзт нач.ч. ут.}}} = \frac{12,83 \cdot 10^3}{880} = 9,43.$$

Г.5 Результаты выбора уставок дифференциальной защиты шин

В таблицу Г.1 сведены уставки дифференциальной защиты шин, рассчитанные выше.

Таблица Г.1 - Уставки защиты

Уставки	Обозначение	Значение
Ток срабатывания ДТО, о.е.	$I_{\text{ДТО баз.}}$	4,73
Начальный ток срабатывания ПО ДЗТ, о.е.	$I_{\text{ДЗТ нач.}}$	0,8
Ток начала торможения ПО ДЗТ, о.е.	$I_{\text{нт баз.}}$	1,94
Коэффициент торможения ПО ДЗТ	$k_{\text{торм.}}$	0,55
Ток срабатывания зоны дополнительного торможения ПО ДЗТ, о.е.	$I_{\text{нас. баз.}}$	1,0
Коэффициент торможения зоны безусловного срабатывания ПО ДЗТ	$k_{\text{торм.2}}$	1,8
Длительность дополнительного торможения ПО ДЗТ, с	$t_{\text{торм.}}$	0,05
Ток сигнализации небаланса, о.е.	$I_{\text{нб сраб. баз.}}$	0,12
Выдержка времени сигнализации небаланса, с	$t_{\text{нб}}$	2,7
Чувствительная ступень		
Ток срабатывания чувствительного ПО ДЗТ, о.е.	$I_{\text{ДЗТ нач.ч. баз.}}$	0,44

где $I_{\text{ном. ТТ } 1} = 3000 \text{ А}$ – номинальный первичный ток ТТ;

$I_{\text{ном. ТТ ВТ}} = 5 \text{ А}$ – номинальный вторичный ток ТТ.

Коэффициенты трансформации трансформаторов тока дифференциальной защиты шин с торможением

$$k_{\text{ТТ } 2} = \frac{I_{\text{ном. ТТ } 2}}{I_{\text{ном. ТТ ВТ}}} = \frac{2500}{5} = 500,$$

где $I_{\text{ном. ТТ } 2} = 2500 \text{ А}$ – номинальный первичный ток ТТ;

$I_{\text{ном. ТТ ВТ}} = 5 \text{ А}$ – номинальный вторичный ток ТТ.

Д.2 Выбор уставки неполной дифференциальной защиты шин

Максимальный расчетный ток небаланса при максимальном токе внешнего КЗ

$$I_{\text{нб макс.}} = (\varepsilon_{\text{макс.}} \cdot k_a \cdot k_{\text{одн.}} + \gamma) \cdot I_{\text{КЗ макс.}}^{(3)} = (0,1 \cdot 3 \cdot 1 + 0,05) \cdot 21,08 \cdot 10^3 = 7378,4 \text{ А},$$

где $\varepsilon_{\text{макс.}} = 0,1$ - полная погрешность ТТ с классом точности 10Р [25];

$k_a = 3$ - коэффициент апериодической составляющей;

$k_{\text{одн.}} = 1$ - коэффициент однотипности ТТ;

$\gamma = 0,05$ - коэффициент цифрового выравнивания.

Уставка срабатывания дифференциальной токовой отсечки

$$I_{\text{дто пред.}} = k_n \cdot I_{\text{нб макс.}} = 1,5 \cdot 7378,4 = 11070 \text{ А},$$

где $k_n = 1,5$ – коэффициент надежности.

Для ввода полученных уставок в БМРЗ-ЗЩД переводят полученные в именованных единицах значения уставок в относительные единицы, учитывая, что номинальный ток базисного присоединения $I_{\text{ном. баз.}} = I_{\text{ном. ТТ } 1} = 3000 \text{ А}$.

Уставка срабатывания дифференциальной токовой отсечки защиты шин, в относительных единицах

$$I_{\text{дто баз. пред.}} = \frac{I_{\text{дто пред.}}}{I_{\text{ном. баз.}}} = \frac{11070}{3000} = 3,69 \text{ о. е.}$$

Уставка начального тока срабатывания дифференциальной защиты шин с торможением

$$I_{\text{дзт нач. пред. } 1} = k_{\text{отс.}} \cdot I_{\text{нагр. макс.}} = 1,2 \cdot 1624 = 1948,8 \text{ А},$$

где $k_{\text{отс.}} = 1,2$ - коэффициент отстройки;

$I_{\text{нагр. макс.}} = 1624 \text{ А}$ - максимальный ток нагрузки выбирается на основании результатов расчетов режимов, приведенных в составе проектной документации том «Балансы и режимы» или его аналоге.

Уставка срабатывания начального тока срабатывания дифференциальной защиты шин, в относительных единицах

$$I_{\text{дзт нач. баз.}} = \frac{I_{\text{дзт нач.}}}{I_{\text{ном.баз.}}} = \frac{1948,8}{3000} \approx 0,65 \text{ о. е.},$$

тогда уточнённая уставка срабатывания начального тока срабатывания дифференциальной защиты шин, с учетом коэффициента трансформации и диапазона уставок принятых в БМРЗ-ЗЩД в первичных значениях составит

$$I_{\text{дзт нач. ут.}} = I_{\text{дзт нач.}} \cdot I_{\text{ном.баз.}} = 0,65 \cdot 3000 = 1950 \text{ А.}$$

Проверка по чувствительности (не менее 2,0) [3]

$$k_{\text{чув.дзт}} = \frac{I_{\text{кз мин.}}^{(2)}}{I_{\text{дзт нач. ут.}}} = \frac{6,16 \cdot 10^3}{1950} = 3,16,$$

где $I_{\text{кз мин.}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\text{кз мин.}}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 7,12 \approx 6,16 \text{ кА}$ – минимальный ток короткого замыкания на шинах.

Максимальный ток небаланса в рабочем режиме

$$I_{\text{нб раб.}} = (\varepsilon_{\text{нагр.макс.}} + \gamma) \cdot I_{\text{нагр.макс.}} = (0,1 + 0,05) \cdot 1624 = 243,6 \text{ А,}$$

где $\varepsilon_{\text{нагр.макс.}} = 0,1$ - максимальная погрешность трансформаторов тока [25].

Коэффициент торможения дифференциальной защиты шин с торможением

$$k_{\text{торм.}} = \frac{I_{\text{дто}} - I_{\text{нб раб.}}}{I_{\text{кз макс.}}^{(3)} - I_{\text{нагр.макс.}}} = \frac{11070 - 243,6}{21,08 \cdot 10^3 - 1624} = 0,56.$$

Ток срабатывания зоны дополнительного торможения $I_{\text{нас.}}$, рассчитаем из условия отстройки от максимального нагрузочного режима

$$I_{\text{нас. пред}} = k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{нагр.макс.}} = 1,5 \cdot 1624 = 2436 \text{ А.}$$

Уставка тока срабатывания зоны дополнительного торможения дифференциальной защиты шин, в относительных единицах

$$I_{\text{нас. баз. пред.}} = \frac{I_{\text{нас. пред.}}}{I_{\text{ном.баз.}}} = \frac{2436}{3000} = 0,81 \text{ о. е.}$$

Коэффициент торможения зоны безусловного срабатывания ДЗТ всегда принимается равным 1,8

$$k_{\text{торм.2}} = 1,8.$$

Длительность дополнительного торможения $t_{\text{торм}}$ примем равной времени затухания апериодической составляющей

$$t_{\text{торм.}} = 3 \cdot T_a = 3 \cdot 0,014 \approx 0,04 \text{ с.}$$

Постоянная времени сети

$$T_a = \frac{x_{c\Sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{сети}} \cdot r_{c\Sigma}} = \frac{0,834}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,175} = 0,014 \text{ с,}$$

где $f_{\text{сети}} = 50$ Гц – номинальная частота сети;

$x_{c\Sigma}$ - результирующее реактивное сопротивление цепи короткого замыкания;

$r_{c\Sigma}$ - результирующее реактивное сопротивление цепи короткого замыкания. Для расчета постоянной времени симметричного короткого замыкания достаточно результирующего сопротивления прямой последовательности, а для однофазного замыкания результирующего сопротивления всех последовательностей.

Выдержка времени срабатывания неполной ДЗШ

$$t_{\text{ндзш}} = 0,15 \text{ с.}$$

Д.3 Результаты выбора уставок неполной дифференциальной защиты шин

В таблицу Д.1 сведены уставки неполной дифференциальной защиты шин, рассчитанные выше.

Таблица Д.1 - Уставки защиты

Уставки	Обозначение	Значение
Начальный ток срабатывания ПО ДЗТ, о.е.	$I_{\text{дзт нач.}}$	0,65
Коэффициент торможения ПО ДЗТ	$k_{\text{торм.}}$	0,56
Ток срабатывания зоны дополнительного торможения ПО ДЗТ, о.е.	$I_{\text{нас. баз.}}$	0,81
Коэффициент торможения зоны безусловного срабатывания ПО ДЗТ	$k_{\text{торм.2}}$	1,8
Длительность дополнительного торможения ПО ДЗТ, с	$t_{\text{торм.}}$	0,04
Выдержкой времени срабатывая ДЗШ, с.	$t_{\text{ндзш}}$	0,15

Приложение Е

Пример выбора уставок для дифференциальной защиты токоограничивающего реактора

Е.1 Исходные данные

Схема распределительного устройства [19, 20], для защиты, которого будет выбираться уставки дифференциальной защиты токоограничивающего реактора, для БМР3-153-УЗТ [1], приведена на рисунок Е.1.

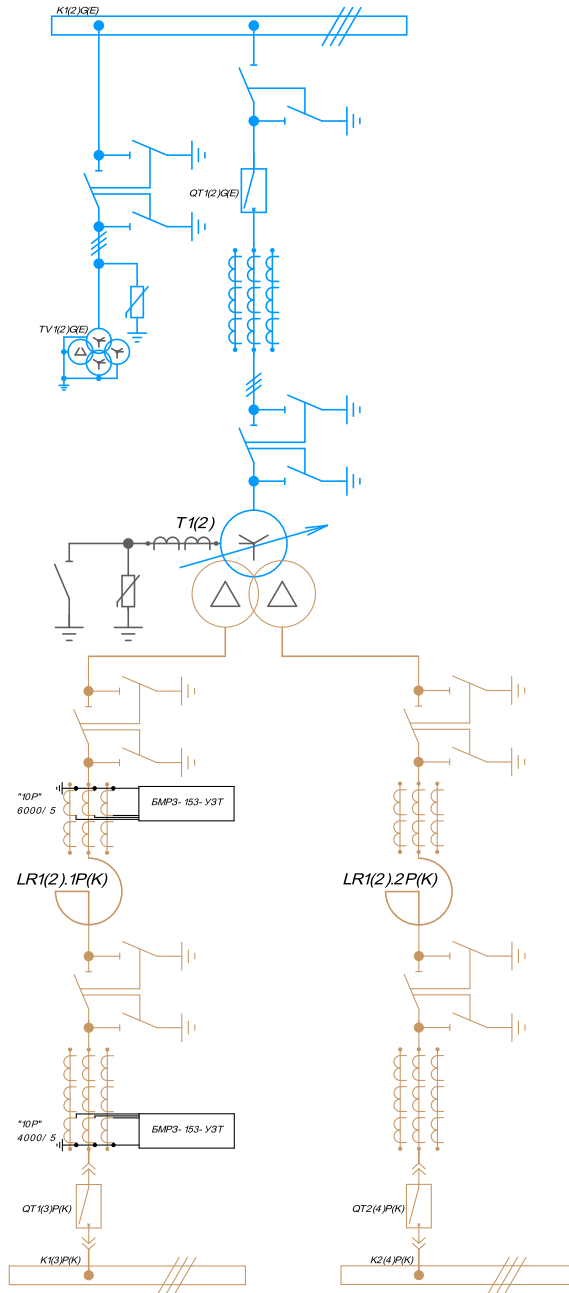


Рисунок. Е.1 - Схема распределительного устройства с распределением по обмоткам трансформаторов тока дифференциальной защиты реактора

Токи подпитки коротких замыканий, приведенные к шинам 6 кВ, для которых производится расчет дифференциальной защиты реактора:

- в нормальном режиме работы энергосистемы (максимальный ток КЗ) перед токоограничивающим реактором $I_{\text{кз макс.}}^{(3)} = 33,7$ кА;

- в минимальном режиме работы энергосистемы (минимальный ток КЗ) перед токоограничивающим реактором $I_{\text{кз мин.}}^{(3)} = 27,71$ кА.

Коэффициенты трансформации трансформаторов тока дифференциальной защиты с торможением:

- стороны трансформатора (до реактора)

$$k_{\text{ТТ ВН}} = \frac{I_{\text{НОМ. ВН ТТ}}}{I_{\text{НОМ. ВН ТТ ВТ}}} = \frac{6000}{5} = 1200,$$

где $I_{\text{НОМ. ВН ТТ}} = 6000$ А – номинальный первичный ток ТТ стороны ВН силового трансформатора;

$I_{\text{НОМ. ВН ТТ ВТ}} = 5$ А – номинальный вторичный ток ТТ;

- стороны после реактора

$$k_{\text{ТТ НН}} = \frac{I_{\text{НОМ. НН ТТ}}}{I_{\text{НОМ. НН ТТ ВТ}}} = \frac{4000}{5} = 800,$$

где $I_{\text{НОМ. НН ТТ}} = 4000$ А – номинальный первичный ток ТТ стороны НН силового трансформатора;

$I_{\text{НОМ. НН ТТ ВТ}} = 5$ А – номинальный вторичный ток ТТ.

Характеристики токоограничивающего реактора:

- тип – РТСТ-10(6)-4000-0,2;

- номинальное напряжение реактора $U_{\text{НОМ. РЕАКТ.}} = 6$ кВ;

- номинальный ток реактора $I_{\text{НОМ РЕАКТ.}} = 4000$ А;

- реактивное сопротивление реактора $x_{\text{РЕАКТ.}} = 0,2$ Ом.

Эквивалентное сопротивление энергосистемы в нормальном режиме работы (максимальный ток КЗ), приведенное к выводам трансформатора 6 кВ (рисунок Е.1)

$$z_{\text{с. макс.}} = \frac{U_{\text{НОМ. НН1(2)}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{кз макс.}}^{(3)}} = \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot 33,7} \approx 0,11 \text{ Ом},$$

где $U_{\text{НОМ. НН1(2)}} = 6,3$ кВ – номинальное напряжение обмотки НН трансформатора типа ТРДН-63000/110 согласно [21].

Эквивалентное сопротивление энергосистемы в послеаварийном режиме работы (минимальный ток КЗ), приведенное к выводам трансформатора 6 кВ (рисунок Е.1)

$$z_{\text{с. мин.}} = \frac{U_{\text{НОМ. НН1(2)}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{кз мин.}}^{(3)}} = \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot 27,71} = 0,13 \text{ Ом}.$$

Минимальный ток трехфазного КЗ за реактором

$$I_{\text{кз реак.мин.}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ном.нн1(2)}}}{\sqrt{3} \cdot (z_{\text{с.мин.}} + x_{\text{реакт.}})} = \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot (0,13 + 0,2)} \approx 10,98 \text{ кА.}$$

Минимальный ток двухфазного КЗ за реактором

$$I_{\text{кз реак.мин.}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\text{кз реак.мин.}}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 10,98 = 9,51 \text{ кА.}$$

Максимальный ток трехфазного КЗ за реактором

$$I_{\text{кз реак.макс.}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ном.нн1(2)}}}{\sqrt{3} \cdot (z_{\text{с.макс.}} + x_{\text{реакт.}})} = \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot (0,11 + 0,2)} = 11,81 \text{ кА.}$$

Номинальный ток реактора

$$I_{\text{ном.реакт.}} = \frac{S_{\text{ном.тр}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном.нн1(2)}} \cdot k_{\text{расщ.}}} = \frac{63 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 10^3 \cdot 2} \approx 2887 \text{ А,}$$

где $S_{\text{ном.тр}} = 63$ – номинальная мощность трансформатора, МВ·А [21];

$k_{\text{расщ.}} = 2$ – коэффициент расщепления трансформатора [21].

Е.2 Выбор уставки дифференциальной токовой отсечки токоограничивающего реактора

Составляющие относительного расчетного тока небаланса, для дифференциальной токовой отсечки

$$\begin{aligned} I_{\text{нб расч.дто}} &= (k_{\text{пер.}} \cdot k_{\text{одн.}} \cdot \varepsilon_{\text{макс.}} + \gamma) \cdot \frac{I_{\text{кз тр.макс.}}^{(3)}}{I_{\text{ном.тр.вн}}} = (2,5 \cdot 1 \cdot 0,1 + 0,05) \cdot \frac{33,7 \cdot 10^3}{2887} = \\ &= 3,5 \text{ о. е.} \end{aligned}$$

Отстройка от расчётного максимального тока небаланса

$$I_{\text{дто}} = k_{\text{отс.}} \cdot I_{\text{нб расч.дто}} = 1,2 \cdot 3,5 = 4,2 \text{ о. е.}$$

Проверка дифференциальной токовой отсечки по чувствительности не требуется.

Е.3 Выбор уставки дифференциальной защиты с торможением токоограничивающего реактора

Составляющие относительного расчетного тока небаланса, для дифференциальной защиты с торможением, начального тока

$$I_{\text{нб расч.дзт нач.}} = 0,5 \cdot (k_{\text{пер.}} \cdot k_{\text{одн.}} \cdot \varepsilon_{\text{макс.}} + \gamma) = 0,5 \cdot (1 \cdot 1 \cdot 0,1 + 0,05) = 0,08 \text{ о. е.}$$

Уставка срабатывания для дифференциальной защиты с торможением

$$I_{\text{дзт нач.}} = k_{\text{отс.}} \cdot I_{\text{нб расч.дзт нач.}} = 1,5 \cdot 0,08 = 0,11 \text{ о. е.,}$$

согласно рекомендациям, начальная уставка срабатывания дифференциальной защиты с торможением принимается не менее 0,3, поэтому окончательно принимается уставка $I_{\text{дзт нач.}} = 0,3$ о.е.

Проверка по чувствительности (не менее 2,0) [3]

$$k_{\text{чув.дзт}} = \frac{I_{\text{кз тр.мин.}}^{(2)} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{мин.}})}{I_{\text{ном.тр.вн.}} \cdot I_{\text{дзт нач.}}} = \frac{9,51 \cdot 10^3 \cdot (1 - 0,1)}{2887 \cdot 0,3} = 9,88.$$

Составляющие относительного расчетного тока небаланса, для дифференциальной защиты с торможением, второго участка

$$I_{\text{нб расч.дзт}} = 1,5 \cdot (k_{\text{пер.}} \cdot k_{\text{одн.}} \cdot \varepsilon_{\text{макс.}} + \gamma) = 1,5 \cdot (2 \cdot 1 \cdot 0,1 + 0,05) = 0,38 \text{ о.е.}$$

Уставка срабатывания для дифференциальной защиты с торможением

$$I_{\text{дзт2}} = k_{\text{отс.}} \cdot I_{\text{нб расч.дзт}} = 1,2 \cdot 0,38 = 0,45 \text{ о.е.}$$

Коэффициент торможения для второго участка (первого наклонного участка)

$$k_{\text{торм.2}} = I_{\text{дзт2}} - I_{\text{дзт нач.}} = 0,45 - 0,3 = 0,15 \text{ о.е.},$$

в БМРЗ-153-УЗТ нельзя выставить уставку коэффициента торможения менее 0,2, поэтому окончательно принята уставка $k_{\text{торм.2}} = 0,2$.

Ток торможения, соответствующий максимальному току внешнего КЗ

$$I_{k \text{ торм.}} = \left(1 - \frac{k_{\text{пер.}} \cdot \varepsilon_{\text{макс.}}}{2}\right) \cdot \frac{I_{\text{кз тр.макс.}}^{(3)}}{I_{\text{ном.тр.вн.}}} = \left(1 - \frac{2,5 \cdot 0,1}{2}\right) \cdot \frac{33,7 \cdot 10^3}{2887} = 10,22 \text{ о.е.}$$

Коэффициент торможения, для третьего участка характеристики торможения ДЗТ

$$k_{\text{торм.3}} = \frac{I_{\text{дто}} - I_{\text{дзт2}}}{I_{k \text{ торм.}} - I_{\text{торм.2}}} = \frac{4,2 - 0,45}{10,22 - 1,5} = 0,43 \text{ о.е.}$$

Составляющие относительного расчетного тока небаланса, для сигнализации небаланса

$$I_{\text{нб расч.сигн.}} = 1,0 \cdot (k_{\text{пер.}} \cdot k_{\text{одн.}} \cdot \varepsilon_{\text{макс.}} + \gamma) = 1,0 \cdot (1 \cdot 1 \cdot 0,1 + 0,05) = 0,15 \text{ о.е.}$$

Уставка сигнализации небаланса

$$I_{\text{нб синг.}} = k_{\text{отс.}} \cdot I_{\text{нб расч.сигн.}} = 1,1 \cdot 0,15 = 0,17 \text{ о.е.},$$

в БМРЗ-153-УЗТ нельзя выставить уставку сигнализации небаланса менее 0,2, поэтому окончательно принята уставка $I_{\text{нб синг.}} = 0,2$.

Выдержка времени срабатывания сигнализации небаланса

$$t_{\text{нб синг.}} = k_{\text{отс.}} \cdot t_{\text{с.з.тр.вн.}} = 1,5 \cdot 2,1 = 3,15 \text{ с},$$

где $t_{\text{с.з.тр.вн.}} = 2,1$ с – время срабатывания резервной защиты трансформатора со стороны обмотки ВН.

Е.4 Результаты выбора уставок дифференциальной защиты токоограничивающего реактора

В таблицу Е.1 сведены уставки дифференциальной защиты с торможением токоограничивающего реактора, рассчитанные выше.

Таблица Е.1 - Уставки защиты

Уставки	Обозначение	Значение
Ток срабатывания ДТО, о.е.	$I_{\text{дто}}$	4,2
Начальный ток срабатывания ДЗТ, о.е.	$I_{\text{дзт нач.}}$	0,3
Коэффициент торможения второго участка ДЗТ	$k_{\text{торм.2}}$	0,2
Коэффициент торможения третьего участка ДЗТ	$k_{\text{торм.3}}$	0,43
Ток сигнализации небаланса, о.е.	$I_{\text{нб синг.}}$	0,2
Время срабатывания сигнализации небаланса, с	$t_{\text{нб сигн.}}$	3,15

Приложение Ж

Пример выбора уставок для токовой защиты нулевой последовательности с торможением

Ж.1 Исходные данные

Схема распределительного устройства [19, 20], для защиты, которого будут выбраны уставки токовой защиты нулевой последовательности с торможением, для БМРЗ-ТД [2], приведена на рисунок Ж.1.

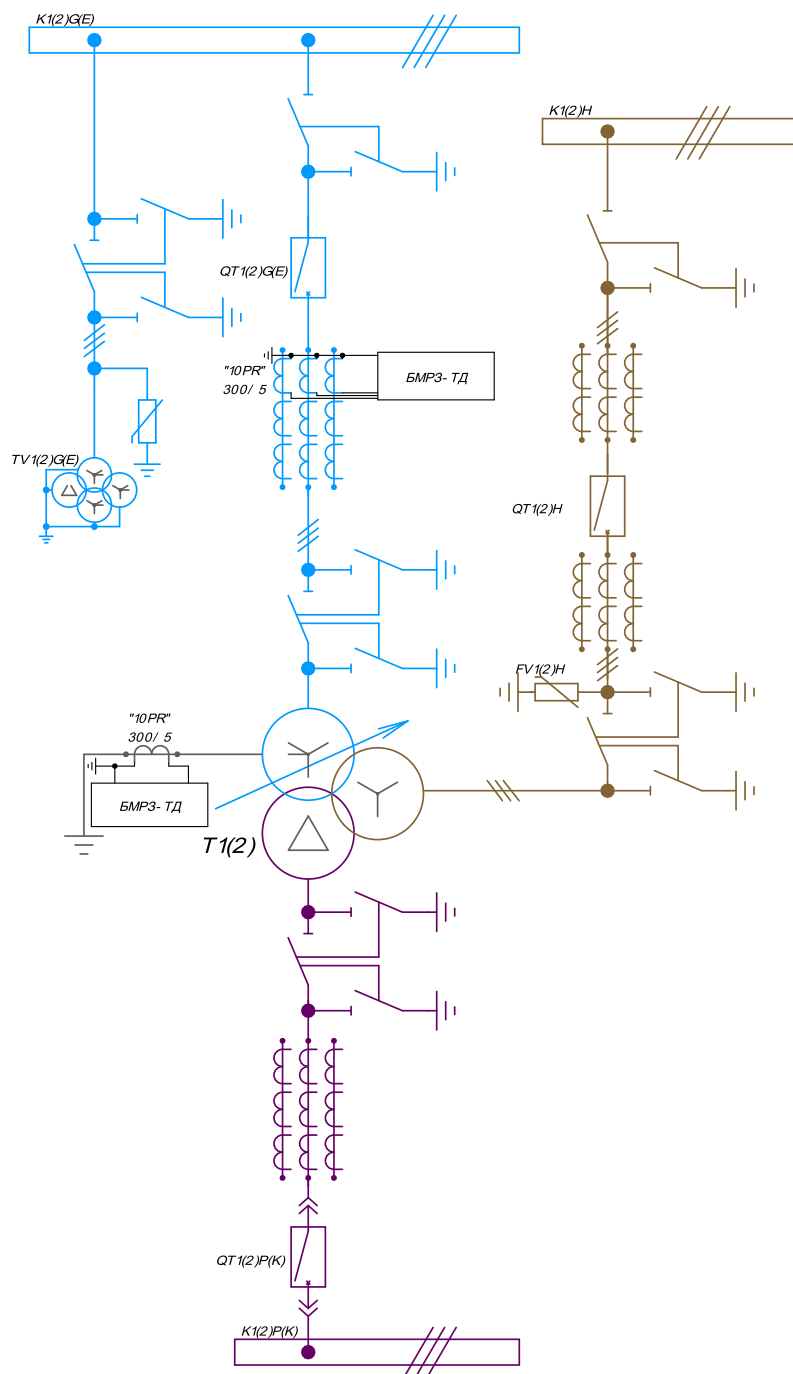


Рисунок. Ж.1 - Схема распределительного устройства с распределением по обмоткам трансформаторов тока токовой защиты нулевой последовательности с торможением

Токи коротких замыканий, приведенные к шинам 110 кВ, для которых производится расчет токовой защиты нулевой последовательности с торможением:

- в нормальном режиме работы энергосистемы (максимальный ток КЗ) $I_{\text{КЗ макс.}}^{(1)} = 1,84$ кА;

- в минимальном режиме работы энергосистемы (минимальный ток КЗ) $I_{\text{КЗ мин.}}^{(1)} = 1,39$ кА.

Характеристики трансформатора согласно [21]:

- тип - ТДТН-25000/110;

- схема и группа соединения обмоток - У_Н/У_Н/Д – 0 – 11;

- $S_{\text{ном.тр.}} = 25$ МВ·А – номинальная мощность;

- $U_{\text{тр.вн ном.}} = 115$ кВ – номинальное напряжение стороны ВН.

Коэффициенты трансформации трансформаторов тока стороны ВН

$$k_{\text{ТТ ВН}} = \frac{I_{\text{ном. вн ТТ}}}{I_{\text{ном. вн ТТ ВТ}}} = \frac{300}{5} = 60,$$

где $I_{\text{ном. вн ТТ}} = 300$ А – номинальный первичный ток ТТ стороны ВН силового трансформатора;

$I_{\text{ном. вн ТТ ВТ}} = 5$ А – номинальный вторичный ток ТТ.

Номинальный ток трансформатора, со стороны ВН при среднем положении РПН

$$I_{\text{ном тр.вн}} = \frac{S_{\text{ном.тр.}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{тр.вн ном.}}} = \frac{25 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 115 \cdot 10^3} = 125,5 \text{ А.}$$

Ж.2 Выбор уставки токовой защиты нулевой последовательности с торможением

Уставка по току срабатывания ТЗНПТ

$$I_{\text{ТЗНПТ}} = 0,15 \cdot I_{\text{ном тр.вн}} = 18,83 \text{ А.}$$

Вторичное значение уставка по току срабатывания ТЗНПТ

$$I_{\text{ТЗНПТ вт.}} = \frac{I_{\text{ТЗНПТ}}}{k_{\text{ТТ ВН}}} = \frac{18,83}{60} \approx 0,31,$$

в БМРЗ-ТД нельзя выставить уставку менее $I_{\text{ТЗНПТ вт. мин.}} = 0,25$ А вторичного тока

$$I_{\text{ТЗНПТ вт.}} \geq I_{\text{ТЗНПТ вт. мин.}}$$

$$0,31 > 0,25.$$

Проверка чувствительности ТЗНПТ

$$k_{\text{чув.}} = \frac{I_{\text{КЗ мин.}}^{(1)}}{I_{\text{ТЗНПТ}}} = \frac{1,39 \cdot 10^3}{18,83} = 73,94.$$

Уставка блокировки ТЗНПТ при БТН по содержанию второй гармоники в токе ТЗНПТ 15 % от тока первой гармоники тока нулевой последовательности

$$k_{\text{гармон.2}} = 0,15.$$

Ж.3 Результаты выбора уставок токовой защиты нулевой последовательности с торможением

В таблицу Ж.1 сведены уставки токовой защиты нулевой последовательности с торможением, рассчитанные выше.

Таблица Ж.1 - Уставки защиты

Уставки	Обозначение	Значение
Уставка срабатывания ТЗНПТ по току нейтрали, $I_{ном}$ о.е.	$I_{ТЗНПТ}$	0,31
Уставка блокировки ТЗНПТ при броске тока намагничивания	$k_{гармон.2}$	0,15

Список использованной литературы

1. Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ-153-УЗТ-53. Руководство по эксплуатации. Часть 2 ДИВГ.648228.097-04.06 РЭ1.
2. Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ-ТД-52. Руководство по эксплуатации. Часть 2 ДИВГ.648228.080-04.04 РЭ1.
3. Правила устройства электроустановок (7-е издание). - М.: ЗАО «Энергосервис», 2008.
4. Голанцов Е.Б., Молчанов В.В. Дифференциальные защиты трансформаторов с реле типа ДЗТ-21 (ДЗТ-23). – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 88 с.: ил. – (Б-ка электромонтёра; Вып. 631).
5. Засыпкин А.С. Релейная защита трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1989, - 240 с.
6. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 13Б. Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110 – 500 кВ: Расчёты. – М.: Энергоатомиздат, 1985, - 96 с., ил.
7. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007.
8. Циглер Г. Цифровые устройства дифференциальной защиты. Принципы и область применения: пер. с англ. / под ред. чл.-корр. РАН А.Ф. Дьякова. – М.: Энергоиздат, 2008. – 273.
9. Александров А.М. Дифференциальные защиты трансформаторов: учебное пособие. – СПб.: ПЭИПК, 2011. – 223 с.
10. Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем. Учебник для вузов. М., «Энергия», 1976 г. 560 с.
11. РД 153-34.0-35.301-2002. Инструкция по проверке трансформаторов тока, используемых в схемах релейной защиты и измерения.
12. Засыпкин А.С. Релейная защита трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1989.
13. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 12. Токовая защита нулевой последовательности от замыканий на землю линий 110 – 500 кВ. Расчеты. – М.: Энергия, 1980.
14. Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ-ДЗШ-51. Руководство по эксплуатации. Часть 2 ДИВГ.648228.080-08.04 РЭ1.
15. Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ-ДЗШ-52. Руководство по эксплуатации. Часть 2 ДИВГ.648228.080-08.03 РЭ1.

16. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 6. Устройства резервирования при отказе выключателей 35—500 кВ. М. - Л., «Энергия», 1966.
17. Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ-ЗШД-01. Руководство по эксплуатации. Часть 2 ДИВГ.648228.080-42.01 РЭ1
18. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 3. Защита шин 6-220 кВ станций и подстанций. Расчеты. М.– Л., Госэнергоиздат, 1961.
19. Обозначение проектных функциональных групп №10259ТМ-Т1. Руководство по выполнению обозначений проектных функциональных групп гидроэлектростанций и подстанций. Министерство Энергетики и Электрификации СССР ГЛАВНИИПРОЕКТ Ордена Октябрьской Революции Всесоюзный Государственный Проектно-Изыскательский и Научно-исследовательский Институт Энергетических Систем и Электрических Линий «Энергосетьпроект» - М. 1980. 33с. ил.
20. СТО 56947007-25.040.70.101-2011 Правила оформления нормальных схем электрических соединений подстанций и графического отображения информации посредством ПТК и АСУ ТП.
21. ГОСТ 12965-85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения классов напряжения 110 и 150 кВ.
22. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ. – М.: Энергия, 1979. 152 с. ил.
23. ГОСТ 721-77 Системы электроснабжения сети, источники, преобразователи и приемники электроэнергии. Номинальные напряжения свыше 1000 В.
24. Небрат И.Л., Полесицкая Т.П. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты: учебное пособие. – Спб.: ПЭИПК, 2018. – 56 с. ч.1.
25. ГОСТ 7746-2015 Трансформаторы тока. Общие технические условия.
26. ГОСТ Р МЭК 61869-2-2015 трансформаторы измерительные. Часть 2. Дополнительные требования к трансформаторам тока.