



Авторы:

д.т.н. Дмитренко А.М.^{1,2},
к.т.н. Наумов В.А.^{1,2},
Солдатов А.В.^{1,2},
Журавлев Д.П.²,

¹ЧГУ им. И.Н. Ульянова,

²ООО НПП «ЭКРА»,

г. Чебоксары, Россия.

D.Sc. Dmitrenko A.M.^{1,2},

Ph.D. Naumov V.A.^{1,2},

Soldatov A.V.^{1,2},

Zhuravlev D.P.²,

¹Chuvash state university,

²Research-and-production

enterprise EKRA,

Cheboksary, Russia.

Abstract: it is known that the transient regimes in the network are accompanied by the appearance of an aperiodic component in the short-circuit current. Despite the fact that the magnitude of this current does not always exceed the maximum multiplicity of current transformers (CTs), the presence of a significant number of powerful generators and transformers in the network leads to an increase the time

О МЕТОДЕ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

ABOUT THE METHOD OF INCREASING THE QUALITY OF FUNCTIONING OF TRANSFORMERS DIFFERENTIAL PROTECTION WHILE USING ELECTROMAGNETIC CURRENT TRANSFORMERS

Аннотация: известно, что переходные режимы в сети сопровождаются появлением аperiodической составляющей в токе короткого замыкания. Несмотря на то, что величина такого тока не всегда превышает предельную кратность трансформаторов тока (ТТ), наличие в сети значительного количества мощных генераторов и трансформаторов приводит к увеличению постоянной времени затухания и, как следствие, к увеличению длительности протекания аperiodической составляющей. Совокупность данных факторов, в свою очередь, приводит к насыщению магнитопровода ТТ и искажению формы кривой вторичного тока. В результате возможны как ложная работа чувствительных органов защит, так и их замедление в срабатывании. По результатам проведенных исследований предложены мероприятия, позволяющие повысить качество функционирования дифференциальных защит трансформаторов.

Ключевые слова: трансформатор тока, дифференциальная защита, время до насыщения, предельная кратность по точности, остаточная индукция, спрямленная характеристика намагничивания.

constant of the decay and, as a consequence, to an increase in the duration of the aperiodic component. The combination of these factors, in turn, leads to saturation of the CTs magnetic circuit and distortion of the shape of the secondary current curve. As a result, both the false operation of the sensitive protection organs and their deceleration in operation are possible. Based on the results of the research, measures that improve the quality of functioning of transformer differential protection were proposed.

Введение

В настоящей статье рассматривается применение функций дифференциальной защиты в устройствах, выполненных на базе цифровых (микропроцессорных) технологий обработки сигналов.

Дифференциальные защиты являются основными защитами трансформаторов, поэтому к ним предъявляются довольно высокие требования в части качества функционирования. Так, согласно стандарту ПАО «ФСК ЕЭС» [1], чувствительная ступень дифференциальной защиты с токовым торможением должна иметь диапазон уставок по начальному току срабатывания в пределах $(0,2 \div 0,6)I_{НОМ.Т}$ где $I_{НОМ.Т}$ – номинальный ток защищаемого трансформатора.

При таких сравнительно малых начальных токах срабатывания приходится считать

ся с переходными токами небаланса, обусловленными насыщением защитных ТТ при относительно малых сквозных токах (в пределах $1 \div 2,5I_{НОМ.Т}$).

Чувствительные органы цифровых дифференциальных защит имеют время срабатывания на синусоидальном токе не более 25-30 мс. В переходных режимах может происходить некоторое их замедление вследствие насыщения магнитопроводов ТТ. Время протекания тока при коротком замыкании (КЗ) вблизи шин электрической станции по условию устойчивости не должно превышать 0,14 с [2] (при действии на выключатель основных защит). Полагая время отключения быстродействующего выключателя равным 40 мс получаем, что время срабатывания дифференциальной защиты должно быть не более 100 мс.



Keywords: current transformer, differential protection, saturation time, maximum multiplicity of accuracy, residual induction, aligned magnetization characteristic.



Дмитренко

Александр Михайлович

Дата рождения: 14.06.1940 г. Окончил в 1962 г. электроэнергетический факультет Новочеркасского политехнического института. В 1993 г. защитил в Новочеркасском государственном техническом университете докторскую диссертацию на тему «Времяимпульсные дифференциальные защиты элементов энергосистем». Профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ЧГУ им. И.Н. Ульянова.



Наумов

Владимир Александрович

Окончил в 2001 г. электроэнергетический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова по специальности «Инженер». В 2002 г. защитил магистерскую диссертацию. В 2005 г. защитил во ВНИИЭ кандидатскую диссертацию «Анализ и совершенствование продольных дифференциальных защит генераторов и блоков генератор-трансформатор». Заместитель генерального директора – технический директор ООО НПП «ЭКРА».

Условия функционирования ТТ

В настоящей статье рассматриваются вопросы функционирования дифференциальных защит трансформаторов электрических станций совместно с ТТ классов Р и ТРХ, магнитопроводы которых не имеют немагнитного зазора. Такие ТТ не только получили весьма широкое распространение в электроэнергетических системах России, но во многих случаях активно производится их модернизация. Например, на номинальное напряжение 500 кВ сравнительно недавно разработаны и выпускаются электротехническими предприятиями России одноступенчатые ТТ с элегазовой изоляцией типов ТГФ-500 и ТОГП-500. Модернизированные и вновь разработанные ТТ должны соответствовать требованиям ГОСТ 7746-2015 [3]. Согласно [3], к основным параметрам ТТ относятся:

- класс точности 5Р или 10Р;
- номинальная предельная кратность по точности $K_{НОМ}$ при заданной номинальной мощности вторичной нагрузки $S_{2НОМ}$.

Значения $K_{НОМ}$ должны находиться в пределах от 5 до 30; по согласованию с потребителем могут выпускаться ТТ с $K_{НОМ} > 30$.

Номинальная мощность нагрузки задается при $\cos\varphi_{НГ} = 0,8$. Номинальные значения $S_{2НОМ}$ должны находиться в пределах от 3 до 100 ВА.

При использовании шкафов микропроцессорных защит вторичная нагрузка ТТ является практически активной.

В схемах защит мощных трансформаторов, как правило, используются ТТ с витым кольцевым магнитопроводом. При этом вторичная обмотка равномерно наматывается на магнитопровод. Следовательно, реактивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки получается пренебрежимо малым по сравнению с ее сопротивлением постоянному току $r_{ОБМ2}$. С учетом изложенного, выражение для предельной кратности по точности можно записать в следующем виде:

$$K_{ПР} = \frac{\omega B_{ПР} w_2 S_M}{\sqrt{2} I_{2НОМ} (r_{ОБМ2} + r_{НГ.РАСЧ})}, \quad (1)$$

где ω – 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.

Расчетное сопротивление нагрузки $r_{НГ.РАСЧ}$ зависит от схемы соединения вторичных обмоток ТТ и вида КЗ. Оно может вычисляться по известной методике, изложенной в [4].

Предельные кратности ТТ на классы точности 5Р или 10Р обозначаются K_5 или K_{10} соответственно. При $B_{ПР} = 1,8 \div 1,85$ Тл значения K_5 и K_{10} для одного и того же ТТ различаются мало, поэтому при анализе можно пользоваться обобщенным понятием $K_{ПР}$.

Использование формулы (1) не всегда возможно, поскольку число витков w_2 и сечение магнитопровода S_M приводятся в справочных данных не всеми производителями ТТ. В таких случаях можно вычислять предельную кратность $K_{ПР}$ на основе паспортных параметров по следующей формуле [5]:

$$K_{ПР} = K_{НОМ} \frac{\sqrt{r_{ОБМ2}^2 + 1,6 r_{ОБМ2} z_{НГ.НОМ} + z_{НГ.НОМ}^2}}{r_{ОБМ2} + r_{НГ.РАСЧ}}, \quad (2)$$

где $z_{НГ.НОМ} = S_{2НОМ} / I_{2НОМ}^2$.

Следует отметить, что согласно [3], сопротивление $r_{ОБМ2}$ должно приводиться в паспорте ТТ.

При расчетах параметров срабатывания (уставок) дифференциальных защит трансформаторов в качестве базисной величины принимается номинальный ток трансформатора $I_{НОМ.Т}$. С учетом этого вводится понятие приведенной к $I_{НОМ.Т}$ предельной кратности [5]:

$$K'_{ПР} = \frac{I_{НОМ.ТТ}}{I_{НОМ.Т}} K_{ПР}, \quad (3)$$

где $I_{НОМ.ТТ}$ – первичный номинальный ток ТТ.

При этом требования к ТТ по условию установившегося режима, изложенные в [4], можно записать в следующем виде:

$$K'_{ПР} \geq I_{КЗ.ВН*}, \quad (4)$$

где $I_{КЗ.ВН*} = I_{КЗ.ВН} / I_{НОМ.Т}$;

$I_{КЗ.ВН}$ – максимальный ток внешнего КЗ.

При выполнении условия (4) действующее значение намагничивающего тока не превышает 10% от действующего значения вторичного тока ТТ. При этом можно полагать, что насыщение магнитопровода ТТ практически отсутствует. Однако в переходном режиме насыщение ТТ может возникнуть вследствие влияния апериодической составляющей тока КЗ.

Вопросам анализа и исследования намагничивающего и вторичного токов ТТ в переходных режимах посвящено много ра-



бот, большинство из которых обобщены в [6]. При этом показано, что в переходном режиме намагничивающий ток ТТ может существенно возрасти, а вторичный ток, соответственно, существенно снизиться. Вследствие нелинейности схемы замещения ТТ как в намагничивающем, так и во вторичном токах возникают высшие гармоники. Все это может приводить как к нежелательным срабатываниям дифференциальной защиты трансформатора при переходных сквозных токах, так и к замедлению при КЗ в защищаемой зоне.

В связи с широким распространением микропроцессорных технологий обработки сигналов при выполнении устройств релейной защиты (УРЗ) и, в частности, дифференциальных защит, появляется возможность выявления информации о первичном токе насыщенного ТТ. Анализ таких способов выполнен в [7]. При этом известные алгоритмы формирования сигнала, пропорционального первичному току ТТ, разделены на две группы:

- использующие параметры характеристики намагничивания ТТ;
- не использующие характеристики намагничивания ТТ.

Относительно первой группы можно согласиться с выводами авторов [7] о том, что основным недостатком, препятствующим их применению, является неизвестность остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ в момент возникновения КЗ.

В алгоритмах второй группы ведется поиск интервалов достаточно точной трансформации первичного тока ТТ, и по отсчетам вторичного тока на указанных интервалах формируются амплитуда и фаза первой гармоники первичного тока. При этом отмечается, что необходима предварительная частотная фильтрация вторичного тока ТТ, приводящая к тому, что только спустя 8-20 мс после начала переходного процесса можно получить достаточно точное значение первичного тока.

Анализ в [7] выполнен в слишком общем виде без учета ряда конкретных довольно тяжелых для второй

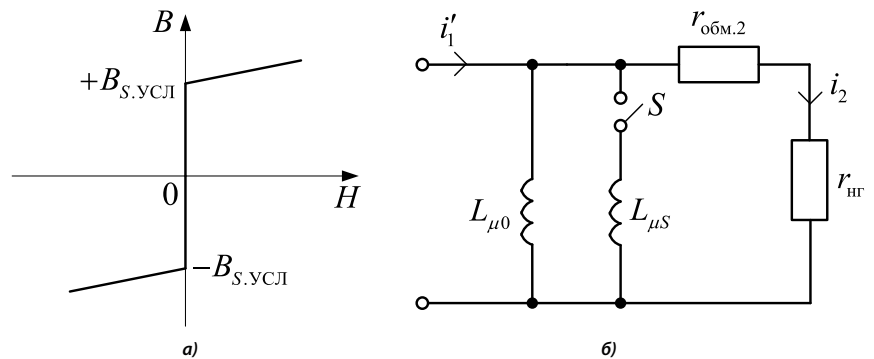


Рис. 1. Аппроксимация зависимости $B=f(H)$ (а) и упрощенная схема замещения ТТ (б)

группы алгоритмов режимов. В первую очередь следует отметить режим перехода одного вида КЗ в другой (так называемые последовательные КЗ).

Повышения качества функционирования дифференциальных защит

Для дифференциальных защит блочных трансформаторов расчетные режимы возникают при внешних КЗ на отходящих от шин ВН линиях. Поскольку нейтраль блочного трансформатора, как правило, заземлена, то возможен переход однофазного КЗ в двухфазное КЗ на землю и далее в трехфазное КЗ, связанное с землей. Как показано в [8], в таких случаях наблюдаются повышенные значения аперииодических составляющих в некоторых фазных токах. При этом кривая первичного тока ТТ в течение ряда периодов может быть однополярной, что приведет к исчезновению интервалов точной трансформации. Частотная фильтрация вторичных токов ТТ в таких режимах не может устранить довольно больших погрешностей по первой гармонике намагничивающего и вторичного токов. Следует отметить, что значения $I_{КЗ,ВН}^{(3)}$ при КЗ на стороне ВН блока «генератор-трансформатор» могут быть сравнительно невелики. Например, для блока, состоящего из генератора ТВВ-800-2 и трансформатора ТЦ-1000000/500, по данным расчетов в [6], получилось: $I_{КЗ,ВН}^{(3)} = 2,2$. Очевидно, что применение формулы (4) в таком случае приводит к существенно заниженным требованиям к ТТ.

Из изложенного видно, что в качестве одного из методов повышения качества функционирования дифференциальных защит трансформаторов следует рассматривать применение повышенных (по сравнению с условием (4)) значений $K_{ПР}$. Указанные значения следует находить по условиям функционирования ТТ в переходных режимах. Одним из базовых параметров функционирования ТТ в переходных режимах является время t_S до насыщения магнитопровода [6]. Большое значение имеет также уровень погрешностей ТТ после насыщения, например, по первой гармонике и др. С целью получения выводов общего плана целесообразно использовать аналитические методы расчетов. Приемлемые по точности результаты могут быть получены при использовании так называемой спрямленной характеристики намагничивания (СХН), приведенной на рис. 1, а [6].

Значение $B_{S,УСЛ}$ несколько зависит от максимального значения напряженности магнитного поля $H_{МАКС}$ в каждом периоде переходного процесса, что создает определенные трудности при получении результатов общего плана. Из формулы (1) видно, что $K_{ПР}$ можно рассматривать как обобщенный параметр ТТ с подключенной нагрузкой. С целью увязки параметров СХН с формулой (1) целесообразно задаваться условием: $B_{S,УСЛ} = B_{ПР}$. При этом вертикальный участок зависимости $B=f(H)$ следует рассматривать только в пределах от $-B_r$ до $+B_r$, где B_r – остаточная индукция.



При анализе переходных процессов в ТТ в режиме КЗ можно использовать упрощенную формулу для первичного тока [5]:

$$i_1 = I_{1m} (e^{-t/T_1} \cos \psi - \cos(\omega t + \psi)), \quad (5)$$

где T_1 – постоянная времени затухания апериодической составляющей первичного тока;

ψ – начальная фаза сверхпереходной ЭДС генератора или системы.

Формула (5) обеспечивает достаточную точность при $T_1 \geq 2T$, где T – период гармонической составляющей тока КЗ. При воздействии тока в соответствии с выражением (5) наблюдается однополярное намагничивание магнитопровода ТТ. Поскольку $B_r < B_{\text{ПР}}$, то при $B_r < B \leq B_{\text{ПР}}$ будет существовать некоторый намагничивающий ток i_{μ} . Это можно учесть введением в схему замещения ТТ поперечной ветви с индуктивностью $L_{\mu 0}$ (рис. 1, б). При этом постоянная времени T_2 при ненасыщенном магнитопроводе ($B < B_{\text{ПР}}$) равна

$$T_2 = \frac{L_{\mu 0}}{r_2}, \quad (6)$$

где $r_2 = r_{\text{ОБМ}2} + r_{\text{НГ.РАСЧ}}$.

Расчеты показали, что для холоднокатаных электротехнических сталей марок 3411-3413 и $K'_{\text{ПР}} \geq 20$ получается $T_2 \geq 1$ с.

В режиме насыщения магнитопровода (при замкнутом ключе S) имеем

$$T_{2S} \approx \frac{L_{\mu S}}{r_2}. \quad (7)$$

Как будет показано ниже, при расчете переходных токов небаланса представляют интерес случаи, при которых $T_{2S} \leq 0,03$ с. Таким образом, получается отношение $T_2/T_{2S} \geq 33,3$.

С учетом изложенного, время t_S до насыщения ТТ в первом периоде переходного процесса можно найти на базе уравнения, обоснованного в [5]:

$$\frac{K'_{\text{ПР}}(1 - B_{r*})}{I_{\text{КЗ}*}} = \omega T_1 (e^{-t_S/T_2} - e^{-t_S/T_1}) \cos \psi + e^{-t_S/T_2} \sin \psi - \sin(\omega t_S + \psi), \quad (8)$$

где $B_{r*} = B_r / B_{\text{ПР}}$.

При задании требований к ТТ с использованием обобщенного параметра $K'_{\text{ПР}}$ известными считаются: $I_{\text{КЗ.ВН}*}$, B_{r*} и T_1 . Как было показано выше, в схемах с мощными энергоблоками $I_{\text{КЗ.ВН}*}$ может быть сравнительно малым, поэтому целесообразно задать условием $I_{\text{КЗ.ВН.РАСЧ}*} \geq 4$. Чтобы чрезмерно не завышать требования к ТТ, желательно принимать $t_S \leq 10$ мс. При этом коэффициент e^{-t_S/T_2} весьма близок к 1, что в данном случае упрощает расчеты.

Обозначив правую часть уравнения (8) K_{Ba} , можно построить зависимость $K_{Ba} = f(t_S, T_1, \psi)$. Анализ указанной зависимости при изменении T_1 в пределах от 0,05 до 0,3 с и ψ в пределах от 0 до 60° показал, что в качестве расчетного следует принимать $\psi = 30^\circ$ [5]. При этом расчетное начальное значение апериодической составляющей тока КЗ уменьшается всего на 13%, а коэффициент K_{Ba} увеличивается значительно больше. Зависимости $K_{Ba} = f(t_S, T_1)$ при $\psi = 30^\circ$ приведены на рис. 2.

Задавшись значением t_S , по указанным кривым можно найти коэффициент K_{Ba} и далее по формуле

$$K'_{\text{ПР}} \geq \frac{K_{Ba} I_{\text{КЗ.ВН}*}}{1 - B_{r*}}, \quad (9)$$

найти требуемое значение $K'_{\text{ПР}}$.

Согласно кривым на рис. 2, при изменении t_S в пределах от 7 до 10 мс коэффициент K_{Ba} изменяется в пределах от 1,7 до 3,5.

Максимальное значение относительной остаточной индукции B_{r*} в цикле неуспешного АПВ для ТТ отечественного производства с использованием холоднокатаных сталей 3411-3413 можно принимать 0,65. При этом повышающий коэффициент $K_{\text{ПОВ}}$ (по сравнению с требованиями согласно формуле (4)) будет находиться в пределах 4,9 ÷ 10. Коэффициент $K_{\text{ПОВ}} = 10$ относится, в основном, к применению ТТ с вторичным номинальным током 1 А. Однако в ряде случаев значения $K_{\text{ПОВ}}$, близкие к 10, могут быть получены и при использовании ТТ с вторичным номинальным током 5 А. Например, в

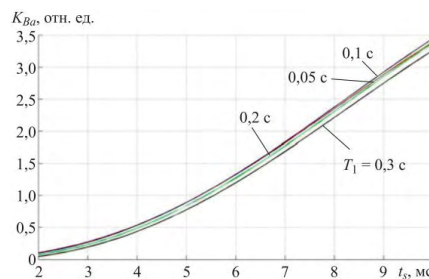


Рис. 2. Графики зависимости коэффициента K_{Ba} от времени до насыщения t_S при начальной фазе сверхпереходной ЭДС генератора 30° и различных значениях постоянной времени затухания апериодической составляющей T_1 тока КЗ

[5] приведен пример расчета ТТ типа ТРГ-110-1200/5 с элегазовой изоляцией для наружной установки производства «Уралэлектротяжмаш», примененного в схеме микропроцессорной защиты блочного трансформатора ТДЦ-125000/110. Указанный ТТ имеет следующие основные параметры:

- коэффициент трансформации $k_{\text{ТА}} = 1200/5$;
- номинальная мощность вторичной обмотки $S_{2\text{НОМ}} = 40$ ВА;
- номинальная предельная кратность $K_{\text{НОМ}} = 20$.

Длина контрольного кабеля принята 100 м, сечение жил кабеля $S_{\text{ж}} = 2,5$ мм². Группа соединения вторичных обмоток ТТ: звезда с нулевым проводом. В качестве расчетного режима получилось однофазное КЗ на шинах ВН. При этом $I_{\text{КЗ.ВН}}^{(1)} = 4,5$. Расчеты показали, что при $t_S = 8$ мс отношение $K'_{\text{ПР}}/I_{\text{КЗ.ВН}*}$ равно 8,9.

Упомянутый выше ТТ типа ТГФ-500 имеет следующие основные параметры:

- класс точности 5Р или 10Р;
- номинальная мощность вторичной обмотки $S_{2\text{НОМ}}$ в пределах от 30 до 75 ВА;
- номинальная предельная кратность $K_{\text{НОМ}}$ в пределах от 20 до 30;
- имеется исполнение на $I_{2\text{НОМ}} = 1$ А.

Очевидно, что при $I_{2\text{НОМ}} = 1$ А и использовании сердечников ТТ с максимальными параметрами $S_{2\text{НОМ}} = 75$ ВА и $K_{\text{НОМ}} = 30$ можно выполнить требования формулы (9)



Солдатов

Александр Вячеславович

Окончил в 2006 г. электроэнергетический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова по специальности «Инженер». Заместитель директора департамента автоматизации энергосистем по научному сопровождению produkcji ООО НПП «ЭКРА».



Журавлев

Дмитрий Павлович

Дата рождения: 19.03.1988 г. Окончил в 2011 г. ЧГУ им. И.Н. Ульянова по специальности «Электроснабжение промышленных предприятий». Инженер ООО НПП «ЭКРА».

даже при относительно большой длине контрольного кабеля на подстанциях напряжением 500 кВ.

Как указывалось выше, при сравнительно малых начальных токах срабатывания и наличии горизонтального участка тормозной характеристики [9] приходится считаться с переходными токами небаланса при сквозных токах в пределах $1 \div 2,5 I_{НОМ.Т}$.

На базе обобщенных параметров ТТ в [5] получено следующее выражение для T_{2S} :

$$T_{2S} \approx \frac{\mu_{ДИФ} I_{1УД.НОМ.м} K'_{ПР}}{\omega B_{ПР}}, \quad (10)$$

где $\mu_{ДИФ}$ – дифференциальная магнитная проницаемость (находится по насыщенной части СХН при $B > B_{ПР}$);

$$I_{1УД.НОМ.м} = \frac{\sqrt{2} I_{НОМ.ТТ} w_1}{l_{СР}}, \quad (11)$$

$l_{СР}$ – средняя длина магнитной линии.

Формула (10) справедлива для функционирования одиночного ТТ. Такой режим возникает, например, при внешнем однофазном КЗ на шинах ВН и схеме соединения вторичных обмоток ТТ «звезда с нулевым проводом». Следует отметить, что вследствие падения напряжения на нулевом проводе возникает возможность насыщения магнитопроводов ТТ других фаз. Однако при $I_{КЗ*} \leq 2,5$ насыщение в расчетных режимах, как правило, отсутствует.

На интервале насыщенного состояния магнитопровода относительные амплитуды первой гармоники намагничивающего $I_{\mu m*}$ и вторичного I_{2m*} токов (за базисное значение принимается амплитуда гармонической составляющей первичного тока, приведенного к вторичной обмотке w_2) можно вычислять по формулам [5]:

$$I_{\mu m*} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega T_{2S})^2}}; \quad (12)$$

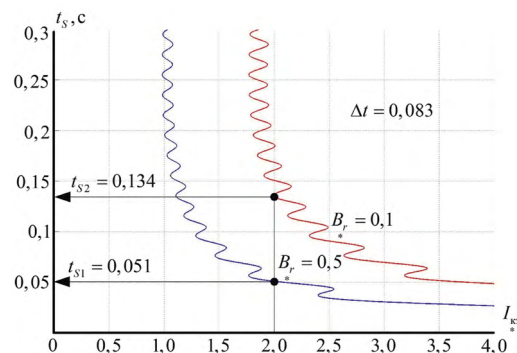


Рис. 3. Графики зависимости времени до насыщения t_s ТТ от относительного значения тока КЗ $I_{КЗ*}$

$$I_{2m*} = \frac{\omega T_{2S}}{\sqrt{1 + (\omega T_{2S})^2}}. \quad (13)$$

Согласно формуле (12), при $T_{2S} \leq 0,03$ с получаем $I_{\mu m*} \geq 0,11$.

Применительно к дифференциальным защитам трансформаторов выражение (10) целесообразно представить в следующем виде:

$$T_{2S} \approx \frac{\mu_{ДИФ} I'_{1УД.НОМ.м} K'_{ПР}}{\omega B_{ПР}}, \quad (14)$$

где

$$I'_{1УД.НОМ.м} = \frac{\sqrt{2} I_{НОМ.Т} w_1}{l_{СР}}. \quad (15)$$

Параметр $I'_{1УД.НОМ.м}$ численно равен амплитуде напряженности магнитного поля в сердечнике ТТ при номинальном токе защищаемого трансформатора и разомкнутой вторичной обмотке.

При $B > B_{ПР}$ расчетное значение $\mu_{ДИФ}$ уменьшается при увеличении напряженности магнитного поля H в сердечнике ТТ. Расчетное значение магнитного поля можно вычислять по формуле:

$$H_{РАСЧ} = I'_{1УД.НОМ.м} I_{КЗ*} e^{\frac{t_s + \Delta t_M}{T_1}}. \quad (16)$$

Интервал времени Δt_M – это время от момента t_s до достижения намагничивающим током i_μ максимального значения. Интервал Δt_M можно вычислять с использованием формулы [10]:

$$\Delta t_M \approx \frac{T_1 T_{2S}}{T_1 - T_{2S}} \ln \frac{T_1}{T_{2S}}. \quad (17)$$

Поскольку $T_{2S} = f(\mu_{ДИФ})$, $\mu_{ДИФ} = f(H_{РАСЧ})$ и $H_{РАСЧ} = f(T_{2S})$, то искомое значение T_{2S} целесообразно находить методом последовательных приближений.

Величина $H_{РАСЧ}$ представляет собой среднее значение (изменяющуюся постоянную составляющую) напряженности магнитного поля, при которой переменная составляющая тока i_μ максимальна. Формула (16) соответствует воздействию первичного тока согласно выражению (5). Очевидно, что максимальное значение $H_{РАСЧ}$ и, соответственно, минимальное значение T_{2S} будут получаться при $\psi = 0$. Зависимости $t_s = f(I_{КЗ*})$ можно находить на основании уравнения (8), полагая в нем $\psi = 0$ и считая известными $K'_{ПР}$, B_{r*} и T_1 . При удаленных КЗ можно принимать: постоянную времени T_1 порядка 0,1 с; $T_2 = 1$ с; наибольшее относительное значение $B_{r*} = 0,5$.



На рис. 3 приведены зависимости $t_S = f(I_{K3*})$ при $K'_{TP} = 45$ и остаточной индукции B_{*} на одной из сторон 0,5 и 0,1 на другой. Расчеты по методике, изложенной выше, при $I_{K3*} = 2$ дали следующие результаты: $T_{2S} = 7,7$ мс, $I_{ум*} = 0,38$, $I_{2м*} = 0,92$.

На рис. 3 видно, что интервал времени, в течение которого существует ток небаланса, равен $\Delta t = 0,134 - 0,051 = 0,083$ с, т.е. примерно 4 периода T . При этом $I_{НБ*} = I_{ум*}$. Полученное значение $I_{НБ*}$ является приемлемым, поскольку от него можно отстроиться путем выбора коэффициента торможения k_T на первом наклонном участке тормозной характеристики. Однако при меньших K'_{TP} значения k_T получаются недопустимо большими.

Следует отметить, что согласно методике [4] выполняется расчет сечения жил $s_{ж}$ контрольного кабеля. При сравнительно малых $I_{K3,ВН*}$ сечение жил во многих случаях получается значительно меньше $2,5$ мм². Поскольку применение сечения меньше $2,5$ мм² не допускается, то принимается $s_{ж} = 2,5$ мм². В итоге получается K'_{TP} больше, чем задается условием (4), но меньше, чем по условию (9).

Такое проектирование приводит к тому, что существует заметная вероятность излишних срабатываний дифференциальной защиты при внешних КЗ на стороне ВН. Для их устранения часто осуществляется (после излишнего срабатывания) увеличение начального тока срабатывания (загружение) выше предельного уровня, указанного в СТО [1].

Что касается обеспечения быстродействия при КЗ в защищаемой зоне, то целесообразно отметить следующее. При КЗ в зоне дифференциальной защиты трансформатора АПВ обычно не используется, поэтому расчетное значение B_{*} будет меньше, чем при внешнем КЗ. Наиболее тяжелыми по условию обеспечения устойчивости являются трехфазные КЗ [11]. Но при трехфазных КЗ параметр K'_{TP} получается больше, чем при однофазном КЗ (последнее, как правило, является расчетным при выборе K'_{TP} со стороны ВН). В примере, рассмотрен-

ном в [5], K'_{TP} при трехфазном КЗ получилось в 1,6 раза больше, чем при однофазном КЗ. Кроме того, в одной из фаз начальное значение апериодической составляющей тока будет меньше максимального. С учетом влияния изложенных факторов при $I_{K3*}^{(3)} \leq I_{K3,ВН*}$ можно получить параметр t_S порядка 20 мс. При этом время срабатывания чувствительного органа дифференциальной защиты будет равно $25 \div 30$ мс (с учетом выходного реле). При больших значениях $I_{K3*}^{(3)}$ быстродействие будет обеспечено за счет срабатывания дифференциальной отсечки.

При двухфазных и однофазных КЗ на землю необходимо учитывать снижение постоянной времени T_1 за счет влияния активного переходного сопротивления $r_{П}$ в месте замыкания, а также сопротивления заземлителей, к которым присоединяют нейтраль силовых трансформаторов и автотрансформаторов.

В [6] приведены результаты анализа влияния переходного сопротивления $r_{П}$ на постоянную времени T_1 , согласно которым при КЗ вблизи шин станции $S_{K3} = 3000$ МВА и $r_{П} = 0,5$ Ом можно полагать, что при $U_{НОМ} = 500$ кВ постоянная T_1 равна 0,08 с. При этом создаются благоприятные условия для срабатывания дифференциальной отсечки со временем менее 0,06 с. Благодаря такому времени срабатывания обеспечивается динамическая устойчивость энергосистемы [12].

Выводы

1. Существенное повышение качества функционирования дифференциальных защит трансформаторов при использовании ТТ классов Р и ТРХ, магнитопроводы которых не имеют немагнитного зазора, может быть достигнуто за счет применения методики расчета обобщенного параметра K'_{TP} по условиям функционирования ТТ в переходных режимах. При этом в качестве базисных параметров принимаются время до насыщения t_S в первом периоде переходного процесса и максимальное значение относительного тока внешнего КЗ $I_{K3,ВН*}$.

2. Показано, что при сравнитель-

но небольших значениях сквозных токов (порядка $1 \div 2,5 I_{НОМ,Т}$) применение повышенных значений K'_{TP} приводит к снижению переходных токов небаланса до такого уровня, который позволяет выполнить требования стандарта ПАО «ФСК ЕЭС» [1] в части чувствительности дифференциальных защит трансформаторов. Важно отметить, что в указанных режимах во многих случаях отсутствуют интервалы точной трансформации ТТ.

3. Применение повышенных значений K'_{TP} с учетом реальных условий при КЗ в зоне позволяет обеспечить динамическую устойчивость энергосистемы при действии дифференциальной защиты трансформатора.

Литература:

1. СТО ПАО «ФСК ЕЭС» «Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА» (СТО 56947007-29.120.70.241-2017, дата введения: 28.02.2017).
2. Кужиков С.Л. Определение времени до насыщения трансформаторов тока в переходных режимах коротких замыканий // Кужиков С.Л., Дегтярев А.А., Воробьев В.С., Москаленко В.В. // Электрические станции. – 2017. – №1. – С. 42-47.
3. Трансформаторы тока. Общие технические условия. Межгосударственный стандарт, ГОСТ 7746-2015. – М.: Стандартинформ. – 2016.
4. Королев Е.П., Либерзон Э.М. Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты. – М.: Энергия, 1980. – 208 с.
5. Дмитренко А.М. О требованиях к трансформаторам тока в схемах дифференциальных защит трансформаторов электрических станций // Дмитренко А.М., Журавлев Д.П. // Электрические станции. – 2016. – № 10. – С. 13-19.
6. Дроздов А.Д., Засыпкин А.С., Кужиков С.Л. и др. Под ред. Платонова В.В. Электрические цепи с ферромагнитными сердечниками в релейной защите. – М.: Энергоатомиздат. – 1986. – 256 с.
7. Кужиков С.Л. Анализ способов восстановления информации о первичном токе трансформатора тока, работающего с насыщением сердечника // Кужиков С.Л., Дегтярев А.А., Сербиновский Б.Б. // Релейная защита и автоматизация. – 2017. – №3. – С. 43-51.
8. Галишников Ю.П. Последовательные короткие замыкания на стороне ВН блока турбогенератор-трансформатор и проблема их отключения // Галишников Ю.П., Моисеев В.С. // Электричество. – 1978. – №5. – С. 72-75.
9. Дмитренко А.М. Анализ и исследование способов торможения цифровых дифференциальных защит блочных трансформаторов // А.М. Дмитренко, Д.П. Журавлев // Электрические станции. – 2014. – № 11. – С. 36-41.
10. Афанасьев В.В. Трансформаторы тока // В.В. Афанасьев, Н.М. Адоньев, В.М. Кибель и др. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-е. – 1989. – 416 с.
11. Веников В.А. Переходные электрохимические процессы в электрических системах. Учебник для вузов. М.: Высшая школа. – 1985. – 536 с.
12. Гуревич Ю.Я. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах // Гуревич Ю.Я., Либова Л.Е., Окин А.А. – М.: Энергоатомиздат. – 1990. – 390 с. [13]