

## О требованиях к трансформаторам тока в схемах дифференциальных защит трансформаторов электрических станций

- **Дмитренко А. М.**, доктор техн. наук, Чувашский государственный университет, Чебоксары
- **Журавлев Д. П.**<sup>1</sup>, Чувашский государственный университет, ООО НПП “ЭКРА”, Чебоксары

Рассматривается проблема выбора защитных трансформаторов тока (ТТ) для обеспечения правильного функционирования дифференциальных защит в переходных режимах. Предложено в качестве основного параметра при выборе ТТ использовать приведённую к номинальному току силового трансформатора предельную кратность по точности  $K'_{пр}$ . Приведена методика расчёта  $K'_{пр}$  в зависимости от времени до насыщения  $t_{сн}$ , постоянной времени затухания апериодической составляющей тока короткого замыкания (КЗ), остаточной индукции и тока внешнего КЗ. Показано, что увеличение  $K'_{пр}$  приводит к уменьшению погрешностей ТТ на интервале времени насыщенного состояния магнитопровода. Обращено внимание на необходимость учёта эффекта экранирования при нахождении  $K'_{пр}$  для ТТ без собственной первичной обмотки, размещённых в пофазно экранированных токопроводах.

**Ключевые слова:** трансформатор тока, насыщение сердечника, предельная кратность по точности, сопротивление, вторичная цепь, дифференциальная защита, остаточная индукция, экранирование.

Основными защитами (функциями в составе комплексных микропроцессорных защит) трансформаторов являются дифференциальные защиты. Чувствительные органы указанных защит имеют время срабатывания на синусоидальном токе 25 – 30 мс, что обуславливает определённые проблемы по обеспечению устойчивости функционирования в переходных режимах внешних коротких замыканий (КЗ).

Согласно [1], требования к ТТ дифференциальных защит трансформаторов сформулированы следующим образом: полная погрешность  $\varepsilon$  ТТ в установившемся режиме при внешних КЗ не должна превышать 10%. Вычисление полной погрешности  $\varepsilon$  в проектных расчётах связано с определёнными трудностями, поэтому используется понятие предельной кратности по точности  $K_{пр}$  ТТ [2, 3], которую можно вычислить по формуле [3]

$$K_{пр} = \frac{\omega B_{пр} w_2 s_M}{\sqrt{2} I_{2ном} z_2}, \quad (1)$$

где  $\omega$  – угловая частота;  $B_{пр} = 1,8 \div 1,85$  Тл – предельное значение индукции при выполнении магнитопровода ТТ из холоднокатаной электротехнической стали;  $w_2$  – число витков вторичной обмотки;  $s_M$  – площадь поперечного сечения стали магнитопровода;  $I_{2ном}$  – вторичный номинальный

ток;  $z_2 = |Z_{обм2} + Z_{нг}|$  – модуль комплексного сопротивления вторичной цепи ТТ;  $Z_{обм2}$  – комплексное сопротивление вторичной обмотки ТТ в Т-образной схеме замещения;  $Z_{нг}$  – комплексное сопротивление нагрузки.

В схемах защит трансформаторов, как правило, используются ТТ с витыми кольцевыми магнитопроводами. При этом вторичная обмотка наматывается равномерно на магнитопровод. С учётом этого реактивное сопротивление вторичной обмотки  $x_{обм2}$  (сопротивление рассеяния) получается значительно меньше активного сопротивления  $r_{обм2}$  [3]. В итоге можно записать

$$z_2 = |r_{обм2} + r_{нг} + jx_{нг}|. \quad (2)$$

Согласно ГОСТ 7746-2001 [4], сопротивление  $r_{обм2}$  должно приводиться в паспорте ТТ.

Для релейных защит изготавливаются ТТ на классы точности 5P или 10P, соответственно предельная кратность по точности обозначается  $K_5$  или  $K_{10}$ . Как было указано, в формуле (1)  $B_{пр} = 1,8 \div 1,85$  Тл. При этом значения  $K_5$  и  $K_{10}$  различаются мало, и можно с погрешностью не более 5% ввести обобщённое понятие  $K_{пр}$  [что и используется в формуле (1)].

Общепринятой практикой при вычислении токов КЗ является принятие в качестве базисной величины номинального тока силового трансформатора  $I_{ном.т}$  [5]. Кроме того, при задании уставок дифференциальной защиты силового трансформа-

<sup>1</sup> Журавлев Дмитрий Павлович: zhuravlev\_dp@ekra.ru

тора в качестве базисного тока также принимается  $I_{\text{ном.т}}$ . С учётом этого целесообразно ввести понятие приведённой к  $I_{\text{ном.т}}$  предельной кратности

$$K'_{\text{пр}} = \frac{I_{\text{ном.тТ}}}{I_{\text{ном.т}}} K_{\text{пр}}, \quad (3)$$

где  $I_{\text{ном.тТ}}$  – первичный номинальный ток ТТ, и сформулировать требования к ТТ в установившемся режиме в следующем виде:

$$K'_{\text{пр}} \geq I_{\text{кз}*}, \quad (4)$$

где  $I_{\text{кз}*} = I_{\text{кз}}/I_{\text{ном.т}}$ .

Согласно [4], предприятиями – изготовителями ТТ должна задаваться номинальная предельная кратность  $K_{\text{ном}}$  при заданной номинальной мощности вторичной нагрузки  $S_{2\text{ном}}$ . Значения  $K_{\text{ном}}$ , как правило, должны находиться в пределах от 5 до 30. Однако разрешается изготавливать ТТ и с большими значениями  $K_{\text{ном}}$ . Например, ТТ ряда предприятий имеют  $K_{\text{ном}} = 40$ .

Модуль номинального сопротивления вторичной нагрузки ТТ можно вычислять по формуле

$$z_{\text{нг.ном}} = S_{2\text{ном}}/I_{2\text{ном}}^2.$$

Номинальное значение  $z_{\text{нг.ном}}$  задаётся при  $\cos \varphi_{\text{нг}} = 0,8$ . Номинальные значения  $S_{2\text{ном}}$  должны соответствовать ряду: 3; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 50; 60; 75; 100 В·А.

На основании формулы (2) при  $\cos \varphi_{\text{нг}} = 0,8$  можно записать

$$z_{2\text{ном}} = \sqrt{r_{\text{обм2}}^2 + 1,6r_{\text{обм2}}z_{\text{нг.ном}} + z_{\text{нг.ном}}^2}. \quad (5)$$

Сопротивление входных токовых цепей шкафа микропроцессорных защит трансформатора близко к активному. Кроме того, оно значительно меньше сопротивления жил контрольного кабеля, соединяющего вторичные обмотки ТТ и входные цепи шкафа. С учётом этого расчётное сопротивление нагрузки ТТ  $r_{\text{нг.расч}}$  можно считать чисто активным. Оно зависит от схемы соединения вторичных обмоток группы ТТ и вида КЗ и может вычисляться по известной методике, например, изложенной в [2].

Таким образом, при использовании шкафа микропроцессорных защит можно записать

$$z_2 = r_{\text{обм2}} + r_{\text{нг.расч}}. \quad (6)$$

С достаточной точностью значения  $K_{\text{пр}}$  можно рассчитать по формуле (1), основываясь на числе витков  $w_2$  и сечении магнитопровода  $S_m$ , что и применялось в [2]. Однако в современных условиях узнать  $w_2$  и  $S_m$  не всегда возможно, поэтому реальную предельную кратность ТТ целесообразно находить, используя значения  $K_{\text{ном}}$  и  $z_{\text{нг.ном}}$ . Поставив в формулу (1) значения  $z_2$  по формулам (5) и (6), получаем:

$$K_{\text{пр}} = K_{\text{ном}} \frac{\sqrt{r_{\text{обм2}}^2 + 1,6r_{\text{обм2}}z_{\text{нг.ном}} + z_{\text{нг.ном}}^2}}{r_{\text{обм2}} + r_{\text{нг.расч}}}. \quad (7)$$

При выполнении условия (4) насыщение магнитопровода ТТ в установившемся режиме практически отсутствует. Однако в переходном режиме насыщение может достигаться вследствие влияния аperiodической составляющей тока КЗ. При КЗ вблизи генератора электрической станции наблюдается затухание гармонической составляющей тока КЗ. Короткое замыкание считается близким, если в первом периоде  $T$  после возникновения КЗ отношение амплитуды гармонической составляющей тока КЗ к амплитуде номинального тока генератора не менее двух [5].

Как будет показано в дальнейшем, время до насыщения ТТ в переходном режиме целесообразно задавать не более  $0,5T$ . При этом затухание гармонической составляющей тока КЗ можно не учитывать и использовать упрощённую формулу [6]

$$i_1 = I_{1m} [e^{-t/T_1} \cos \psi - \cos(\omega t + \psi)], \quad (8)$$

где  $T_1$  – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ;  $\psi$  – начальная фаза сверхпереходной ЭДС генератора или системы;  $I_{1m}$  – амплитуда первичного тока ТТ.

Формула (8) обеспечивает достаточную точность при  $T_1 \geq 2T$  (что и имеет место быть при КЗ вблизи электрических станций).

Время  $t_s$  до насыщения ТТ в переходном режиме при активной нагрузке ТТ и первичном токе в соответствии с выражением (8) можно найти, используя уравнение [6]

$$\frac{B_{s,\text{усл}} - B_r}{B_m} = \omega T_1 (e^{-t_s/T_2} - e^{-t_s/T_1}) \cos \psi + \sin \psi e^{-t_s/T_2} - \sin(\omega t_s + \psi), \quad (9)$$

где  $B_{s,\text{усл}}$  – индукция условного насыщения магнитопровода (при использовании спрямлённой характеристики намагничивания);  $B_r$  – остаточная индукция;  $B_m$  – амплитуда гармонической составляющей индукции, вычисленная при условии, что отсутствует насыщение магнитопровода;  $T_2$  – постоянная времени вторичного контура ТТ при ненасыщенном магнитопроводе.

Уравнение (9) целесообразно преобразовать к виду

$$\frac{B_{s,\text{усл}}(1 - B_{r*})}{B_m} = K_{Ba}, \quad (10)$$

где  $B_{r*} = B_r/B_{s,\text{усл}}$ .

Коэффициент  $K_{Ba}$  равен правой части уравнения (9). Он учитывает увеличение индукции в переходном режиме из-за влияния аperiodической составляющей первичного тока.

На основании положений [6] и формулы (3) несложно показать, что с достаточной точностью соблюдается равенство

$$\frac{B_{s, \text{усл}}}{B_m} = \frac{K'_{\text{пр}}}{I_{\text{кз}^*}} \quad (11)$$

С учётом формул (10) и (11) получаем условие для выбора приведённой предельной кратности ТТ

$$K'_{\text{пр}} \geq \frac{K_{Ba} I_{\text{кз}^*}}{1 - B_{r^*}} \quad (12)$$

При  $K_{Ba} = 1$  и  $B_{r^*} = 0$  формула (12) совпадает с формулой (4) для установившегося режима.

В соответствии с формулой (9) коэффициент  $K_{Ba}$  является функцией постоянных времени  $T_1$  и  $T_2$ , времени до насыщения  $t_s$  и начальной фазы  $\psi$ . Чтобы чрезмерно не завышать требования к ТТ, выпускаемым в настоящее время в России, целесообразно время  $t_s$  принимать не более 10 мс. Постоянная времени  $T_2$  до насыщения современных ТТ довольно велика (порядка 5 с [6]). Поэтому её влияние на коэффициент  $K_{Ba}$  при  $t_s \leq 10$  мс пренебрежимо мало.

Постоянная времени  $T_1$  при КЗ на линиях вблизи от шин высшего напряжения электрических станций обычно не менее 0,05 с. Анализ зависимости  $K_{Ba} = f(T_1)$  при  $\psi = 0$  и изменении  $T_1$  в пределах от 0,05 до 0,3 с показал, что влияние  $T_1$  хотя и имеет заметный характер, но не является решающим. В итоге, наибольшее влияние на значения  $K_{Ba}$  оказывают две величины:  $t_s$  и  $\psi$ .

Обычно при исследовании переходных токов небаланса дифференциальных защит в качестве худшего случая рассматривают  $\psi = 0$ , так как при этом получается наибольший ток небаланса [7]. Однако для современных цифровых дифференциальных защит трансформаторов существенное значение имеет сам по себе момент времени  $t_s$  до насыщения ТТ [6, 8]. В связи с этим были проведены исследования зависимости  $K_{Ba} = f(t_s)$  при изменении  $T_1$  в пределах от 0,05 до 0,3 с и  $\psi$  в пределах от 0 до  $60^\circ$ . Эти исследования показали, что в качестве расчётного для дифференциальных защит трансформаторов целесообразно принимать  $\psi = 30^\circ$ , поскольку при этом начальное значение аperiodической составляющей тока КЗ уменьшается всего на 13%, а коэффициент  $K_{Ba}$  увеличивается на 15 – 30%. Графики зависимости  $K_{Ba} = f(t_s)$  при  $\psi = 30^\circ$  и различных  $T_1$  приведены на рис. 1.

Кривые начинаются при  $t_s = 2$  мс, так как принято, что в любом случае  $t_s$  должно быть не менее 2 мс (0,002 с). С помощью указанных кривых можно находить значения  $K_{Ba}$  при заданных значениях  $T_1$  и  $t_s$ . При выводе формулы (12) было принято, что  $B_{s, \text{усл}} = B_{\text{пр}} = 1,8 \div 1,85$  Тл.

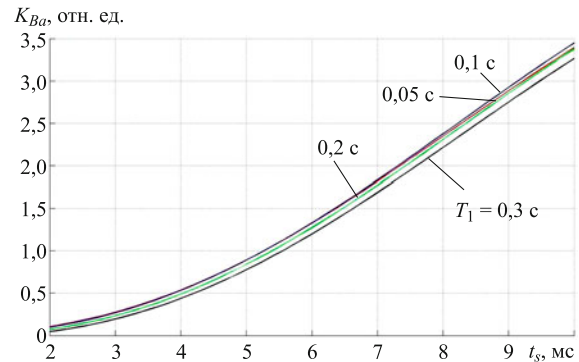


Рис. 1. Графики зависимости коэффициента  $K_{Ba}$  от времени до насыщения  $t_s$  при начальной фазе сверхпереходной ЭДС генератора  $30^\circ$  и различных значениях постоянной времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ  $T_1$

Рассматривается применение ТТ с замкнутым кольцевым магнитопроводом без воздушного зазора (класса TPS или TPX по терминологии МЭК 60044-6). При этом имеется в виду, что используются холоднокатаные стали марок 3411 – 3414. Для таких сталей можно принимать расчётное максимальное значение остаточной индукции в цикле неуспешного автоматического повторного включения (АПВ)

$$B_{r^*} = \frac{B_r}{B_{\text{пр}}} = \frac{1,2}{1,85} = 0,65.$$

Указанное значение  $B_{r^*}$  может приниматься при расчёте  $K'_{\text{пр}}$  со стороны высшего напряжения (ВН) блочного трансформатора (КЗ на шинах ВН или на линии, подключённой к шинам). На сторонах низшего напряжения (НН) блочного трансформатора или трансформатора собственных нужд (ТСН) АПВ обычно не применяется. Кроме того, необходимо учитывать, что КЗ в указанных случаях бывают относительно редко. С учётом изложенного можно принимать  $B_{r^*} \approx 0,3$ .

Как видно из формулы (7), отношение  $K_{\text{пр}}/K_{\text{ном}}$  зависит от отношения  $r_{\text{нр, расч}}/r_{\text{обм2}}$ . Вследствие этого у ТТ с вторичным номинальным током 1 А (при прочих равных условиях) значение  $K_{\text{пр}}$  может быть получено больше, чем у ТТ с вторичным номинальным током 5 А. Учитывая изложенное, расчётное значение  $t_s$  следует принимать:

7 – 8 мс – для ТТ с вторичным номинальным током 5 А;

10 мс – для ТТ с вторичным номинальным током 1 А.

На ответвлении к ТСН, как правило, имеются ограничения по использованию ТТ с первичным номинальным током, значительно большим номинального тока ТСН, например, для встроенных ТТ в ТСН. С учётом этого  $I_{\text{ном, ТТ}}$  получается значительно меньше  $I_{\text{ном, Т}}$  блочного трансформатора со стороны НН. Из формулы (3) видно, что при этом

$K'_{пр}$  получается меньше  $K_{пр}$ . В таких случаях следует использовать условие (4). Далее можно вычислять  $K_{Ba}$  по формуле

$$K_{Ba} = (1 - B_{r,*}) = 1 - 0,3 = 0,7 \quad (13)$$

и по кривым на рис. 1 находить время до насыщения ТТ.

При КЗ на ответвлении к ТСН могут получаться весьма большие значения токов [6]. В таких случаях для выполнения условия (4) может оказаться необходимым применение ТТ с вторичным номинальным током 1 А.

Увеличение  $K'_{пр}$  приводит также к уменьшению погрешностей ТТ на интервале времени насыщенного состояния магнитопровода. Это видно из следующего. Постоянную времени  $T_2$  вторичного контура ТТ на интервале насыщенного состояния магнитопровода можно вычислять по приближённой формуле [7]

$$T_{2s} \approx \frac{\mu_{диф} w_2^2 S_M}{l_{cp} (r_{обм2} + r_{нг.расч})}, \quad (14)$$

где  $\mu_{диф}$  – дифференциальная магнитная проницаемость (находится по насыщенной части спрямлённой характеристики намагничивания);  $l_{cp}$  – средняя длина магнитной линии.

Используя формулу (1), несложно показать, что равенство (14) можно записать в следующем виде:

$$\omega T_{2s} \approx \frac{\mu_{диф} I_{уд.ном} K_{пр}}{B_{пр}}, \quad (15)$$

где

$$I_{уд.ном} = \frac{\sqrt{2} I_{ном.ТТ} w_1}{l_{cp}}. \quad (16)$$

Согласно формуле (16),  $I_{уд.ном}$  представляет собой амплитуду напряжённости магнитного поля в сердечнике при номинальном первичном токе и разомкнутой вторичной обмотке ТТ.

Расчётное значение  $\mu_{диф}$  уменьшается при увеличении максимального значения напряжённости магнитного поля  $H_{макс}$  (рассматриваются переходные процессы при  $H_{макс} \geq 1000$  А/м). При насыщении магнитопровода ТТ в переходном режиме и  $t_s \leq 10$  мс можно приближённо полагать

$$H_{макс} \approx K_{уд} I_{кз*} I_{уд.ном} (I_{ном.т} / I_{ном.ТТ}), \quad (17)$$

где  $K_{уд}$  – ударный коэффициент.

Значение  $I_{уд.ном}$  является параметром ТТ. Значение  $H_{макс}$  зависит от отношения  $I_{ном.т} / I_{ном.ТТ}$  и, следовательно, от условий применения ТТ.

Анализ формул (15) – (17) с учётом зависимости  $\mu_{диф} = f(H_{макс})$  показал, что  $T_{2s}$  возрастает при увеличении параметра  $K'_{пр}$ .

Зная произведение  $\omega T_{2s}$ , можно вычислять относительные амплитуды первой гармоники намагничивающего  $I_{0m*}$  и вторичного  $I_{2m*}$  токов (за базовое значение принимается амплитуда гармонической составляющей первичного тока, приведённого к вторичной обмотке  $w_2$ ) по следующим формулам:

$$I_{0m*} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega T_{2s})^2}}; \quad (18)$$

$$I_{2m*} = \frac{\omega T_{2s}}{\sqrt{1 + (\omega T_{2s})^2}}. \quad (19)$$

При возрастании  $T_{2s}$  ток  $I_{0m*}$  уменьшается [формула (18)], а ток  $I_{2m*}$  увеличивается [формула (19)]. В конечном итоге можно полагать, что  $I_{0m*}$  уменьшается, а  $I_{2m*}$  увеличивается при возрастании  $K'_{пр}$ .

Как видно из формул (3) и (7), приведённая предельная кратность  $K'_{пр}$  зависит от отношения  $I_{ном.ТТ} / I_{ном.т}$  и расчётного сопротивления нагрузки  $r_{нг.расч}$ . Последнее зависит от схемы соединения вторичных обмоток ТТ и вида КЗ [2]. С учётом изложенного, вряд ли можно считать конструктивным требованием к предприятиям – изготовителям ТТ об обеспечении определённого уровня трансформации на интервале насыщенного состояния сердечника (как это предлагается в [8]).

Более полезным было бы обязать предприятия – изготовители ТТ предоставлять в справочных материалах зависимость  $B_{макс} = f(H_{макс})$  магнитопровода хотя бы до значения  $H_{макс} = I_{уд.ном}$  (но не менее 3000 А/м). Это позволило бы более точно оценивать значения  $\mu_{диф}$  в области насыщенного состояния магнитопровода ТТ. Как известно,  $\mu_{диф}$  в области насыщения получается больше при использовании худших марок холоднокатаной электротехнической стали, например 3411 – 3413.

Следует отметить, что ТТ, применяемые на генераторном напряжении, могут иметь довольно большие значения параметра  $I_{уд.ном}$ . Например, ТТ типа ТШ20 производства ОАО ВО “Электроаппарат”, г. Санкт-Петербург, согласно формуле (16), имеет следующее значение указанного параметра для  $I_{ном.ТТ} = 16\,000$  А:

$$I_{уд.ном} = \frac{\sqrt{2} \cdot 16\,000}{2,59} = 8736 \text{ А/м}.$$

Однако каких-либо сведений о характеристике намагничивания предприятие-изготовитель не приводит.

В целом следует отметить, что в современных условиях задача по выявлению особенностей формы кривой вторичного тока ТТ в переходных режимах может быть решена путём компьютерного моделирования (на базе численных методов реше-



ния соответствующих нелинейных дифференциальных уравнений). При этом может быть учтено взаимное влияние ТТ в трёхфазной группе в переходном режиме при насыщении одного или нескольких ТТ.

Использование обобщённого параметра  $K'_{пр}$  позволяет быстрее выявить наиболее тяжёлые (расчётные) режимы внешних КЗ и тем самым повысить полезную результативность имитационного моделирования.

Необходимо упомянуть ещё об одной проблеме. Для передачи электрической энергии от генератора к трансформатору применяются пофазно экранированные токопроводы (при номинальных токах 2000 А и более) [9]. При этом используются ТТ без собственной первичной обмотки, встраиваемые в токопровод, например ТТ типа ТШ20 на первичные номинальные токи от 8000 до 16 000 А, ТТ типа ТШВ24 на первичные номинальные токи 24 000 и 30 000 А и др.

Расстояния между осями фаз сравнительно невелики. Например, токопровод в цепи турбогенератора ТВВ-500 на номинальное напряжение 20 кВ имеет расстояние между осями 1400 – 1500 мм. При этом магнитное поле соседней фазы (без учёта экранирования) может приводить к насыщению магнитопровода ТТ и снижению предельной кратности  $K_{пр}$  [по сравнению с вычисленной по формуле (1)].

Согласно ГОСТ 7746-2001 [4], проверка погрешностей ТТ без собственной первичной обмотки должна проводиться при включении в петлю тока (с учётом влияния магнитного поля соседней фазы). Это приводит к существенному снижению предельной кратности по точности. Например, у упоминавшихся ТТ типа ТШ20 на первичные номинальные токи от 8000 до 16 000 А одно и то же значение предельной кратности, равное 9. ТТ типа ТШВ24 производства ОАО ВО “Электроаппарат” имеют следующие значения параметров:

номинальная мощность вторичной нагрузки  $S_{нг} = 100 \text{ В} \cdot \text{А}$ ;

$K_{ном} = 5$  при первичном номинальном токе 24 000 А;

$K_{ном} = 6$  при первичном номинальном токе 30 000 А.

При этом в диапазоне сопротивления нагрузок от 1 до 4 Ом значения предельной кратности по точности остаются неизменными.

При установке ТТ под кожухом экрана влияние переменного магнитного поля соседней фазы снижается в 40 – 100 раз (в зависимости от параметров экрана) [9]. При этом значение предельной кратности  $K_{пр}$  существенно возрастает. Ориентировочно его можно вычислить по формуле (1).

Например, ТТ типа ТШВ24 с коэффициентом трансформации 24000/5 имеет следующие технические данные:  $w_2 = 4800$ ;  $s_m = 6,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ;  $r_{обм2} = 5,2 \text{ Ом}$ .

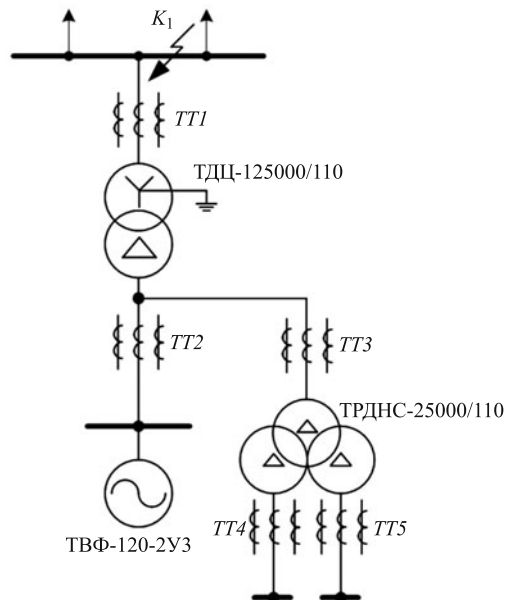


Рис. 2. Расчётная схема для выбора ТТ на стороне ВН трансформатора блока

Используя формулы (5) и (1), при  $S_2 = S_{2ном}$  вычисляем

$$z_{2ном} = \sqrt{5,2^2 + 1,6 \cdot 5,2 \cdot 4 + 4^2} = 8,73 \text{ Ом};$$

$$K_{ном} = \frac{314 \cdot 1,85 \cdot 4800 \cdot 6,4 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{2} \cdot 5 \cdot 8,73} = 28,9.$$

Полученное значение  $K_{ном}$  примерно в 6 раз превышает значение, указанное в технической документации на ТТ (полученное по результатам испытаний без учёта экранирования). Из этого следует, что в новой редакции ГОСТ 7746-2001 для ТТ, устанавливаемых в пофазно экранированные токопроводы, следует исключить норму об испытаниях ТТ в петле КЗ с целью нахождения  $K_{ном}$ . После введения такого изменения можно будет пользоваться формулой (1) для расчёта  $K_{пр}$ .

В настоящее время можно принимать расчётное сопротивление нагрузки исходя из условия  $r_{нг,расч} \leq (0,5 \div 1,0)z_{нг,ном}$ . При этом коэффициент 0,5 следует использовать для ТТ типа ТШВ24; для ТТ типа ТШ20 можно считать  $r_{нг,расч} \leq (0,8 \div 1,0)z_{нг,ном}$ . Это обеспечит приемлемые погрешности указанных ТТ в переходных режимах.

*Пример расчёта.* Применим описанные рекомендации при выборе ТТ на стороне ВН трансформатора блока в схеме, представленной на рис. 2.

Расчётным режимом при выборе ТТ1 является КЗ на шинах 110 кВ. При этом имеем:

при трёхфазном КЗ:  $I_{к*}^{(3)} = 3,77$ ,  $T_1^{(3)} = 0,2 \text{ с}$ ;

при однофазном КЗ:  $I_{к*}^{(1)} = 4,53$ ,  $T_1^{(1)} = 0,1 \text{ с}$ .

Для определения расчётного значения вторичной нагрузки ТТ необходимо задаться параметрами соединительных проводов и переходного сопротивления соединительных контактов в токовых цепях:

$\rho = 1,75 \cdot 10^{-8}$  Ом/м – удельное сопротивление меди;

$s = 2,5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup> – сечение соединительных проводов;

$l = 100$  м – длина соединительного провода;

$r_{пер} = 0,1$  Ом – переходное сопротивление контактов.

При выборе минимального первичного номинального тока ТТ обычно задаются условием

$$\min(I_{1ном.ТТ}) \geq \sqrt{3}I_{ном.Т} = \sqrt{3} \cdot 596 = 1032 \text{ А.}$$

Выбираем ТТ типа ТРГ-110-1200/5 с элегазовой изоляцией для наружной установки производства “Уралэлектротражмаш”. Данный ТТ имеет следующие параметры:

коэффициент трансформации  $k_{ТТ} = 1200/5$ ;

номинальная мощность вторичной обмотки  $S_{2ном} = 40$  В·А;

номинальная предельная кратность  $K_{ном} = 20$ ;

косинус угла нагрузки  $\cos \varphi_{нг} = 0,8$ ;

сопротивление обмотки  $w_2$  постоянному току  $r_{обм2} = 0,35$  Ом.

Модуль номинального сопротивления вторичной нагрузки ТТ

$$z_{нг.ном} = \frac{S_{2ном}}{I_{2ном.ТТ}^2} = \frac{40}{5^2} = 1,6 \text{ Ом.}$$

По формуле (5) вычисляем модуль комплексного сопротивления вторичной цепи ТТ на основании паспортных данных

$$z_{2ном} = \sqrt{0,35^2 + 1,6 \cdot 0,35 \cdot 1,6 + 1,6^2} = 1,89 \text{ Ом.}$$

Сопротивление жилы контрольного кабеля при  $s_{ж} = 2,5$  мм<sup>2</sup>

$$r_{\phi} = \frac{\rho l}{s_{ж}} = \frac{1,75 \cdot 10^{-8} \cdot 100}{2,5 \cdot 10^{-6}} = 0,7 \text{ Ом.}$$

При трёхфазном КЗ нагрузка на ТТ определяется последовательно соединёнными сопротивлениями жилы контрольного кабеля и переходного сопротивления контактов. При однофазном КЗ сопротивление нагрузки возрастает за счёт обтекания током нулевой жилы контрольного кабеля. Исходя из этого, имеем:

$$r_{нг.расч}^{(3)} = r_{\phi} + r_{пер} = 0,7 + 0,1 = 0,8 \text{ Ом;}$$

$$r_{нг.расч}^{(1)} = 2r_{\phi} + r_{пер} = 2 \cdot 0,7 + 0,1 = 1,5 \text{ Ом.}$$

Из формулы (7) видно, что при увеличении  $r_{нг.расч}$  реальная предельная кратность уменьшается. Следовательно, в качестве расчётного режима следует принимать режим однофазного КЗ.

Проверим выбранный ТТ на соответствие требованию (12) в режиме однофазного КЗ.

Согласно формулам (5) и (7), вычисляем реальную предельную кратность ТТ

$$K_{пр} = 20 \frac{1,89}{0,35 + 1,5} = 20,4.$$

По формуле (3) находим приведённую предельную кратность

$$K'_{пр} = \frac{1200}{596} 20,4 = 41,1.$$

Зададимся временем до насыщения ТТ  $t_s = 8$  мс и по рис. 1 для постоянной времени  $T_1 = 0,1$  с находим коэффициент увеличения индукции

$$K_{Ba} = 2,37.$$

В переходном режиме для ТТ должно выполняться условие (12)

$$K'_{пр} \geq \frac{2,37 \cdot 4,53}{1 - 0,65} = 30,7.$$

Полученный результат показывает, что выбранный ТТ проходит по условию проверки в переходном режиме.

Несложно показать, что в данном случае при трёхфазном КЗ значение  $K'_{пр}$  получается равным 66,2. Такое значение  $K'_{пр}$  является благоприятным с точки зрения обеспечения быстродействия дифференциальной защиты при трёхфазном КЗ в защищаемой зоне.

## Выводы

1. Погрешности в переходном режиме на интервале времени насыщенного состояния магнитопровода зависят не только от параметров ТТ [ $w_1$ ,  $w_2$ ,  $s_m$ ,  $l_{ср}$ ,  $r_{обм2}$ , зависимости  $B_{макс} = f(H_{макс})$ ], но и от условий его применения (отношения  $I_{1ном.ТТ}/I_{ном.Т}$ ,  $r_{нг.расч}$  и др.). В связи с этим предъявление требований к предприятиям – изготовителям ТТ на базе каких-либо погрешностей (например, по первой гармонике вторичного и намагничивающего токов) нецелесообразно.

2. Более эффективным является формулирование требований к ТТ с использованием обобщённого параметра  $K'_{пр}$ . На этой базе разработана методика расчёта  $K'_{пр}$  в зависимости от времени  $t_s$  до насыщения магнитопровода, остаточной индукции  $B_r$  и относительного значения тока

внешнего КЗ. При этом показано, что применение повышенных значений  $K'_{пр}$  приводит также к уменьшению погрешностей ТТ на интервале времени насыщенного состояния магнитопровода. Важно отметить, что предлагаемая методика расчёта  $K'_{пр}$  может быть сравнительно легко освоена проектными организациями.

3. Выявление особенностей формы кривой вторичного тока ТТ в переходных режимах целесообразно выполнять с помощью компьютерного моделирования. С этой целью следует обязать предприятия – изготовители ТТ предоставлять в справочных материалах зависимость  $B_{\max} = f(H_{\max})$  магнитопровода хотя бы до значения  $H_{\max} = I_{\text{уд.номт}}$  (но не менее 3000 А/м).

### Список литературы

1. *Правила устройства электроустановок.* – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 461 с.
2. *Королев, Е. П.* Расчёты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты [Текст] / Е. П. Королев, Э. М. Либерзон. – М.: Энергия, 1980. – 208 с.
3. *Афанасьев, В. В.* Трансформаторы тока [Текст] / В. В. Афанасьев, Н. М. Адоньев, В. М. Кибель [и др.]. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 416 с.
4. *Трансформаторы тока.* Общие технические условия [Текст]: ГОСТ 7746-2001. – Введ. 2003 – 01 – 01. – М.: Изд-во стандартов, 2012. – 29 с.
5. *Крючков, И. П.* Переходные процессы в электроэнергетических системах [Текст] / И. П. Крючков, В. А. Старшинов, Ю. П. Гусев, М. В. Пираторов; под ред. И. П. Крюčkова. – М.: Изд. дом МЭИ, 2008. – 416 с.
6. *Дмитренко, А. М.* Анализ и исследование способов торможения цифровых дифференциальных защит блочных трансформаторов [Текст] / А. М. Дмитренко, Д. П. Журавлев // *Электрические станции.* – 2014. – № 11. – С. 36 – 41.
7. *Дроздов, А. Д.* Электрические цепи с ферромагнитными сердечниками в релейной защите [Текст] / А. Д. Дроздов, А. С. Засыпкин, С. Л. Кужеков [и др.]; под ред. В. В. Платонова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.
8. *Кужеков, С. Л.* Об обеспечении необходимой точности работы защитных трансформаторов тока в переходных режимах [Текст] / С. Л. Кужеков, А. А. Дегтярев, К. В. Чередниченко // *Электрические станции.* – 2015. – № 5. – С. 53 – 60.
9. *Васильев, А. А.* Электрическая часть станций и подстанций [Текст] / А. А. Васильев, И. П. Крючков, Е. Ф. Наяшкова [и др.]; под ред. А. А. Васильева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

### УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

С начала 2016 г. редакция журнала «Электрические станции» принимает статьи только через сайт журнала: [www.elst.energy-journals.ru](http://www.elst.energy-journals.ru) (статьи в журнал «Энергохозяйство за рубежом» — через сайт: [www.ehz.energy-journals.ru](http://www.ehz.energy-journals.ru)). Пожалуйста, зарегистрируйтесь как автор на сайте и передайте статью, следуя пошаговой инструкции. Если что-то не будет получаться, обращайтесь в редакцию.

Передав статью через сайт, вы будете наблюдать весь путь прохождения своей статьи – от рецензии до вёрстки! Вы сможете внести правки после редактирования, посмотреть вёрстку и сделать свои замечания, предложения и др.

Редакция