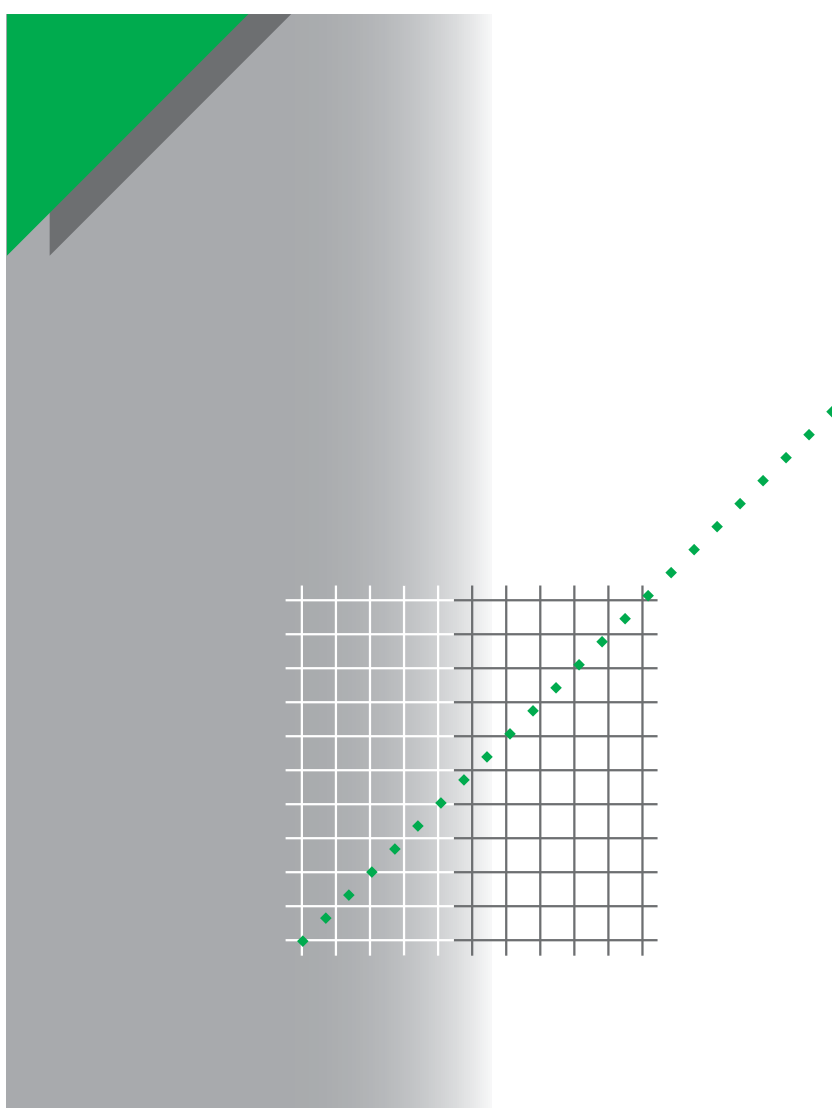


Выпуск № 9

Методика расчета уставок дифференциальной защиты трансформаторов (Серия Т87)



Компания Schneider Electric приступила к выпуску «Технической коллекции Schneider Electric» на русском языке.

***Техническая коллекция** представляет собой серию отдельных выпусков для специалистов, которые хотели бы получить более подробную техническую информацию о продукции Schneider Electric и ее применении, в дополнение к тому, что содержится в каталогах.*

*В **Технической коллекции** будут публиковаться материалы, которые позволят лучше понять технические и экономические проблемы и явления, возникающие при использовании электрооборудования и средств автоматизации Schneider Electric.*

***Техническая коллекция** предназначена для инженеров и специалистов, работающих в электротехнической промышленности и в проектных организациях, занимающихся разработкой, монтажом и эксплуатацией электроустановок, распределительных электрических сетей, средств и систем автоматизации.*

***Техническая коллекция** будет также полезна студентам и преподавателям ВУЗов. В ней они найдут сведения о новых технологиях и современных тенденциях в мире Электричества и Автоматики.*

*В каждом выпуске **Технической коллекции** будет углубленно рассматриваться конкретная тема из области электрических сетей, релейной защиты и управления, промышленного контроля и автоматизации технологических процессов.*

***Валерий Саженов,**
Технический директор
ЗАО «Шнейдер Электрик»,
Кандидат технических наук*

Выпуск № 9

Методика расчета уставок дифференциальной защиты трансформаторов (Серия Т87)

А. М. Александров

**Петербургский Энергетический Институт повышения квалификации
(ПЭИпк)**

1. Описание дифференциальной защиты SEPAM T87

Дифференциальная защита терминала SEPAM T87 выполнена пофазной. Она включает дифференциальную отсечку и чувствительную дифференциальную защиту с процентной тормозной характеристикой и блокировками по второй и пятой гармоникам. Тормозная характеристика имеет три участка: горизонтальный и два наклонных, проходящих через начало координат. Горизонтальный участок, крутизна наклонных частей и точка изменения крутизны регулируются. В качестве тормозного тока используется абсолютное значение наибольшего тока двух сторон силового трансформатора (рис. 1).

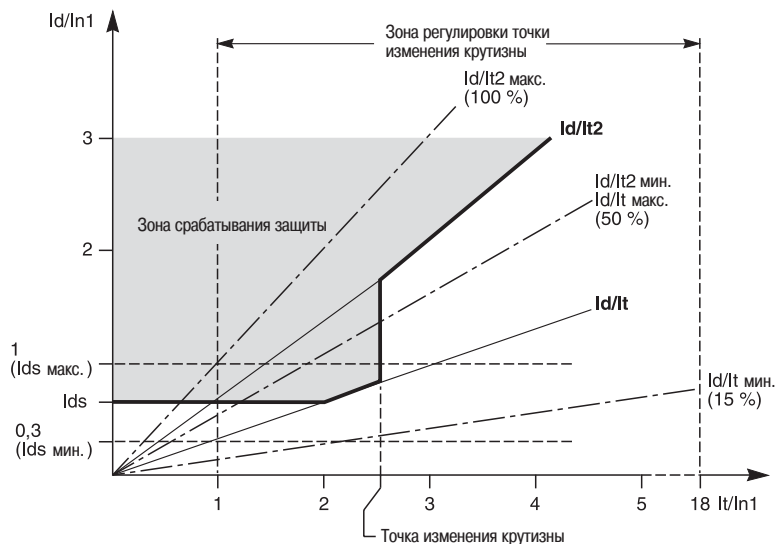


Рис. 1 Тормозная характеристика дифференциальной защиты трансформатора SEPAM T87.

Вычисление дифференциального и тормозного токов производится после выравнивания вторичных токов трансформаторов тока по величине и по углу (в зависимости от группы соединения обмоток силового трансформатора). Со всех сторон силового трансформатора трансформаторы тока должны соединяться по схеме полной «звезды». Выравнивание вторичных токов выполняется программно согласно выставленным в окне «Специальные характеристики» параметров силового трансформатора (номинальной мощности, номинальных напряжений обмоток, векторной группы) и номинальных значений первичных обмоток трансформаторов тока с обеих сторон трансформатора. Единственным условием возможности выравнивания токов по величине является требование, чтобы номинальные токи трансформаторов тока находились в диапазоне (0,1-2,5) номинального тока силового трансформатора.

Следует отметить, что тормозная характеристика приведена в осях I_d/I_{n1} и I_t/I_{n1} , т.е. в относительных единицах, приведенных к номинальному току первой обмотки силового трансформатора.

Для предотвращения излишней работы дифференциальной защиты при внешнем коротком замыкании на землю производится корректировка токов с целью исключения токов нулевой последовательности. Для первой обмотки она выражается вычитанием из фазного тока тока нулевой последовательности вне зависимости от схемы соединения первичной обмотки трансформатора как показано в формуле (x) для фазы «А», (аналогично для остальных фаз).

$$I_{am} = \frac{I_A}{I_{n1}} - \frac{I_A + I_B + I_C}{3I_{n1}}, \quad (x)$$

где I_{am} - откорректированный ток первой обмотки фазы А;
 I_A, I_B, I_C - токи фаз А, В, С на входе устройства.

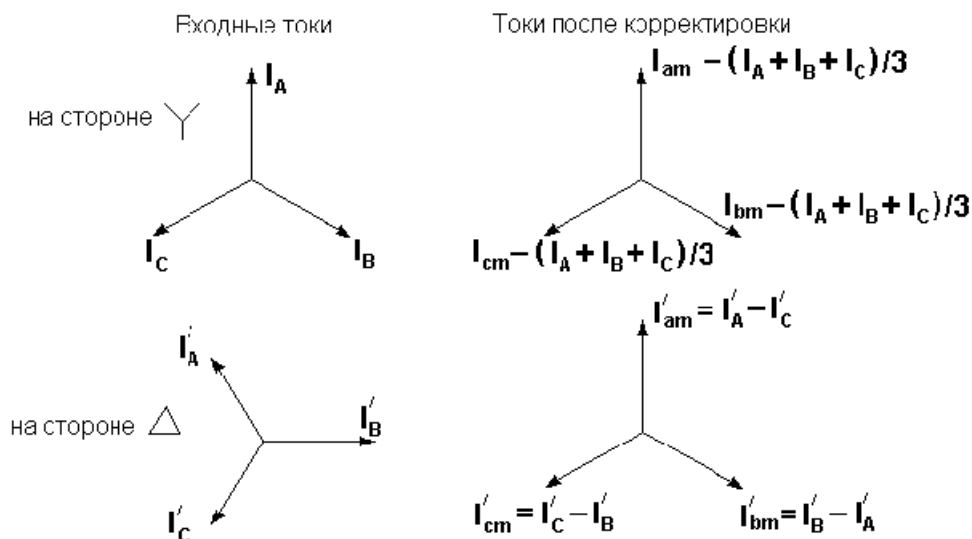
Корректировка фазного тока второй обмотки зависит от группы соединения обмоток силового трансформатора:

- для четных групп корректировка аналогична первой обмотке:

$$I'_{am} = \frac{I'_A}{I_{n2}} - \frac{I'_A + I'_B + I'_C}{3I_{n2}},$$

- для нечетных групп корректировка заключается в получении разности соответствующих фазных токов, деленной на $\sqrt{3}$, например, для группы соединения силового трансформатора Y/Δ-11 для фазы:

$$I'_{am} = \frac{I'_A - I'_C}{\sqrt{3}I_{n2}}$$



При включении силового трансформатора под напряжение происходит бросок тока намагничивания, величина которого может достигать 8-10 кратного значения номинального тока трансформатора. Для предотвращения ложного срабатывания дифференциальной защиты в этом режиме фирмой Schneider Electric использован способ замера в дифференциальном токе величины 2 гармоники, которая появляется при включении трансформатора под напряжение.

В устройстве предусмотрена возможность дополнительной блокировки по 2 гармонике при включении трансформатора. Дополнительная блокировка используется тогда, когда содержание гармоник в токе включения незначительное.

Блокировка дифференциальной защиты в режиме перевозбуждения силового трансформатора выполнена путем фиксации в дифференциальном токе пятой гармоники.

Для предотвращения ложной работы дифференциальной защиты при неисправности токовых цепей предусмотрена специальная блокировка, выявляющая обрыв в цепи какой-либо фазы трансформаторов тока сторон силового трансформатора.

В работе устройства Т87 предусмотрен режим тестирования, который позволяет облегчить проверку функции дифференциальной защиты. Данный режим автоматически выставляет группу соединения силового трансформатора в 0, а номинальные напряжения сторон силового трансформатора рассчитываются по формулам:

$$U_{ном1} = S / (\sqrt{3} * I_{ном\ тт1}),$$

$$U_{ном2} = S / (\sqrt{3} * I_{ном\ тт2}),$$

где: $I_{ном\ тт\ 1}$ – номинальный ток трансформатора тока первой обмотки трансформатора

$I_{ном\ тт\ 2}$ – номинальный ток трансформатора тока второй обмотки трансформатора

$U_{ном1}$ – измененное напряжение первичной обмотки силового трансформатора

$U_{ном2}$ – измененное напряжение вторичной обмотки силового трансформатора

S - полная мощность силового трансформатора

Этот режим включается с помощью программного обеспечения SFT 2841 в разделе «Настройка защит» и требует обязательного вывода защиты из работы для предотвращения ложного отключения силового трансформатора.

Наряду с традиционной отстройкой от включения трансформатора под напряжение и от токов небаланса режимов путем задания пользователем определенной тормозной характеристики, уставки токовой отсечки и уставок 2 и 5 гармоник фирма Schneider Electric предлагает новое направление в создании цифровых реле – самоадаптирующихся устройств на основе искусственной нейронной сети.

Традиционный алгоритм предполагает попарное сравнение входных параметров, необходимых для работы дифференциальной защиты, с заданными пороговыми значениями (уставками). Пороговые значения определяются на основе опыта эксплуатации и в ряде случаев не являются оптимальными, т.к. часто принимаются с большим запасом и не учитывают влияние остальных параметров. Например, блокировка дифференциальной защиты по 2 гармонике может замедлить работу защиты из-за насыщения трансформаторов тока при внутреннем повреждении с большими токами короткого замыкания. Замедление действия защиты приведет к увеличению размеров повреждения и увеличению стоимости ремонта. Данный недостаток отсутствует в методе нейронной сети, который определяет необходимость действия на отключение или блокировку на основании комплексного анализа всех входных величин, который нарабатывается в процессе обучения в реальных и модулированных условиях.

Опыт применения искусственного интеллекта в дифференциальных защитах трансформаторов показал высокую эффективность этих защит. Schneider Electric установил с 2000 г около 1500 самоадаптирующихся дифференциальных защит и при многочисленных внешних коротких замыканиях дифференциальная защита не работала излишне, а при повреждении трансформатора в Light SESA Company (Бразилия) дифференциальная защита сработала через 0,5 периода, что значительно уменьшило размеры повреждения [2] [3].

Итак, в термине Seram T87 предлагается выбрать вид торможения: **традиционное** или **самоадаптирующееся**. При традиционном торможении необходимо задать вид тормозной характеристики, уставки дифференциальной отсечки и уставки 2 и 5 гармоник. При использовании самоадаптирующегося торможения требуется задать только тормозную характеристику, причем, только горизонтальную часть (I_{ds}) и первую наклонную часть (I_d/I_t). Все остальные характеристики не устанавливаются. Единственное ограничение, вводимое фирмой, - применение искусственной нейронной схемы возможно на тех трансформаторах, для которых амплитудное значение броска тока намагничивания не превышает 8-кратного действующего значения номинального тока силового трансформатора.

Алгоритм работы дифференциальной защиты показан на рис. 2.

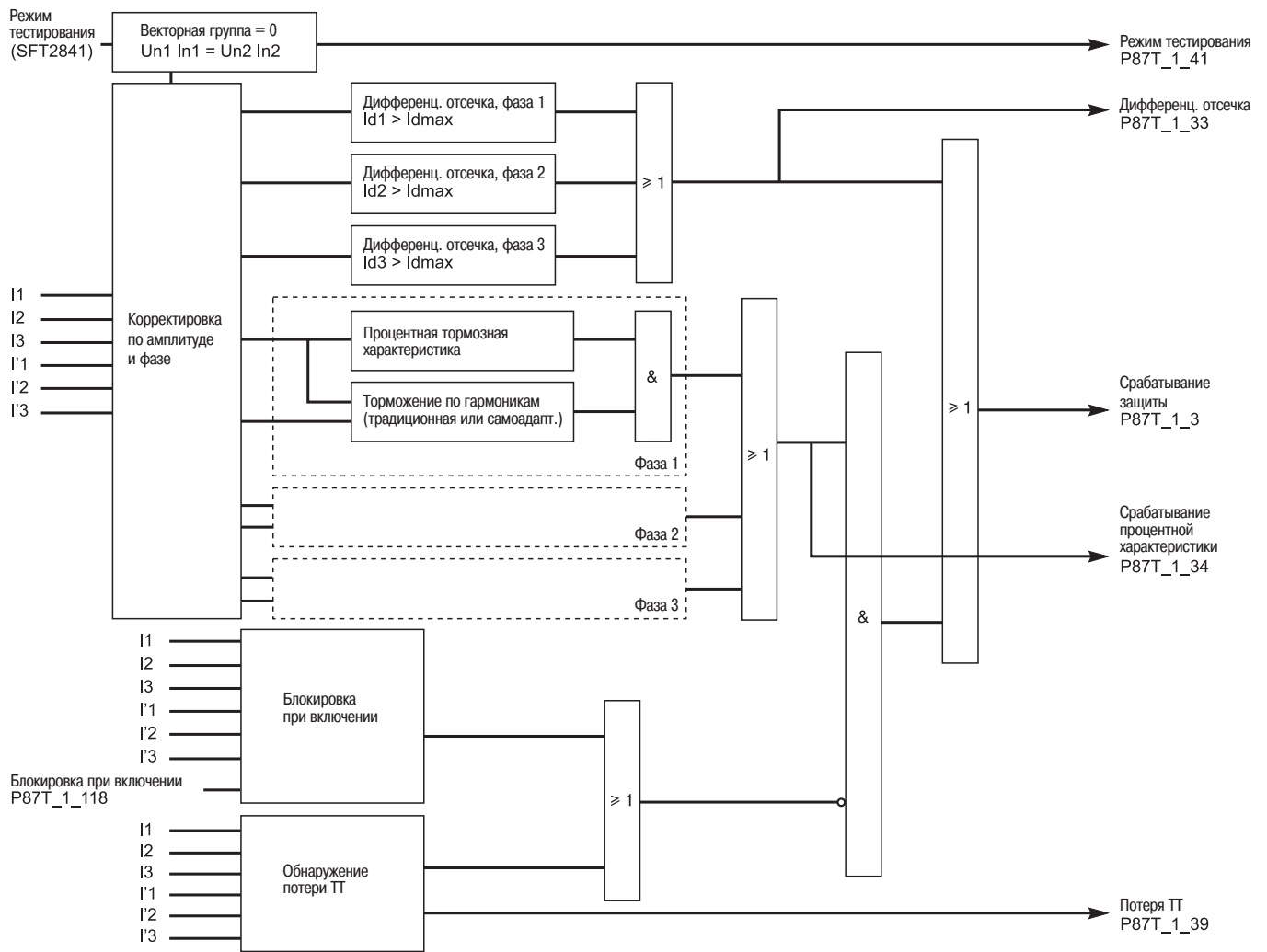
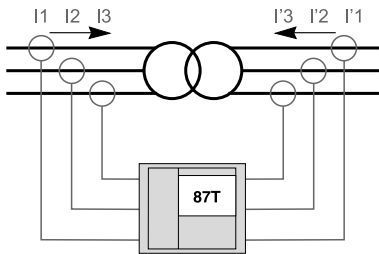


Рис. 2. Алгоритм работы дифференциальной защиты трансформатора Serat T87

2. Методика выбора уставок срабатывания дифференциальной защиты трансформатора

Выбор уставок срабатывания дифференциальной защиты заключается в определении следующих параметров (в скобках указаны пределы регулировки):

- минимальной уставки I_{ds} (30% I_{n1} -100% I_{n1});
- крутизны тормозной характеристики первого наклонного участка I_d/I_t (15%-50%);
- крутизны тормозной характеристики второго наклонного участка I_d/I_{t2} (50%-100%);
- точки изменения крутизны SLP (нет, I_{n1} -18 I_{n1});
- тока срабатывания дифференциальной отсечки $I_{d\max}$. (3-18 I_{n1});
- уставки по второй гармонике (нет, 5%-40%);
- уставки по пятой гармонике (нет, 5%-40%).

Тормозная характеристика должна обеспечить высокую чувствительность защиты при малых токах повреждения (ток срабатывания меньше номинального тока трансформатора) с одной стороны, а с другой стороны, несрабатывания от токов небаланса : в нагруженном режиме, в режиме внешнего максимального установившегося тока короткого замыкания и в переходных режимах внешнего повреждения, когда информационный признак насыщения трансформаторов тока (вторая гармоника, используемая в реле Seram) недостаточен для блокировки защиты. Поэтому ток срабатывания дифференциальной защиты тормозной характеристики выбирается по условию отстройки от соответствующего расчетного тока небаланса по выражению:

$$I_{сз} > K_{отс} \cdot I_{нб \text{ расч.}} \quad (1)$$

где: $K_{отс}$ -коэффициент отстройки, учитывающий погрешности реле, ошибки расчетов, запас.

Для дифференциальной защиты Seram Т 87 $K_{отс}$ можно принять $K_{отс} = 1,1$.

Расчетный ток небаланса $I_{нб \text{ расч.}}$ определяется как сумма абсолютных значений трех составляющих по формуле:

$$I_{нб \text{ расч.}} = | I_{нб \epsilon} | + | I_{нб \text{ рег.}} | + | I_{нб f} |, \quad (2)$$

где: $I_{нб \epsilon}$ - составляющая тока небаланса, обусловленная погрешностью трансформаторов тока;

$I_{нб \text{ рег.}}$ - составляющая тока небаланса, обусловленная регулированием напряжения;

$I_{нб f}$ - составляющая тока небаланса, обусловленная погрешностью выравнивания плеч, погрешностью преобразования АЦП и т.п.

Составляющая тока небаланса, обусловленная погрешностью трансформаторов тока определяется по формуле:

$$I_{нб \epsilon} = K_{пер} \cdot K_{одн.} \cdot \epsilon \cdot I_{кз}, \quad (3)$$

где: $K_{пер}$ - коэффициент, учитывающий переходный режим;

$K_{одн.}$ - коэффициент однотипности ТТ. Коэффициент однотипности ТТ для дифференциальной защиты трансформаторов следует принимать $K_{одн.} = 1,0$. т.к. возможен режим, когда с одной стороны силового трансформатора ТТ имеют погрешность равную допустимой, а с другой стороны, ТТ работают без погрешности. Это обусловлено тем, что ТТ сторон имеют разные коэффициенты трансформации, разные типы, разные условия работы;

ϵ - полная погрешность ТТ.

Составляющая тока небаланса, обусловленная регулированием напряжения определяется по формуле:

$$I_{\text{нб рег}} = \Delta U_{\text{рег.}} / (1 - \Delta U_{\text{рег.}}) I_{\text{кз.}}, \quad (4)$$

где: $\Delta U_{\text{рег.}}$ - максимальное относительное изменение напряжения на стороне регулирования по отношению к напряжению, при котором выравнились вторичные токи. Как правило, выравнивание выполняется при номинальном коэффициенте трансформации.

Составляющая тока небаланса, обусловленная погрешностями выравнивания, погрешностью преобразования АЦП и т.п.

$I_{\text{нб f}} = 0,02$ - по данным фирмы Schneider Electric.

Общая формула для определения тока срабатывания дифференциальной защиты терминала Seram T 87 по условию отстройки от тока небаланса:

$$I_{\text{сз}} > 1,1 (K_{\text{пер.}} \cdot \epsilon + (\Delta U_{\text{рег.}} / (1 - \Delta U_{\text{рег.}})) + 0,02) I_{\text{кз}} \quad (5)$$

Полную погрешность ТТ для определенности для всех режимов будем принимать равной предельной допустимой, принятой в России $\epsilon = 0,1$.

Минимальный ток срабатывания дифференциальной защиты выбираем из следующих соображений. При небольших размерах повреждения напряжение на шинах потребителя не будет уменьшаться, и ток нагрузки также не изменится. Ток нагрузки, являясь тормозным, будет увеличивать ток срабатывания защиты. Поэтому переход с горизонтального участка тормозной характеристики на наклонный желательнее производить при токе нагрузки (тормозном токе), равном номинальному току трансформатора. Согласно [4] ТТ могут насыщаться даже при небольших кратностях тока. В таких режимах информационный параметр насыщения (вторая гармоника), используемый для отстройки от тока небаланса, как правило, невелик, и отстройка может быть осуществлена только за счет соответствующего выбора параметров тормозной характеристики.

Увеличение погрешности ТТ учитывается введением коэффициента $K_{\text{пер.}}$, который зависит от многих факторов таких как : постоянная времени затухания апериодической составляющей, остаточной намагниченности магнитопровода, нагрузки и типа ТТ и т.п. Кроме того, как показано в [4] переходные токи небаланса зависят от приведенной предельной кратности, т.е. от отношения допустимого тока, при котором погрешность ТТ не превышает 10%, к номинальному току силового трансформатора:

$$K' = I_{\text{ном тт}} K_{10} / I_{\text{ном т}}, \quad (6)$$

где: $I_{\text{ном тт}}$ - первичный номинальный ток ТТ;

$I_{\text{ном т}}$ - первичный номинальный ток силового трансформатора;

K_{10} - предельная кратность ТТ, при которой полная погрешность ТТ при заданной вторичной нагрузке не превышала 10%.

Минимальный ток срабатывания дифференциальной защиты ($I_{\text{дс}}$) выбираем по (5), принимая $K_{\text{пер.}} = 1,0$.

Тормозные характеристики терминала проходят через начало координат и отсекают горизонтальную часть вблизи номинального тока. При таких токах ТТ не должны насыщаться и погрешность ТТ должна быть меньше 10%. Принятая погрешность ТТ, равная 10%, обеспечивает надежную отстройку от тока небаланса при токах нагрузки.

При максимальном диапазоне регулирования напряжения трансформатора, равном $\pm 16\%$, минимальный ток срабатывания защиты будет равен:

$$I_{ds} = 1,1 \cdot (1,0 \cdot 0,1 + 0,16 / (1 - 0,16) + 0,02) = 0,34$$

Принимаем к установке: $I_{ds} = 34\%$.

При меньшем диапазоне регулирования напряжения минимальный ток срабатывания дифференциальной защиты принимаем равным 30%, т.е. наименьшей уставке предела регулирования I_{ds} .

Уставка крутизны первого наклонного участка тормозной характеристики определяется из следующих соображений.

Крутизна тормозной характеристики определяется как отношение желаемого тока срабатывания к тормозному току. Ток срабатывания – это произведение относительного тока небаланса на тот же тормозной ток. Поэтому наклон тормозной характеристики равен относительному току срабатывания дифференциальной защиты при данном тормозном токе.

$$\begin{aligned} Id/It &= K_{отс.Инб} \text{ расч.} / I_{торм.} = 1,2 (K_{пер.} \cdot \epsilon + \Delta U_{рег.} / (1 - \Delta U_{рег.}) + 0,02) I_{торм.} / I_{торм.} = \\ &= 1,2 (K_{пер.} \cdot \epsilon + \Delta U_{рег.} / (1 - \Delta U_{рег.}) + 0,02) \end{aligned} \quad (8)$$

Как указывалось выше, ТТ могут насыщаться притоках (2-3) • $I_{ном}$. Особенно большая вероятность насыщения ТТ возможна при питании силовым трансформатором двигательной нагрузки. Это объясняется большой апериодической составляющей и составляющей низкой частоты в токе пуска и самозапуска электродвигателей. Поэтому даже при небольших сквозных токах следует принимать $K_{пер.} = 2,0$ для трансформаторов с двигательной нагрузкой, составляющей менее 50% от номинальной мощности трансформатора и $K_{пер.} = 2,5$ для трансформаторов с двигательной нагрузкой, составляющей более 50% от номинальной мощности трансформатора.

Таким образом, крутизна первого наклонного участка тормозной характеристики определяется:

$$Id/It = 1,1 \cdot (K_{пер.} \cdot 0,1 + \Delta U_{рег.} / (1 - \Delta U_{рег.}) + 0,02), \quad (9)$$

где: $K_{пер.} = 2-2,5$.

Точка изменения крутизны характеристики (SLP) и уставка крутизны второго наклонного участка тормозной характеристики (Id/It_2) выбираются из следующих положений.

Для отстройки от броска тока намагничивания фирма использует тот факт, что в броске содержится большая доля второй гармоники. Но в переходном токе внутреннего короткого замыкания тоже существует вторая гармоника, что может привести к замедлению действия защиты.

Испытания, проведенные фирмой, показали, что для отстройки от броска тока намагничивания необходимо уставку по второй гармонике принимать меньше 30%, в то время как для отстройки от тока второй гармоники вызванного насыщением трансформаторов тока при внутренних повреждениях ее рекомендуется выставлять 15%. Учитывая малую разницу в требованиях к уставке по второй гармонике для того, чтобы не увеличивать время срабатывания защиты с одной стороны и ложно не работать при значительных токах внешних КЗ, влекущих за собой насыщение ТТ с другой стороны фирма предлагает совместное использование второй гармоники и увеличение тока срабатывания защиты за счет торможения на втором участке тормозной характеристики.

Точка изменения крутизны тормозной характеристики (SLP) по рекомендации фирмы Schneider Electric определяется по выражению:

$$SLP \leq 2 + 3/4 \cdot (\min(I_{бр.нам.1*}; I_{бр.нам.2*}))^{4/3} \cdot Id/It, \quad (10)$$

где: $I_{бр.нам.1*} = I_{бр.нам.1} / \sqrt{2} I_{1ном т}$ и $I_{бр.нам.2*} = I_{бр.нам.2} / \sqrt{2} I_{2ном т}$;

$I_{бр.нам.1}$ - амплитудное первичное значение броска тока намагничивания силового трансформатора со стороны первой обмотки;

$I_{бр.нам.2}$ - амплитудное первичное значение броска тока намагничивания силового трансформатора со стороны второй обмотки;

$I_{1ном т}$ – номинальный ток силового трансформатора первой обмотки;

$I_{2ном т}$ – номинальный ток силового трансформатора второй обмотки;

Id/It – наклон первого участка тормозной характеристики.

Крутизна второго наклонного участка тормозной характеристики (Id/It_2) по рекомендации фирмы Schneider Electric принимается равной:

$$Id/It_2 = 60-70\% \quad (11)$$

Для того, чтобы дифференциальная защита не работала ложно при включении трансформатора под напряжение, необходимо (по рекомендации фирмы Schneider Electric), чтобы предельная кратность ТТ, при которой погрешность ТТ не превышала 10%, :

1) была в 3 раза больше отношения амплитуды броска тока намагничивания к амплитуде номинального тока ТТ при $I_{бр.нам} > 6,7 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{ном тт}$,

2) равнялась 20 при $I_{бр.нам} < 6,7 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{ном тт}$

В случае, если отсутствуют данные по предельной кратности ТТ, это граничное условие может быть представлено через напряжение точки перегиба кривой намагничивания ТТ (вольт-амперной характеристики). Напряжение точки перегиба вольт-амперной характеристики ТТ должно быть:

1) в 3 раза больше э.д.с. вторичной обмотки, вычисленной при токе броска намагничивания, а именно:

$$U_K > 3 (Z_2 + Z_N) I_{2ном.} I_{бр.нам.} / (\sqrt{2} \cdot I_{1ном тт}), \quad (12)$$

при $I_{бр.нам} > 6,7 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1ном тт}$

2) больше э.д.с. вторичной обмотки, вычисленной по формуле:

$$U_K > (Z_2 + Z_N) \cdot 20 \cdot I_{2ном.},$$

при $I_{бр.нам} < 6,7 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1ном тт}$

где: $I_{бр.нам.}$ - амплитудное первичное значение броска тока намагничивания силового трансформатора;

$I_{1ном тт}$ - номинальный первичный ток ТТ;

$I_{2ном.}$ - номинальный вторичный ток ТТ;

Z_2 - полное сопротивление вторичной обмотки ТТ;

Z_N -вторичная нагрузка ТТ.

Предельная кратность ТТ при заданной вторичной нагрузке может быть определена по кривым предельной кратности, по паспортным данным ТТ, по приближенной формуле. Если известна величина номинальной предельной кратности вторичной обмотки при номинальной мощности нагрузки $S_n ном.$, то величина предельной кратности при другой вторичной нагрузке может быть определена по формуле:

$$K_{\text{факт.}} = K_{\text{ном.}} \cdot (Z_2 + Z_{\text{н ном.}}) / (Z_2 + Z_{\text{н факт.}}), \quad (13)$$

где: $K_{\text{ном.}}$ - номинальная предельная кратность вторичной обмотки;
 Z_2 - полное сопротивление вторичной обмотки ТТ;
 $Z_{\text{н ном.}} = S_{\text{н ном.}} / I_{2\text{ном.тт}}$ и $Z_{\text{н факт.}}$ - полные сопротивления вторичной нагрузки при номинальной мощности и при фактической нагрузке соответственно.

Индуктивные сопротивления рассеяния вторичной обмотки не приводятся в технических данных на ТТ, поэтому вместо Z_2 в формулу (12) можно вводить только активное сопротивление вторичной обмотки. Т.к. для современных ТТ $X_2 < 0,5 R_2$, то неучет индуктивного сопротивления вторичной обмотки вносит погрешность порядка 10%. Номинальная мощность нагрузки имеет $\cos \varphi_{\text{н}} = 0,8$. Учитывая вышеизложенное, формулу (12) можно преобразовать:

$$K_{\text{факт.}} = K_{\text{ном.}} \cdot \sqrt{(R_2 + 0,8 Z_{\text{н ном.}})^2 + (0,6 Z_{\text{н ном.}})^2} / \sqrt{(R_2 + R_{\text{н}})^2 + X_{\text{н}}^2} \quad (14)$$

Предельную кратность можно определить по приближенной формуле:

$$K_{\text{факт.}} = 4,44 \text{ Впр.} \cdot F \cdot W_2 \cdot S_{\text{м}} / I_{2\text{ном.тт}} (R_2 + R_{\text{н}}), \quad (15)$$

где: Впр. - максимальное значение индукции в магнитопроводе ТТ при предельной кратности;
 F - частота напряжения сети;
 W_2 - число витков вторичной обмотки;
 $S_{\text{м}}$ - площадь поперечного сечения магнитопровода, в м^2 ;
 $I_{2\text{ном.тт}}$ - номинальный вторичный ток ТТ, в А;
 R_2 - активное сопротивление вторичной обмотки ТТ, в Ом.

Предельную кратность ТТ по известному напряжению точки перегиба вольт-амперной характеристики при заданном сопротивлении нагрузки можно определить по следующему выражению:

$$K_{\text{факт.}} = U_{\text{к}} / I_{2\text{ном.тт}} \sqrt{(R_2 + R_{\text{н}})^2 + X_{\text{н}}^2} \quad (16)$$

Для выбора необходимых ТТ и для определения возможности использования самоадаптирующегося торможения необходимо знать величину амплитуды броска тока намагничивания. Если эта величина отсутствует в паспортных данных трансформатора, то можно приближенно определить амплитуду броска тока намагничивания следующим способом.

Определяем относительное индуктивное сопротивление контура включения [5] по выражению:

$$X^* = X^*_{\text{с}} + K_1 X^{(1)*}_{\text{в}} \quad X^* = X^*_{\text{с}} + K_1 X^{(3)*}_{\text{в}}, \quad (17)$$

где: $X^*_{\text{с}}$ - относительное индуктивное сопротивление прямой последовательности до вводов силового трансформатора, определенное по отношению к базисному сопротивлению. За базовое сопротивление принимается сопротивление соответствующее номинальным параметрам трансформатора, $X_{\text{б}} = U_{2\text{ном.}}^2 / S_{\text{ном.}}$;
 $U_{\text{ном.}}$ - номинальное линейное напряжение обмотки той стороны, на которую подается напряжение, в кВ;
 $S_{\text{ном.}}$ - номинальная мощность трансформатора, в МВА;
 $X^{(1)*}_{\text{в}}$, $X^{(3)*}_{\text{в}}$ - относительные индуктивные сопротивления трансформатора, приведенные к стороне подачи напряжения при однофазном, трехфазном включении и при полном насыщении стержней и ярм магнитопровода. Сопротивление трансформатора приведено к номинальным параметрам трансформатора $X_{\text{б}}$;
 K_1 - коэффициент, учитывающий увеличение индуктивного сопротивления трансформатора за счет неполного насыщения ярм магнитопровода. Значение K_1 принимается $K_1 = 1,1-1,15$.

Относительные индуктивные сопротивления $X^{(1)*}$ в некоторых российских трансформаторов приведены в [5] и [6]. В случае отсутствия этих данных в паспорте трансформатора или в таблицах [5] и [6] сопротивление $X^{(1)*}$ может быть ориентировочно определено по выражениям:

$$\text{для трансформаторов до 63 МВА: } 0,094 + 0,74 U_{к\%}/100 \quad (18)$$

$$\text{для трансформаторов 75-125 МВА: } 0,158 + 0,74 U_{к\%}/100, \quad (19)$$

где: $U_{к\%}$ - напряжение короткого замыкания со стороны включаемой обмотки.

$U_{к\%}$ принимается, соответствующее среднему значению диапазона регулирования напряжения.

Сопротивление при 3-х фазном включении можно ориентировочно принять $X^{(3)*} = 1,3 X^{(1)*}$

Бросок тока намагничивания при 3-х фазном включении следует принимать при включении трансформаторов масляными и элегазовыми выключателями с 3-х фазным приводом. Бросок тока намагничивания при однофазном включении следует принимать при включении трансформатора воздушными и масляными выключателями с пофазными приводами.

Затухание броска тока намагничивания к моменту срабатывания дифференциальной защиты можно не учитывать, что идет в некоторый запас.

Амплитудное значение броска тока намагничивания определяется по следующему выражению:

$$I_{ампл.} = \sqrt{2} U_{лин} (1 + A) / \sqrt{3} (X^{*c} + K_1 X^{(1)*}) X_б, \quad (20)$$

где: $U_{лин}$ -линейное напряжение со стороны включения трансформатора под напряжение;

A - относительное смещение оси синусоиды потокосцепления по отношению к точке перегиба характеристики намагничивания.

Величина A зависит от материала магнитопровода, индукции насыщения, остаточной индукции, от однофазного или 3-х фазного броска тока намагничивания.

Величина A определяется по следующему выражению:

$$A^{(1)} = 1 - (B_s^* - B_r^*) / B_{м*} \quad A^{(3)} = A^{(1)} - 0,13, \quad (21)$$

где: $B_s^* = B_s / B_{ном м}$ - относительная индукция насыщения;

$B_r^* = B_r / B_{ном м}$ - относительная остаточная индукция;

$B_{ном м}$ – амплитудное значение индукции, соответствующее номинальному напряжению.

Можно принять согласно [7]:

для горячекатаной стали $B_s^* = B_s / B_{ном м} = 1,93 / 1,4 = 1,38$;

для холоднокатаной стали $B_s^* = B_s / B_{ном м} = 2,0 / 1,65 = 1,21$;

остаточная индукция для трансформаторов 110- 220 кВ $B_r^* = 0,42$;

остаточная индукция для трансформаторов меньших классов напряжения $B_r^* = 0,5-0,6$.

Тогда для трансформаторов с горячекатаной сталью напряжения 110 кВ:

$$A^{(1)} = 1 - (1,38 - 0,42) / 1 = 0,04 \quad A^{(3)} = 0; \quad (22)$$

Тоже для трансформаторов меньших классов напряжения:

$$A^{(1)} = 1 - (1,38 - 0,6) / 1 = 0,22 \quad A^{(3)} = 0,09; \quad (23)$$

Для трансформаторов с холоднокатаной сталью напряжением 110 кВ:

$$A^{(1)} = 1 - (1,21 - 0,42) / 1 = 0,21 \quad A^{(3)} = 0,08; \quad (24)$$

То же для трансформаторов меньших классов напряжения:

$$A^{(1)} = 1 - (1,21 - 0,6) / 1 = 0,39 \quad A^{(3)} = 0,26. \quad (25)$$

С целью повышения надежности отстройки от броска тока намагничивания и согласно рекомендации [6] принимаем для трансформаторов с холоднокатаной сталью всех напряжений коэффициент $A^{(1)} = 0,39$, а для трансформаторов с горячекатаной сталью $A^{(1)} = 0,25$ или $0,06$. Если принятие этих коэффициентов приводит к загроблению защиты или к усложнению выбора ТТ, то следует уточнить величину $A^{(1)}$ согласно (22-25) с учетом однофазного или трехфазного броска тока намагничивания.

Ток срабатывания дифференциальной отсечки $I_{d\max}$. выбираем по двум условиям:

- по условию отстройки от броска тока намагничивания;

- по условию отстройки от тока небаланса в режиме максимальной величины тока внешнего короткого замыкания.

Для отстройки от броска тока намагничивания уставка срабатывания дифференциальной отсечки должна быть:

$$I_{d\max} > K_{отс} \cdot \max(I_{бр.нам.1*}; I_{бр.нам.2*}), \quad (26)$$

где: $I_{бр.нам.1}$ - амплитудное первичное значение броска тока намагничивания силового трансформатора со стороны первой обмотки;

$I_{бр.нам.2}$ - амплитудное первичное значение броска тока намагничивания силового трансформатора со стороны второй обмотки;

$K_{отс}$ - коэффициент отстройки, $K_{отс} = 1,4$;

Для отстройки от тока небаланса при максимальном токе внешнего короткого замыкания уставка срабатывания дифференциальной отсечки определяется по выражению:

$$I_{d\max} = K_{отс} K_{нб} I_{кз макс}, \quad (27)$$

где: $K_{отс}$ - коэффициент отстройки, $K_{отс} = 1,2$;

$K_{нб}$ - коэффициент равный отношению амплитуды первой гармоники тока небаланса к амплитуде периодической составляющей внешнего тока короткого замыкания.

$K_{нб} = 0,7$ при установке со всех сторон силового трансформатора ТТ с вторичными токами 5 A ;

$K_{нб} = 1,0$ при условии установки с одной стороны ТТ с вторичным током 5 A , а с другой стороны - 1 A ;

$I_{кз макс}$ - максимальное значение периодической составляющей тока внешнего короткого замыкания.

Уставку блокировки по второй гармонике можно принять равной 15% с поперечной (общей) блокировкой.

Новые силовые трансформаторы, использующие современные технологии, могут содержать меньшую долю второй гармоники в режиме включения трансформатора. Для таких трансформаторов следует вводить дополнительную блокировку по второй гармонике при включении трансформатора с меньшей уставкой.

Уставка блокировки по 5 гармонике принимается для сетевых трансформаторов - 35%, а для трансформаторов станций - 25% с пофазной блокировкой.

3. Пример выбора параметров срабатывания дифференциальной защиты

Дифференциальная защита установлена на трансформаторе мощностью $S=25$ МВА $U_{ном.}=115 \pm 16\% / 10,5$ кВ. $U_k=10,4\%$ при номинальном напряжении, $U_k=9,9\%$ при крайнем отрицательном положении регулятора напряжения, $U_k=11,2\%$ при крайнем положительном положении регулятора напряжения. Трансформатор установлен на подстанции, где двигательная нагрузка не превышает 50% от мощности силового трансформатора. Подстанция питается по линии электропередачи 110 кВ длиной 32 км. Трансформатор может быть поставлен под напряжение только со стороны 110 кВ.

Трансформаторы тока на стороне 110 кВ $K_{ТТ}=150/5$, на стороне 10 кВ- $K_{ТТ}=1500/5$. Расстояние от ТТ 110 кВ до места установки защиты- 50 м, а от ТТ 10 кВ- 20 м. Контрольный кабель медный сечением $2,5$ мм².

1. Определение пригодности установленных трансформаторов тока

1.1. По условию выравнивания вторичных токов по величине.

$$0,1 \cdot I_{ном\ т} < I_{ном\ тт} < 2,5 \cdot I_{ном\ т} \text{ (условие фирмы)}$$

Номинальные токи силового трансформатора по формуле

$$I_{ном\ т} = S_{ном} / \sqrt{3} \cdot U_{ном.}$$

$$I_{ном,110} = 25000 / \sqrt{3} \cdot 115 = 125,6 \text{ А}$$

$$I_{ном,10} = 25000 / \sqrt{3} \cdot 10,5 = 1376 \text{ А}$$

$$0,1 \cdot 125 = 12,5 < 150 < 2,5 \cdot 125 = 312,5 \text{ - для ТТ стороны 110 кВ-условие соблюдено}$$

$$0,1 \cdot 1376 = 137 < 1500 < 2,5 \cdot 1376 = 3440 \text{ - для ТТ стороны 10 кВ-условие соблюдено.}$$

1.2. По условию отстройки от броска тока намагничивания.

Для проверки пригодности ТТ по условию отстройки от броска тока намагничивания необходимо определить амплитудную величину броска тока намагничивания. Т.к. в паспортных данных на трансформатор не приведена величина броска тока намагничивания и не приведено сопротивление трансформатора при полном насыщении, то определяем сопротивление трансформатора при полном насыщении по приближенной формуле (18) :

$$X^{(1)} *_{в} = 0,094 + 0,74 \cdot 10,4 / 100 = 0,171$$

Определяем относительное индуктивное сопротивление прямой последовательности контура включения по (17), предварительно приведя сопротивление линии электропередачи к базисным условиям $X_b = 115^2 / 25 = 529$ Ом:

Сопротивление линии, пренебрегая активным сопротивлением, равно

$$X_l = X_{уд} \cdot L = 0,41 \cdot 32 = 13,1 \text{ Ом или } X_l *_{в} = 13,1 / 529 = -0,025$$

Сопротивление контура включения:

$$X * = 0,025 + 1,1 \cdot 0,171 = 0,213.$$

То же в именованных единицах: $X = 0,213 \cdot 529 = 112,7$ Ом

Амплитудное значение броска тока намагничивания по (20) определяем предварительно приняв коэффициент $A = 0,39$:

$$I_{бр.нам(ампл)} = \sqrt{2} \cdot 115 (1 + 0,39) / \sqrt{3} \cdot 112,7 = 1156 \text{ А}$$

Кратность тока по отношению к амплитудному значению номинального тока ТТ:

$$K_{ТТ} = 1156 / \sqrt{2} \cdot 150 = 5,46 < 6,7$$

Следовательно, по условию отстройки от броска тока намагничивания предельная кратность ТТ стороны 110 кВ должна быть :

$$K_{10} \geq 20$$

Определяем предельную кратность ТТ при заданной нагрузке ТТ стороны 110 кВ:

$$R_{\text{нагр.}} = R_{\text{к}} + R_{\text{пер.}} + R_{\text{вх.терм.}},$$

где: $R_{\text{к}}$ - сопротивление контрольного кабеля;

$R_{\text{пер.}}$ - переходное сопротивление соединительных контактов в токовых цепях

$R_{\text{пер.}}=0,05 \text{ Ом}$

$R_{\text{вх.терм.}}$ - входное сопротивление терминала. $R_{\text{вх.терм.}}= 0,01 \text{ Ом}$

Сопротивление контрольного кабеля:

$$R_{\text{к}} = \rho L_{\text{к}} / S_{\text{к}},$$

где: ρ - удельное сопротивление материала жил кабеля,

для медного кабеля $\rho = 0,029 \text{ Ом мм}^2/\text{м}$

$$R_{\text{к}} = 0,029 \cdot 50 / 2,5 = 0,58 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{нагр.}} = 0,58 + 0,05 + 0,01 = 0,64 \text{ Ом}$$

По кривым предельной кратности для ТТ типа ТВТ-110 для $R_{\text{нагр.}}=0,64$ определяем.

$K_{10}=24 > 20$ Следовательно, требование отстройки от броска тока намагничивания выполняется.

Т.к. ТТ и их вторичная нагрузка не ограничивают требование отстройки от броска тока намагничивания, то уточнение коэффициента A не требуется.

Если для данного ТТ отсутствует кривая предельной кратности, но в технических данных приведены величина номинальной предельной кратности $K_{10 \text{ ном.}}$ для номинальной нагрузки и величины активного и индуктивного сопротивления вторичной обмотки ТТ, то фактическая предельная кратность определяется по (13) с учетом (14).

Для ТТ ТВТ-110 кВ: $K_{10 \text{ ном.}} = 15,0$; $Z_{\text{н ном.}} = 1,2 \text{ Ом}$; $R_2 = 0,08 \text{ Ом}$; $X_2 = 0,13 \text{ Ом}$

$$K_{\text{ф}} = 15 \cdot \sqrt{(0,084 + 0,8 \cdot 1,2)^2 + (0,13 + 0,6 \cdot 1,2)^2} / \sqrt{(0,08 + 0,64)^2 + 0,13^2} = 26$$

1.3. По условию отстройки от переходных режимов.

Приведенная предельная кратность ТТ по (6) для данного ТТ должна быть:

$$K' = (K_{10} \cdot I_{1 \text{ ном тт}} / I_{1 \text{ ном т}}) > 20 \text{ или } K_{10} = K' \cdot I_{1 \text{ ном т}} / I_{1 \text{ ном тт}} = 20 \cdot 125,6 / 150 = 16,7 < 24.$$

Аналогично должны проверяться ТТ стороны 10 кВ (за исключением требования отстройки от тока намагничивания). Однако, учитывая небольшую вторичную нагрузку ТТ 10 кВ, пригодность ТТ будет обеспечена.

2. Проверка возможности использования самоадаптирующегося торможения.

Условием использования этого торможения является требование, чтобы амплитудное значение броска тока намагничивания было меньше 8-кратного номинального тока трансформатора:

$$I_{\text{бр.нам}} (\text{ампл.}) < 8 I_{\text{ном т}}$$

$$I_{\text{бр.нам.}} (\text{ампл.}) = 1156 \text{ А}$$

$$I_{\text{бр.нам.}} (\text{ампл.}) / I_{\text{ном}} = 1156 / 125,6 = 9,2$$

Следовательно применяется традиционное торможение.

3. Определение минимального тока срабатывания по (5) с учетом, что $K_{пер}=1,0$:

$$I_{ds}=1,1 (1,0 \cdot 0,1 + 0,16 / (1 - 0,16) + 0,02) = 0,34$$

Принимаем к установке **$I_{ds}=34\%$**

4. Определение крутизны первого наклонного участка тормозной характеристики по (9):

$$I_d / I_t^* = 1,1 \cdot (2,0 \cdot 0,1 + 0,16 / (1 - 0,16) + 0,02) = 0,4515$$

Принимаем к установке **$I_d / I_t = 45\%$**

5. Точка изменения крутизны тормозной характеристики по (10) :

$$SLP = 2 + 3/4 \cdot 5,464 / 3 \cdot 0,45 = 5,25$$

Принимаем к установке **$SLP=5,0$**

6. Определение крутизны второго наклонного участка тормозной характеристики по (11):

$$I_d / I_{t2} = 65\%$$

Принимаем к установке **$I_d / I_{t2} = 65\%$**

7. Определение тока срабатывания дифференциальной отсечки :

7.1 Отстройка от броска тока намагничивания по (26):

$$I_{d\max} = 1,4 \cdot 5,46 = 7,6$$

7.2 Отстройка от максимального значения внешнего короткого замыкания по (27):

Максимальное значение внешнего КЗ будет при 3-х фазном повреждении на стороне 10 кВ в режиме минимального сопротивления силового трансформатора. Наименьшее сопротивление трансформатора будет при отрицательном положении анцапф РПН: $115 \text{ кВ} \cdot 0,16 = 96,6 \text{ кВ}$. $U_{кз}$ для $U = 96,6 \text{ кВ}$ равно 9,9%:

$$Z_{тр} = (U_{к\%} / 100) \cdot U^2_{ном.} / S_{ном.} = (9,9 / 100) \cdot 96,62 / 25 = 37 \text{ Ом}$$

Результирующее сопротивление до места короткого замыкания:

$$Z_{\Sigma} = Z_{л} + Z_{тр} = 13,1 + 37 = 50,1 \text{ Ом}$$

Ток короткого замыкания равен: $I^{(3)} = (115000 / \sqrt{3}) / 50,1 = 1327 \text{ А}$ что соответствует

$$K = 1327 / 125,6 = 10,56 I_{n1}$$

Ток срабатывания дифференциальной отсечки по (27):

$$I_{d\max.} = 1,2 \cdot 0,7 \cdot 10,56 = 8,87 I_{n1}$$

Принимаем к установке **$I_{d\max.} = 9 I_{n1}$**

Следует обратить внимание, что и при использовании самоадаптирующегося торможения необходимо ввести дифференциальную отсечку, т.к. если используется блокировка дифференциальной защиты при неисправности ТТ, то при срабатывании этой блокировки трансформатор остается без дифференциальной защиты. Активация дифференциальной отсечки позволяет сохранить хотя бы эту защиту в случае неисправности ТТ..

8. Уставки блокировок по второй и пятой гармоникам принимаются:

$I_{2f}/I_{1f}= 15\%$ с поперечной блокировкой

$I_{5f}/I_{1f}= 35\%$ с пофазной блокировкой

Примечание. В случае двухстороннего питания трансформатора необходимо дополнительно выполнить следующие расчеты:

1. Расчет величины броска тока намагничивания при подаче напряжения на трансформатор со стороны низшего напряжения по пункту 1.2 примера. Определить пригодность ТТ стороны низшего напряжения по условию отстройки от броска тока намагничивания, принимая, что со стороны низшего напряжения включение будет трехфазным.

2. Выбрав наибольшее значение броска тока намагничивания при включении со стороны высшего и низшего напряжения определить возможность использования самоадаптирующегося торможения и определить ток срабатывания дифференциальной отсечки по (26).

3. Выбрав наименьшее значение броска тока намагничивания при включении со стороны высшего и низшего напряжения определить точку изменения крутизны тормозной характеристики по (10).

4. Расчет максимального значения тока короткого замыкания, протекающего по трансформатору, при трехфазном повреждении на стороне высшего напряжения. Выбрав наибольшее значение тока, протекающего по трансформатору, при коротком замыкании на сторонах высшего и низшего напряжения, определить ток срабатывания дифференциальной отсечки по (27).

4. Список литературы

1. Документация Schneider Electric по Sepam 80 серии. Руководство по измерению, защите, контролю и управлению. Руководство по установке, применению, 2005.

2. P.Bertrand, E.Martin, M.Guillot. Neural networks: a mature technique for protection, Cired 97, Conf. Publication 438.

3. P.Bertrand, F.Gil Garcia, L.Castillo, I.Neves. Field experience with differential transformers relay based on neural network technology, Cired, 2003.

4. Дмитренко А.М. Об использовании предельной кратности трансформаторов при проектировании и анализе поведения дифференциальных защит трансформаторов. Электрические станции, 2003, № 2.

5. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 13 Б. Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110-500 кВ. Расчеты. Москва: Энергоатомиздат, 1985.

6. Руководящие указания по релейной защите. Вып.12. Токовая защита нулевой последовательности от замыкания на землю линий 110-500 кВ. Расчеты. Москва: Энергия, 1980.

7. Засыпкин А.С. Релейная защита трансформаторов, Москва: Энергоатомиздат, 1989.

Schneider Electric в странах СНГ

Азербайджан

Баку
AZ 1008, ул. Гарабах, 22
Тел.: (99412) 496 93 39
Факс: (99412) 496 22 97

Беларусь

Минск
220004, пр-т Победителей, 5, офис 502
Тел.: (37517) 203 75 50
Факс: (37517) 203 97 61

Казахстан

Алматы
050050, ул. Табачнозаводская, 20
Швейцарский Центр
Тел.: (727) 244 15 05 (многоканальный)
Факс: (727) 244 15 06, 244 15 07

Астана

ул. Бейбитшилик, 18
Бизнес-центр «Бейбитшилик 2002»
Офис 402
Тел.: (7172) 91 06 69
Факс: (7172) 91 06 70

Атырау

060002, ул. Абая, 2-А
Бизнес-центр «Сутас - С», офис 407
Тел.: (7122) 32 31 91, 32 66 70
Факс: (7122) 32 37 54

Россия

Волгоград
400001, ул. Профсоюзная, 15/1, офис 12
Тел.: (8442) 93 08 41

Воронеж

394026, пр-т Труда, 65
Тел.: (4732) 39 06 00
Тел./факс: (4732) 39 06 01

Екатеринбург

620219, ул. Первомайская, 104
Офисы 311, 313
Тел.: (343) 217 63 37, 217 63 38
Факс: (343) 349 40 27

Иркутск

664047, ул. Советская, 3 Б, офис 312
Тел./факс: (3952) 29 00 07

Казань

420107, ул. Спартаковская, 6, этаж 7
Тел.: (843) 526 55 84, 526 55 85, 526 55 86,
526 55 87, 526 55 88

Калининград

236040, Гвардейский пр., 15
Тел.: (4012) 53 59 53
Факс: (4012) 57 60 79

Краснодар

350020, ул. Коммунаров, 268
Офисы 316, 314
Тел./факс: (861) 210 06 38, 210 06 02

Красноярск

660021, ул. Горького, 3 А, офис 302
Тел.: (3912) 56 80 95
Факс: (3912) 56 80 96

Москва

129281, ул. Енисейская, 37
Тел.: (495) 797 40 00
Факс: (495) 797 40 02

Нижний Новгород

603000, пер. Холодный, 10 А, офис 1.5
Тел.: (831) 278 97 25
Тел./факс: (831) 278 97 26

Новосибирск

630005, Красный пр-т, 86, офис 501
Тел.: (383) 358 54 21, 227 62 54
Тел./факс: (383) 227 62 53

Пермь

614010, Комсомольский пр-т, 98, офис 11
Тел./факс: (343) 290 26 11 / 13 / 15

Самара

443096, ул. Коммунистическая, 27
Тел./факс: (846) 266 50 08, 266 41 41, 266 41 11

Санкт-Петербург

198103, ул. Циолковского, 9, корпус 2 А
Тел.: (812) 320 64 64
Факс: (812) 320 64 63

Уфа

450064, ул. Мира, 14, офисы 518, 520
Тел.: (347) 279 98 29
Факс: (347) 279 98 30

Хабаровск

680011, ул. Металлистов, 10, офис 4
Тел.: (4212) 78 33 37
Факс: (4212) 78 33 38

Туркменистан

Ашгабат
744017, Мир 2/1, ул. Ю. Эмре, «Э.М.Б.Ц.»
Тел.: (99312) 45 49 40
Факс: (99312) 45 49 56

Украина

Днепропетровск
49000, ул. Глинка, 17, 4 этаж
Тел.: (380567) 90 08 88
Факс: (380567) 90 09 99

Донецк

83023, ул. Лабутенко, 8
Тел./факс: (38062) 345 10 85, 345 10 86

Киев

04070, ул. Набережно-Крещатицкая, 10 А
Корпус Б
Тел.: (38044) 490 62 10
Факс: (38044) 490 62 11

Львов

79000, ул. Грабовского, 11, к. 1, офис 304
Тел./факс: (380322) 97 46 14

Николаев

54030, ул. Никольская, 25
Бизнес-центр «Александровский», офис 5
Тел./факс: (380512) 48 95 98

Одесса

65079, ул. Куликово поле, 1, офис 213
Тел./факс: (38048) 728 65 55

Симферополь

95013, ул. Севастопольская, 43/2, офис 11
Тел./факс: (380652) 44 38 26

Харьков

61070, ул. Ак. Проскуры, 1
Бизнес-центр «Telesens», офис 569
Тел.: (380577) 19 07 49
Факс: (380577) 19 07 79



ЦЕНТР ПОДДЕРЖКИ КЛИЕНТОВ

Тел.: 8 (800) 200 64 46 (многоканальный)
(495) 797 32 32
Факс: (495) 797 40 02
ru.csc@ru.schneider-electric.com
www.schneider-electric.ru