

Рекомендации
по выбору уставок устройства защиты трехобмоточного
трансформатора «Сириус-ТЗ»
(для версий 3.00 и новее)

1 Краткое описание устройства

1.1 Устройство микропроцессорной защиты «Сириус-ТЗ» (в дальнейшем – устройство), предназначено для выполнения функций основной защиты трехобмоточного (либо двухобмоточного с расщепленной обмоткой) трансформатора или автотрансформатора с высшим напряжением 35-220 кВ [2]. Также возможно использование в качестве продольной дифференциальной защиты ошиновки с тремя присоединениями.

Данные рекомендации по выбору уставок предназначены для устройств с версией программного обеспечения 3.00 и новее.

1.2 Устройство подключается к вторичным цепям ТТ, установленным с трех сторон защищаемого трансформатора (автотрансформатора). В зависимости от типа исполнения устройства [2] (оговаривается при заказе) возможно подключение к следующим комбинациям вторичных номинальных токов ТТ:

5 / 5 / 5 – ТТ стороны ВН – 5 А, ТТ стороны СН – 5 А, ТТ стороны НН – 5 А;

1 / 1 / 1 – ТТ стороны ВН – 1 А, ТТ стороны СН – 1 А, ТТ стороны НН – 1 А;

1 / 5 / 5 – ТТ стороны ВН – 1 А, ТТ стороны СН – 5 А, ТТ стороны НН – 5 А;

1 / 1 / 5 – ТТ стороны ВН – 1 А, ТТ стороны СН – 1 А, ТТ стороны НН – 5 А.

Рекомендуется включение ТТ на всех сторонах трансформатора (автотрансформатора) по схеме «звезда». Выравнивание величины и фазы токов производится цифровым способом внутри устройства.

Используемые ТТ должны быть проверены стандартными расчетами на соответствие требованиям, предъявляемым к ТТ, питающим токовые цепи устройств релейной защиты [1, 5]. ТТ должны соответствовать ГОСТ 7746-2001, иметь класс точности 5Р или 10Р с номинальной кратностью $K_{10\text{НОМ}}$ не менее 20.

В тех случаях, когда условие по номинальной кратности ТТ не выполняется, необходимо попробовать использовать меры по увеличению значения предельной кратности:

— увеличить первичный номинальный ток ТТ;

— снизить нагрузку на вторичные цепи ТТ.

1.3 Продольная дифференциальная защита имеет две ступени: ДЗТ-1 (быстродействующая дифференциальная токовая отсечка) и ДЗТ-2 (чувствительная дифференциальная токовая защита с торможением от сквозного тока и отстройкой от бросков тока намагничивания (БНТ)).

Также предусмотрен контроль небаланса в плечах дифференциальной защиты с действием на сигнализацию (ДЗТ-3).

1.4 В устройстве формируются дифференциальные и тормозные токи (с учетом принятых положительных направлений токов в трансформаторе, рисунок 1).

Дифференциальный ток рассчитывается по выражению (1):

$$I_{\text{диф}} = |I_1 + I_2 + I_3| \quad (1)$$

Также рассчитывается тормозной ток, который формируется с учетом реального направления протекания токов в защищаемом трансформаторе. Такой способ формирования тормозного тока называется «*направленным торможением*». Расчет производится на основе соотношений (2):

$$\begin{aligned}
I_1' &= \text{МАКСИМУМ}(I_1, I_2, I_3); \\
I_2' &= I_{\text{ДИФ}} - I_1' = I_1 + I_2 + I_3 - I_1'; \\
\varphi &= \text{arg}(I_1'; -I_2'); \\
\text{для } \cos\varphi > 0 \quad I_{\text{ТОРМ}} &= \sqrt{I_1' \times I_2' \cos\varphi}; \\
\cos\varphi \leq 0 \quad I_{\text{ТОРМ}} &= 0.
\end{aligned}
\tag{2}$$

Принятый способ формирования тормозного тока обеспечивает правильное функционирование защиты и при одностороннем, и при многостороннем питании защищаемого трансформатора (автотрансформатора).

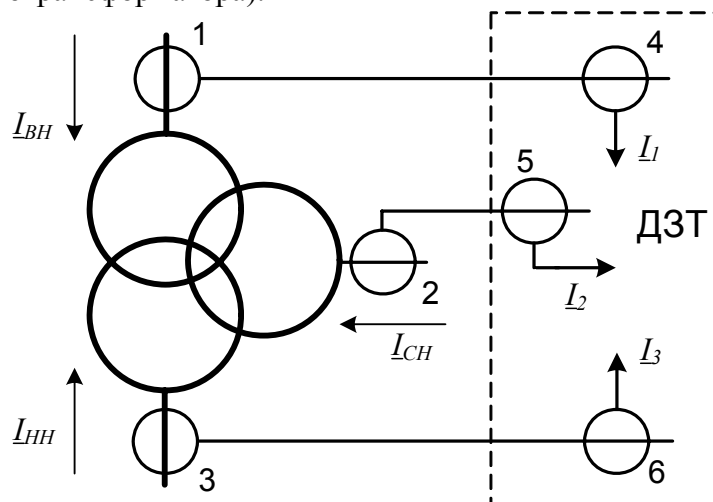


Рисунок 1 – Принятые положительные направления токов в трансформаторе: 1, 2 и 3 – измерительные ТТ сторон ВН, СН и НН; 4, 5 и 6 – цифровые ТТ внутри устройства.

1.5 Устройство содержит функцию автоматической компенсации токов небаланса в дифференциальной цепи, вносимых работой РПН. Алгоритм основывается на учете реального коэффициента трансформации силового трансформатора, рассчитанного на основе токов в нагрузочном режиме. Подробное описание функции можно найти в [2].

Одним из недостатков данного способа компенсации является невозможность работы в некоторых режимах, например, при отсутствии токов нагрузки. Поэтому в устройстве для ступеней защит (ДЗТ-1 и ДЗТ-2), использующих дифференциальный ток, предусмотрены две группы уставок – «чувствительные» и «грубые». Во всех режимах, когда алгоритм компенсации не действует (выведен из действия, либо измерение не возможно) используются грубые уставки. Если компенсация погрешности РПН успешно выполнена, то устройство автоматически переходит на чувствительные уставки.

Особенности выбора чувствительных и грубых уставок приведены в разделе 2 данных рекомендаций.

1.6 Тормозная характеристика ступени ДЗТ-2 изображена на рисунке 2. Она построена в относительных единицах, то есть токи приведены к базисному току стороны ВН.

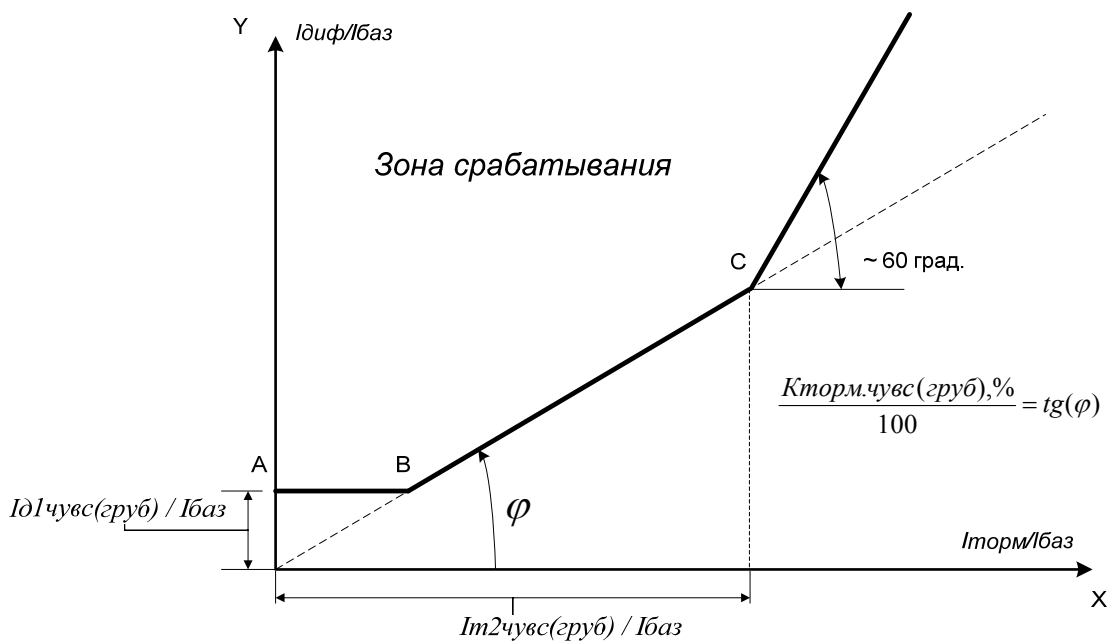


Рисунок 2 – Тормозная характеристика ступени ДЗТ–2

Тормозная характеристика определяется уставками:

« $I_{д1чувс(груб)}/I_{баз}$ » – минимальный дифференциальный ток (отнесенный к $I_{баз}$) срабатывания;

« $K_{торм.чувс(груб), \%}$ » – коэффициент торможения второго участка характеристики;

« $I_{т2чувс(груб)}/I_{баз}$ » – точка второго излома характеристики.

В качестве базисного тока в устройстве принято значение уставки « $I_{баз.ВН}$ ».

Характеристика имеет три участка:

УЧАСТОК 1 (отрезок А – В): точка В (точка первого излома характеристики) получается как пересечение уставки «ДЗТ-2 – $I_{д1чувс(груб)}/I_{баз}$ » с прямой, проходящей через начало координат и точку С. На данном участке дифференциальный ток, необходимый для отключения, постоянный.

УЧАСТОК 2 (между точками В и С): точка С определяется двумя уставками – наклоном прямой «ДЗТ-2 – $K_{торм.чувс(груб), \%}$ » и «ДЗТ-2 – $I_{т2чувс(груб)}/I_{баз}$ ».

УЧАСТОК 3 (правее точки С): начало лежит в точке С, наклон участка постоянен и равен 60 градусам.

1.7 Блокировка ступени ДЗТ-2 при БНТ основывается на контроле отношения действующего значения второй гармоники к действующему значению первой гармоники дифференциального тока. Порог срабатывания блокировки определяется уставкой « $I_{дг2}/I_{дг1}$ ».

2 Выбор уставок дифференциальной токовой защиты

2.1 Расчет общих уставок

Выбору подлежат:

*I*_{баз.ВН} – базисный ток стороны ВН, который принимается равным номинальному вторичному току стороны ВН трансформатора;

*I*_{баз.СН} – базисный ток стороны СН, который принимается равным номинальному вторичному току стороны СН трансформатора;

*I*_{баз.НН} – базисный ток стороны НН, который принимается равным номинальному вторичному току стороны НН трансформатора;

Группа ТТ ВН – группа сборки цифровых ТТ на стороне ВН;

Группа ТТ СН – группа сборки цифровых ТТ на стороне СН;

Группа ТТ НН – группа сборки цифровых ТТ на стороне НН;

Размах РПН, % – размах регулирования РПН;

Сторона РПН – сторона силового трансформатора, на которой установлено устройство РПН.

ΔNступени, % – степень регулирования устройства РПН.

Уставки *I*_{баз.ВН}, *I*_{баз.СН}, *I*_{баз.НН}, *Размах РПН* можно выбирать либо исходя из полного размаха РПН и его среднего ответвления, либо исходя из реально возможных отклонений регулятора и некоторого оптимального напряжения *U*_{опт}. Понятие *U*_{опт} подробно рассмотрено в [1, п. 2.1.4]. Согласно указанному пункту *U*_{опт} характеризуется тем, что ему соответствуют равные по значению небалансы при крайних, реально возможных отклонениях регулятора в сторону увеличения (+*PO*_{max раб}) и в сторону уменьшения (-*PO*_{max раб}) напряжения регулируемой обмотки. Однако в [1] небалансы находятся для реле без торможения при расчетном внешнем КЗ. В случае защиты «Сириус-ТЗ» небалансы следует стремиться снизить в пределах первого и второго участков тормозной характеристики, на относительно небольших сквозных токах. В этих условиях понятие оптимального ответвления сводится к понятию середины реально используемого диапазона регулирования РПН.

Значение степени регулирования устройства РПН указывается в паспортных данных на силовой трансформатор и задается в качестве уставки «*ΔNступени, %*». Стоит отметить, что *ΔNступени* в паспортных данных на автотрансформатор с РПН «в расщелке» может быть приведена как к стороне ВН, так и к стороне СН. В соответствии с этим необходимо задавать значение уставки «*Сторона РПН*» – «*НейтрВН*», либо «*НейтрСН*».

Номинальные токи сторон силового трансформатора определяются по выражению:

$$I_{НОМ.ПЕРВ.} = \frac{S_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ.СР}}, \quad (3)$$

где *S*_{НОМ} – номинальная мощность трансформатора;

*U*_{НОМ, СР} – номинальное напряжение стороны в среднем положении РПН, либо напряжение при среднем значении оптимального диапазона регулирования РПН (см. выше).

Расчет вторичных номинальных токов сторон, соответствующих номинальной мощности трансформатора, производится по выражению:

$$I_{НОМ, ВТОР.} = \frac{I_{НОМ ПЕРВ.} \cdot k_{СХ}}{K_I}, \quad (4)$$

где *K*_I – коэффициент трансформации ТТ соответствующей стороны;

*k*_{СХ} – коэффициент схемы, учитывающий схему соединения вторичных обмоток ТТ.

При штатном подключении устройства к ТТ, обмотки которых собраны по схеме «звезда», коэффициент схемы *k*_{СХ} принимается равным 1. В тех случаях, когда вопреки ре-

комендациям необходимо подключение устройства к ТТ со сборкой вторичных цепей в «треугольник» коэффициент $k_{СХ}$ принимается равным $\sqrt{3}$.

Полученные значения $I_{НОМ. ВТОР.}$ принимаются в качестве базисных токов соответствующих сторон трансформатора и задаются с помощью уставок «*Баз.ВН*», «*Баз.СН*» и «*Баз.НН*».

Расчитанные базисные токи сторон необходимо проверить на попадание в допустимый диапазон выравнивания, определяемый номинальным током входа устройства. Базисные токи должны входить в диапазон:

для входа с $I_{НОМ} = 1$ А: (0,20 – 2,00) А;

для входа с $I_{НОМ} = 5$ А: (1,01 – 10,00) А.

Если базисный ток не попадает в указанный диапазон, то не обеспечивается необходимая точность выравнивания токов и использование защиты недопустимо. В этом случае возможны варианты решения проблемы:

а) изменение коэффициента трансформации ТТ (если это возможно по другим условиям);

б) использование в токовых цепях внешних выравнивающих автотрансформаторов (например, АТ-31 или АТ-32);

в) возможно изменение номинальных токов (1 А или 5 А) входов устройства непосредственно у потребителя по согласованию и инструкции завода-изготовителя.

2.2 Расчет уставок чувствительной дифференциальной защиты (ДЗТ-2)

2.2.1 Выбору подлежат:

$I_{д1чувс(груб)}/I_{баз}$ – базовая уставка чувствительной (грубой) характеристики ступени;
 $K_{торм.чувс(груб)}$, % – коэффициент торможения (определяет наклон второго участка чувствительной (грубой) характеристики ступени;

$I_{т2чувс(груб)}/I_{баз}$ – вторая точка излома чувствительной (грубой) тормозной характеристики;

$I_{д2}/I_{д21}$ – уставка блокировки от второй гармоники.

2.2.2 **Базовая уставка дифференциального тока срабатывания на горизонтальном участке без торможения $I_{д1}/I_{баз}$** определяет чувствительность рассматриваемой ступени защиты. Согласно [3] следует стремиться иметь уставку в пределах (0,3 – 0,5) для обеспечения чувствительности к полным витковым замыканиям в переплетенных обмотках и к межкатушечным замыканиям в любых обмотках.

Значение $I_{д1чувс(груб)}/I_{баз}$ выбирается по условию отстройки от тока небаланса при протекании номинального (базисного) тока трансформатора:

$$I_{диф}/I_{баз} \geq K_{отс} I_{НБ РАСЧ. *} \quad (5)$$

где $K_{отс}$ – коэффициент отстройки, принимается равным 1,2;

$I_{НБ РАСЧ. *}$ – относительный ток небаланса в нормальном режиме работы защищаемого трансформатора.

Согласно [1] расчетный ток небаланса, порождаемый сквозным током, состоит из трех составляющих:

$$I_{НБ РАСЧ. *} = K_{ПЕР} K_{ОДН} \cdot \varepsilon + \Delta U_{РПН} + \Delta f_{ДОБАВ} \quad (6)$$

В первом слагаемом (обусловленным погрешностями ТТ):

$K_{ПЕР}$ – коэффициент, учитывающий переходный режим;

$K_{ОДН}$ – коэффициент однотипности трансформаторов тока, принимается равным 1,0;

ε – относительное значение полной погрешности трансформаторов тока в установившемся режиме, в соответствии с [1] принимается 0,05.

Несмотря на относительно небольшие уровни сквозных токов в [4] рекомендуется принимать $K_{ПЕР} = 2,5$, если доля двигательной нагрузки в общей нагрузке трансформатора более 50% или $K_{ПЕР} = 2,0$, если доля двигательной нагрузки менее 50%.

Второе слагаемое обусловлено наличием РПН. При расчете уставок грубой тормозной характеристики принимается случай недействия подстройки под текущее положение РПН и $\Delta U_{РПН}$ принимается равным полному размаху РПН.

Когда подстройка функционирует составляющая $\Delta U_{РПН}$ не превышает 4%. Поэтому при расчете уставок чувствительной тормозной характеристики принимаем $\Delta U_{РПН} = 0,04$.

Третье слагаемое обусловлено неточностью задания номинальных токов сторон трансформатора – округлением при установке, а также некоторыми метрологическими погрешностями, вносимыми элементами устройства. По данным фирмы-изготовителя расчетное значение можно принимать $\Delta f_{ДОБАВ} = 0,04$.

Если полученное по выражению (6) значение меньше 0,3, то необходимо принять $I_{диф}/I_{баз} = 0,3$.

2.2.3 Коэффициент торможения $K_{ТОРМ}$ должен обеспечить несрабатывание ступени при сквозных токах, соответствующих второму участку тормозной характеристики (примерно от 1,0 до 3,0 $I_{баз}$). Такие токи возможны при действии устройств АВР трансформаторов, АВР секционных выключателей, АПВ питающих линий.

Рассчитываются значения $K_{ТОРМ ЧУВС}$ и $K_{ТОРМ ГРУБ}$ – для чувствительной и грубой тормозных характеристик соответственно.

Если по защищаемому трансформатору проходит сквозной ток $I_{СКВ}$, он может вызвать дифференциальный ток, который равняется току небаланса:

$$I_{диф} = I_{НБ РАСЧ.} = (K_{ПЕР} K_{ОДН} \cdot \varepsilon + \Delta U_{РПН} + \Delta f_{ДОБАВ}) \cdot I_{СКВ}, \quad (7)$$

где ε – относительное значение полной погрешности ТТ в установившемся режиме (для ТТ класса 10Р принимается значение 0,1, для 5Р – 0,05).

Остальные коэффициенты принимаются в соответствии с п. 2.2.2.

Необходимо отметить, что при расчете уставки $K_{ТОРМ. ГРУБ}$ грубой тормозной характеристики принимается случай недействия подстройки под текущее положение РПН и $\Delta U_{РПН}$ принимается равным полному размаху РПН.

Когда подстройка функционирует составляющая $\Delta U_{РПН}$ не превышает 4%. Поэтому при расчете уставки $K_{ТОРМ. ЧУВС}$ чувствительной тормозной характеристики принимаем $\Delta U_{РПН} = 0,04$.

Ток небаланса приведенный к сквозному току:

$$I_{НБ РАСЧ.}^* = (K_{ПЕР} K_{ОДН} \cdot \varepsilon + \Delta U_{РПН} + \Delta f_{ДОБАВ}). \quad (8)$$

Дифференциальный ток рассчитывается как геометрическая сумма трех токов, подходящих с трех сторон трансформатора:

$$I_{диф} = | \underline{I}_1' + \underline{I}_2' + \underline{I}_3' |.$$

Значок “штрих” подчеркивает, что все токи взяты на входе дифференциальной цепи, то есть с учетом масштабирования в измерительных и цифровых трансформаторах тока и выравнивания вторичных токов. В сущности это соответствует приведению всех первичных токов к одной ступени напряжения.

Для формирования тормозного тока вначале из токов трех сторон выбирается наибольший по модулю:

$$I_{T1} = MAX(I_1', I_2', I_3').$$

Затем рассчитывается второй ток:

$$\underline{I}_{T2} = \underline{I}_{диф} - \underline{I}_{T1}.$$

Рассчитывается угол φ :

$$\varphi = arg(\underline{I}_{T1}'; -\underline{I}_{T2}');$$

После этого получаем тормозной ток по следующим выражениям:

$$\begin{aligned} \cos\varphi > 0 \quad I_T &= \sqrt{I_{T1} \cdot I_{T2} \cdot \cos\varphi}; \\ \cos\varphi \leq 0 \quad I_T &= 0. \end{aligned}$$

Если при внешнем КЗ со сквозным током $I_{СКВ}$ дифференциальный ток образовался из-за погрешности в трансформации наибольшего из токов $I_{Т1}$, то тормозной ток равен:

$$I_{ТОРМ} = \sqrt{I_{СКВ} (I_{СКВ} - I_{ДИФ})} = I_{СКВ} \sqrt{1 - (K_{ПЕР} K_{ОДН} \cdot \varepsilon + \Delta U_{РПН} + \Delta f_{ДОБАВ})} = I_{СКВ} \sqrt{1 - I_{НБ.РАСЧ.}^*}.$$

Введем, по аналогии с [4] понятие коэффициента снижения тормозного тока:

$$K_{СН.Т.} = I_{ТОРМ} / I_{СКВ} = \sqrt{1 - I_{НБ.РАСЧ.}^*} \quad (9)$$

Чтобы реле не сработало, коэффициент торможения в процентах должен определяться по выражению:

$$\begin{aligned} K_{ТОРМ ЧУВС (ГРУБ)} \geq 100 I_{ДИФ} / I_{ТОРМ} &= 100 \cdot K_{ОТС} (K_{ПЕР} K_{ОДН} \varepsilon + \Delta U_{РПН} + \Delta f_{ДОБАВ}) / K_{СН.Т.} = \\ &= 100 \cdot K_{ОТС} \cdot I_{НБ.РАСЧ.}^* / \sqrt{1 - I_{НБ.РАСЧ.}^*}, \end{aligned} \quad (10)$$

где $K_{ОТС}$ – коэффициент отстройки, принимается равным 1,2;

Значение $\Delta U_{РПН}$ принимается равным 0,04 при расчете $K_{ТОРМ ЧУВС}$ и равно размаху регулирования РПН при расчете $K_{ТОРМ ГРУБ}$. Аналогичным образом учитывается значение $\Delta U_{РПН}$ при расчете $I_{НБ.РАСЧ.}$

2.2.4 Вторая точка излома тормозной характеристики $Im2/Iбаз$ определяет размер второго участка тормозной характеристики. В нагрузочном и аналогичных режимах тормозной ток равен сквозному. Появление витковых КЗ лишь незначительно изменяет первичные токи, поэтому тормозной ток почти не изменится. Для высокой чувствительности к витковым КЗ следует, чтобы во второй участок попал режим номинальных нагрузок ($Im/Iбаз = 1$), режим допустимых длительных перегрузок ($Im/Iбаз = 1,3$). Желательно, чтобы во второй участок попали и режимы возможных кратковременных перегрузок (самозапуск двигателей после АВР, пусковые токи мощных двигателей, если таковые имеются). Поэтому рекомендуются уставки для чувствительной и грубой характеристик срабатывания:

$$Im2чувс/Iбаз = Im2груб/Iбаз = 1,5 - 2.$$

2.2.5 Первая точка излома тормозной характеристики (проекция точки «В» на ось X на рисунке 2) вычисляется в устройстве автоматически и равна:

$$Im1чувс(груб)/Iбаз = (Id1чувс(груб)/Iбаз) \cdot 100 / K_{Торм.чувс(груб)} \quad (11)$$

При больших уставках ($Id1чувс(груб)/Iбаз$) следует убедиться, что первая точка не заходит за вторую: $Im1чувс(груб)/Iбаз < Im2чувс/Iбаз$.

2.2.6 Уставка блокировки по второй гармонике $Id2/Id21$ на основании опыта фирм, давно использующих такие защиты, рекомендуется на уровне 12-15%.

2.3 Расчет уставок дифференциальной токовой отсечки (ДЗТ-1)

2.3.1 Выбору подлежит:

$Idиф.чувс/Iбаз$ – относительное значение чувствительной уставки срабатывания отсечки;

$Idиф.груб/Iбаз$ – относительное значение грубой уставки срабатывания отсечки.

Согласно [1] уставка должна выбираться из двух условий:

– отстройки от тока при БНТ;

– отстройки от максимального первичного тока небаланса при переходном режиме расчетного внешнего КЗ.

2.3.2 Для обеспечения отстройки от БНТ необходимо выполнение условия [1]:

$$Idиф/Iбаз \geq 6 \quad (12)$$

Отсечка реагирует как на первую гармонику дифференциального тока, так и на мгновенные значение этого же тока. Уставка по мгновенному значению равна $2,5 \cdot I_{диф}/I_{баз}$. Выполнение условия (12) автоматически обеспечивает недействие дифференциальной отсечки по мгновенному значению при БНТ.

2.3.3 Расчетное выражение для отстройки от тока небаланса при внешнем КЗ [1]:

$$I_{диф}/I_{баз} \geq K_{отс} (K_{пер} K_{одн} \cdot \varepsilon + \Delta U_{рпн} + \Delta f_{добав}) I_{кз вн. макс.} * \quad (13)$$

где $K_{отс}$ – коэффициент отстройки принимается равным 1,5;

$K_{пер}$ – коэффициент, учитывающий переходный режим, принимается 3,0.

Остальные коэффициенты аналогичны коэффициентам из формулы (6).

2.3.4 Дифференциальная отсечка предназначена для резервирования основной ступени ДЗТ-2 при повреждениях с большими аварийными токами, поэтому чувствительные и грубые уставки принимаются равными по величине и определяются по выражениям (12, 13).

2.4 Сигнализация небаланса в плечах дифференциальной защиты (ДЗТ-3)

Уставка по току выбирается меньше, чем минимальная уставка чувствительной ступени ДЗТ-2 ($I_{д1}/I_{баз}$), а уставка по времени порядка нескольких секунд, что позволяет выявлять неисправности в токовых цепях дифференциальной защиты.

Рекомендуемые значения уставок: $I_{д}/I_{баз} = 0,1$; $T, с = 10$.

3 Пример расчета дифференциальной защиты трехобмоточного трансформатора

3.1 Исходные данные для расчета соответствует примеру 3.3 из [1].

Трехобмоточный трансформатор ТДТН 115 ($\pm 9 \times 1,77 = 16\%$) / 38,5 / 11 (кВ) мощностью 40 МВ·А. РПН установлен в нейтрали обмотки ВН. Сборка обмоток Yud-0-11. Коэффициент трансформации ТТ на стороне ВН – 400/5; на стороне СН – 1500/5; на стороне НН – 3000/5. ТТ собраны по схеме «звезда» со всех сторон трансформатора. Класс точности – 10Р.

Трансформатор установлен на двухтрансформаторной подстанции. Питание имеется только со стороны ВН, на сторонах ВН и СН трансформаторы работают параллельно. На стороне НН имеется расщепленный реактор, входящий в зону дифференциальной защиты. Первичная схема подстанции, схема замещения и токораспределение в расчетных режимах взяты с рисунка 3.4 из [1] и приведены на рисунке 3.

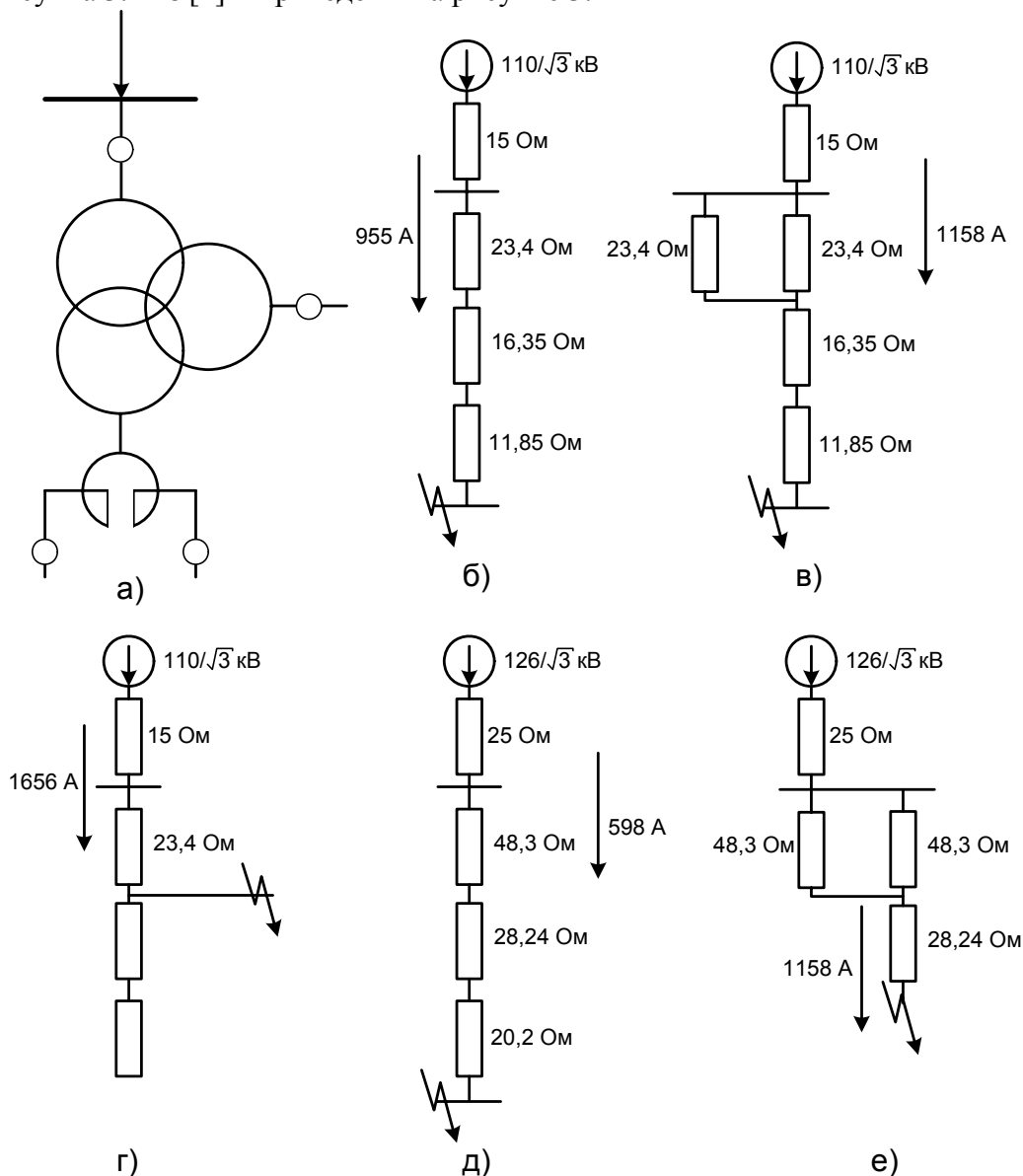


Рисунок 3 – Первичная схема (а),
схемы для расчета токов КЗ на стороне НН (б, в, д, е) и на стороне СН (г)

3.2 Выбор общих параметров дифференциальной защиты

В [1] за реально возможный диапазон регулирования напряжения принят диапазон от 96,5 кВ до 126 кВ. В таком случае середина диапазона равна:

$$96,5 + (126 - 96,5) / 2 = 111,25 \text{ кВ.}$$

Это значение и принимаем за $U_{ОПТ}$. Дальнейший расчет сведен в таблицу 1.

Таблица 1 – Расчет уставок, определяющих вторичные токи в плечах защиты, соответствующие номинальной мощности защищаемого трансформатора

Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовое значение для стороны		
		ВН	СН	НН
Первичный ток на сторонах защищаемого трансформатора, соответствующий его номинальной мощности, А	$I_{НОМ ПЕРВ} = \frac{S_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ,СР}}$	$\frac{40000}{111,25\sqrt{3}} = 208$	$\frac{40000}{38,5\sqrt{3}} = 600$	$\frac{40000}{11\sqrt{3}} = 2102$
Коэффициент трансформации трансформатора тока	$K_I (I_{ПЕРВ.ТТ} / I_{ВТОР.ТТ})$	400/5	1500/5	3000/5
Схема соединения трансформаторов тока (электрических)	Y, D	Y	Y	Y
Вторичный ток в плечах защиты, соответствующий номинальной мощности защищаемого трансформатора, А	$I_{НОМ ВТОР} = \frac{I_{НОМ ПЕРВ}}{K_I} \cdot k_{СХ}$	$\frac{208 \cdot 1}{400/5} = 2,6$	$\frac{600 \cdot 1}{1500/5} = 2$	$\frac{2102 \cdot 1}{3000/5} = 3,5$
Принятые значения уставок (округление до двух знаков после запятой)	«Iбаз ВН», «Iбаз СН», «Iбаз НН» диапазон уставок: (0,15—15,00) А	2,60	2,00	3,50
Группа соединения измерительных ТТ (0 или 6 – в зависимости от места сборки нейтрали звезды ТТ)	—	0	0	0
Группа соединения цифровых ТТ (0 / 1 / 5 / 6 / 7 / 11)	—	11	11	0
Принятые значения уставок (выбираются в соответствии со значениями двух предыдущих строк таблицы)	«Группа ТТ ВН», «Группа ТТ СН», «Группа ТТ НН», диапазон значений: (0 / 1 / 5 / 6 / 7 / 11)	11	11	0
Размах РПН, %	Размах РПН	$100 \cdot (126 - 96,5) / (2 \cdot 111,25) = 13$		

Рассчитанные базисные токи сторон проверяем на попадание в допустимый диапазон выравнивания, определяемый номинальным током входа устройства. Для $I_{НОМ} = 5А$ базисные токи должны входить в диапазон: (1,01 – 10,00) А. Значения 2,60; 2,00 и 3,50 укладываются в указанный диапазон.

С учетом реально используемого диапазона регулирования РПН, принимаем уставку «Размах РПН, %» равной 13.

Уставки «Группа ТТ ВН», «Группа ТТ СН» и «Группа ТТ НН» подбираются с учетом группы защищаемого трансформатора и групп сборки измерительных ТТ по таблицам, указанным в [2].

В соответствии с параметрами силового трансформатора принимаем значения уставок: «Сторона РПН – ВН»; «ΔN ступени, % – 1,77».

3.3 Выбор уставок дифференциальной защиты ДЗТ-2

При расчете уставок чувствительной тормозной характеристики принимаем, что благодаря действию алгоритма компенсации небаланса от работы РПН составляющая $\Delta U_{РПН}$ не превышает значение 0,04.

Таблица 2 – Расчет уставок чувствительной тормозной характеристики (с учетом действия компенсации небаланса от работы РПН)

Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовое значение
Расчетный ток небаланса при протекании тока равного базисному (в относительных единицах)	$I_{НБ\text{ РАСЧ.}*} = K_{ПЕР} K_{ОДН} \cdot \varepsilon + \Delta U_{РПН} + \Delta f_{ДОБАВ}$	$2,0 \cdot 1,0 \cdot 0,1 + 0,04 + 0,04 = 0,28$
Выбор уставки срабатывания	должно выполняться условие: $I_{д1\text{ чувс/Ибаз}} \geq K_{ОТС} I_{НБ\text{ РАСЧ.}*}$	$1,2 \cdot 0,28 = 0,34$
Принятое значение базовой уставки срабатывания	« $I_{д1\text{ чувс/Ибаз}}$ » диапазон уставки: (0,3—1,0) $I_{БАЗ}$	принимаем 0,4
Коэффициент снижения тормозного тока	$K_{СН.Т.} = \sqrt{1 - I_{НБ\text{ РАСЧ.}*}}$	$\sqrt{1 - 0,28} = 0,85$
Расчетный коэффициент торможения в процентах	$K_{ТОРМ} = 100 \cdot K_{ОТС} \cdot I_{НБ\text{ РАСЧ.}*} / K_{СН.Т.}$	$100 \cdot 1,2 \cdot 0,28 / 0,85 = 39,5$
Принятое значение уставки коэффициента торможения (округление до целого числа)	« $K_{ТОРМ.ЧУВС, \%}$ » диапазон уставки: (10—100) %	40
Принятое значение уставки второй точки излома	« $I_{м2\text{ чувс/Ином}}$ » рекомендуемый диапазон уставки: (1,0—2,0) $I_{НОМ}$	2,0
Принятое значение уставки блокировки по второй гармонике	$I_{д2}/I_{д1}$ диапазон уставки: (0,06—0,20)	0,15

При расчете уставок грубой тормозной характеристики исходя из реального диапазона регулирования РПН принимаем $\Delta U_{РПН} = 0,13$.

Таблица 3 – Расчет уставок грубой тормозной характеристики (без учета действия компенсации небаланса от работы РПН)

Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовое значение
Расчетный ток небаланса при протекании тока равного базисному (в относительных единицах)	$I_{НБ\text{ РАСЧ.}*} = K_{ПЕР} K_{ОДН} \cdot \varepsilon + \Delta U_{РПН} + \Delta f_{ДОБАВ}$	$2,0 \cdot 1,0 \cdot 0,1 + 0,13 + 0,04 = 0,37$
Выбор уставки срабатывания	должно выполняться условие: $I_{д1\text{ груб/Ибаз}} \geq K_{ОТС} I_{НБ\text{ РАСЧ.}*}$	$1,2 \cdot 0,37 = 0,44$
Принятое значение базовой уставки срабатывания	« $I_{д1\text{ груб/Ибаз}}$ » диапазон уставки: (0,3—1,0) $I_{БАЗ}$	принимаем 0,5
Коэффициент снижения тормозного тока	$K_{СН.Т.} = \sqrt{1 - I_{НБ\text{ РАСЧ.}*}}$	$\sqrt{1 - 0,37} = 0,79$
Расчетный коэффициент торможения в процентах	$K_{ТОРМ} = 100 \cdot K_{ОТС} \cdot I_{НБ\text{ РАСЧ.}*} / K_{СН.Т.}$	$100 \cdot 1,2 \cdot 0,37 / 0,79 = 56$
Принятое значение уставки коэффициента торможения (округление до целого числа)	« $K_{ТОРМ.ГРУБ, \%}$ » диапазон уставки: (10—100) %	56
Принятое значение уставки второй точки излома	« $I_{м2\text{ груб/Ином}}$ » рекомендуемый диапазон уставки: (1,0—2,0) $I_{НОМ}$	2,0

3.4 Выбор уставок дифференциальной отсечки (ДЗТ-1)

Согласно примера [1] для рассматриваемого трансформатора производим отстройку от срабатывания при КЗ на стороне НН (рисунок 2, в), а также при КЗ на стороне СН (рисунок 2, г). В соответствии с рекомендациями принимаем равными чувствительный и грубый пороги срабатывания ДЗТ-1.

Таблица 4 – Расчет уставок дифференциальной отсечки

Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовое значение для стороны	
		СН	НН
Максимальный ток внешнего КЗ, приведенный к стороне ВН, А	$I_{КЗ\text{ ВНЕШ. МАКС}}$	1158	1656
Расчетный ток максимального внешнего КЗ приведенный к номинальному току трансформатора (в относительных единицах)	$I_{КЗ\text{ ВНЕШ. МАКС}}^{*} = I_{КЗ\text{ ВНЕШ. МАКС}} / I_{\text{БАЗ. ВН}}$	$1158 / 208 = 5,6$	$1656 / 208 = 8,0$
Расчетный ток небаланса при внешнем КЗ	$I_{\text{НБ}} = K_{\text{ОТС}} (K_{\text{ПЕР}} K_{\text{ОДН}} \cdot \varepsilon + \Delta U_{\text{РПН}} + \Delta f_{\text{ДОБАВ}}) I_{КЗ\text{ ВН. МАКС.}}^{*}$	$1,5 \cdot (3 \cdot 0,1 + 0,13 + 0,04) \cdot 5,6 = 3,95$	$1,5 \cdot (3 \cdot 0,1 + 0,13 + 0,04) \cdot 8,0 = 5,64$
Выбор уставки срабатывания с учетом отстройки от БНТ и небаланса при внешнем КЗ	должно выполняться условие: $I_{\text{диф}}/I_{\text{баз}} \geq I_{\text{НБ}}$ и $I_{\text{диф}}/I_{\text{баз}} \geq 6$	принимаем значение 6,0	
Принятое значение уставки (округление до одного знака после запятой)	« $I_{\text{диф. чувс}}/I_{\text{баз}}$ » = « $I_{\text{диф. груб}}/I_{\text{баз}}$ » диапазон уставки: (4,0—30,0) $I_{\text{БАЗ}}$	6,0	

3.5 Проверка чувствительности дифференциальной защиты

Коэффициент чувствительности ДЗТ-2 должен быть больше 2 [1]. Для дифференциальных защит понижающих трансформаторов в качестве расчетного принимается двухфазное КЗ на выводах низшего напряжения. Как показывает опыт, в подавляющем большинстве случаев чувствительность обеспечивается и поэтому производить проверку не целесообразно. Для демонстрации ниже приводится пример расчета чувствительности.

Рассчитаем коэффициент чувствительности для рассматриваемой сети (рисунок 2, а). Расчет производится для грубых уставок.

Первичный ток срабатывания защиты при отсутствии торможения:

$$I_{С.З.} = I_{\text{НОМ}} \cdot (I_{\text{д}} I_{\text{груб}} / I_{\text{НОМ}}) = 208 \cdot 0,5 = 104 \text{ А.}$$

При проверке чувствительности защиты учитываем, что благодаря направленности торможения при внутренних КЗ тормозной ток отсутствует.

Чувствительность при двухфазном КЗ на стороне НН ниже реактора (рисунок 2, д):

$$K_{\text{Ч}} = 598 \cdot 0,87 / 104 = 5,0.$$

Чувствительность при двухфазном КЗ на стороне НН выше реактора (рисунок 2, е):

$$K_{\text{Ч}} = 941 \cdot 0,87 / 104 = 7,9.$$

Чувствительность при КЗ на стороне СН (рисунок 2, г):

$$K_{\text{Ч}} = 1656 / 104 = 15,9.$$

Поскольку защита трансформатора достаточно чувствительна при КЗ ниже реактора, установка самостоятельной защиты реактора не требуется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Руководящие указания по релейной защите. Вып.13Б. Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110-500 кВ: Расчеты. – М.: Энергоатомиздат, 1985, - 96 с.
- 2 Микропроцессорное устройство защиты «Сириус-Т3». Руководство по эксплуатации.– М.: ЗАО «РАДИУС Автоматика», 2010.
- 3 Засыпкин А.С. Релейная защита трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 240 с.
- 4 Рекомендации по применению и выбору уставок дифференциального модуля SPCD 3D53 реле SPAD 346C. SPAD 346C. Дифференциальное реле с торможением. Руководство пользователя и техническое описание.-АББ Реле – Чебоксары, 1999.
- 5 Методические указания по расчету уставок защит подстанционного оборудования производства ООО НПП «ЭКРА».– ОАО «ФСК ЕЭС»; ООО «Исследовательский центр «Бреслер»» – Чебоксары, 2009.