

ротора из-за ненадежного контакта релейной щетки с валом // Электрические станции, 2013, №1, С. 34-36.

3. Романов Ю.В., Нестерин А.А., Ашмарин А.О. Способ защиты цепей возбуждения генераторов от замыкания на землю в одной точке // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: 5-я Международная научно-техническая конференция, Сочи, 2015.

УДК 621.314.224

АНАЛИЗ ВРЕМЕНИ ДО НАСЫЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОБЩЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ

А.М. Дмитренко

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова

Д.П. Журавлев

ООО НПП «ЭКРА»

В докладе приведены результаты исследований времени до насыщения трансформаторов тока (ТТ) в переходных режимах. Показаны зависимости времени до насыщения от приведенной предельной кратности, постоянной времени затухания аperiodической составляющей тока короткого замыкания (КЗ), остаточной индукции и тока внешнего КЗ. Показано, что увеличение приведенной предельной кратности приводит к уменьшению погрешностей ТТ на интервале времени насыщенного состояния магнитопровода.

Ключевые слова: трансформатор тока, время до насыщения, предельная кратность по точности, остаточная индукция.

Согласно [1], требования к ТТ дифференциальных защит трансформаторов сформулированы следующим образом: полная погрешность ε ТТ в установившемся режиме при внешних КЗ не должна превышать 10%. Вычисление полной погрешности ε в проектных расчетах связано с

Авторы:

Нестерин Андрей Алексеевич, окончил магистратуру ЧГУ в 2015 году, ООО «Релематика», инженер-исследователь 3 категории;

Емельянов Александр Витальевич, окончил магистратуру ЧГУ в 2011 году, ООО «Релематика», ведущий инженер-исследователь.

The paper presents the results of research of current transformer (CT) saturation time. The additions of saturation time from reduced maximum multiplicity of accuracy, the time constant of the decay of the aperiodic component of the short circuit (SC), the residual induction and the current of external faults are showed. It shows, that the increase of maximum multiplicity of accuracy reduces errors of CTs in the time interval of core saturated state.

Key words: current transformer, saturation time, maximum multiplicity of accuracy, residual induction.

определенными трудностями, поэтому используется понятие предельной кратности по точности $K_{\text{ПР}}$ ТТ [2, 3]. Предельную кратность по точности можно вычислить по формуле:

$$K_{\text{ПР}} = \frac{\omega B_{\text{ПР}} w_2 S_{\text{М}}}{\sqrt{2} I_{2\text{НОМ}} z_2}, \quad (1)$$

где $B_{\text{пр}} = 1,8 \div 1,85 \text{ Тл}$ – предельное значение индукции при выполнении магнитопровода ТТ из холоднокатаной электротехнической стали;

w_2 – число витков вторичной обмотки;

s_M – площадь поперечного сечения стали магнитопровода;

$I_{2\text{НОМ}}$ – вторичный номинальный ток;

$z_2 = |Z_{\text{ОБМ.2}} + Z_{\text{НГ}}|$ – модуль комплексного сопротивления вторичной цепи ТТ;

$Z_{\text{ОБМ.2}}$ – комплексное сопротивление вторичной обмотки ТТ в Т-образной схеме замещения;

$Z_{\text{НГ}}$ – комплексное сопротивление нагрузки.

Общепринятой практикой при вычислении токов КЗ является принятие в качестве базисной величины номинального тока трансформатора $I_{\text{НОМ.Т}}$. Кроме того, при задании уставок дифференциальной защиты трансформатора в качестве базисного тока также принимается $I_{\text{НОМ.Т}}$. С учетом этого, целесообразно ввести понятие приведенной к $I_{\text{НОМ.Т}}$ предельной кратности

$$K'_{\text{пр}} = \frac{I_{\text{НОМ.ТТ}}}{I_{\text{НОМ.Т}}} K_{\text{пр}} \quad (2)$$

и сформулировать требования к ТТ в установившемся режиме в следующем виде

$$K'_{\text{пр}} \geq I_{\text{КЗ}*}, \quad (3)$$

где $I_{\text{КЗ}*} = I_{\text{КЗ}}/I_{\text{НОМ.Т}}$.

При выполнении условия (3) насыщение магнитопровода ТТ в установившемся режиме практически отсутствует. Однако в переходном режиме насыщение может достигаться вследствие влияния апериодической составляющей тока КЗ. Расчет полной погрешности в переходном режиме весьма труден и требует введения дополнительных понятий погрешностей, характеризующих те или иные соотношения между первичными и вторичными токами ТТ. В связи с этим предложено в качестве оценочного параметра использовать время до насыщения ТТ t_s .

При рассмотрении процессов в переходном режиме выражение для тока КЗ можно записать в следующем виде (при этом затухание гармонической составляющей тока КЗ можно не учитывать) [4]

$$i_1 = I_{1m} \left[e^{-\frac{t}{T_1}} \cos \psi - \cos(\omega t + \psi) \right], \quad (4)$$

где T_1 – постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ; ψ – начальная фаза сверхпереходной ЭДС генератора или системы.

Формула (4) 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 (4) можно найти, используя уравнение [4]

$$\frac{B_{s,\text{усл}} - B_r}{B_m} = \omega T_1 \left(e^{-\frac{t_s}{T_2}} - e^{-\frac{t_s}{T_1}} \right) \cos \psi + \sin \psi e^{-\frac{t_s}{T_2}} - \sin(\omega t_s + \psi) \quad (5)$$

где $B_{s,\text{усл}}$ – индукция условного насыщения магнитопровода, параметр спрямленной характеристики намагничивания [3];

B_r – остаточная индукция;

$B_m = \frac{I_{1m} w_1 r_2}{\omega s_m w_2^2}$ – расчетная амплитуда

гармонической составляющей индукции, вычисленная при условии, что отсутствует насыщение магнитопровода ТТ;

w_1 – число витков первичной обмотки;

w_2 – число витков вторичной обмотки;

s_m – площадь поперечного сечения стали магнитопровода;

r_2 – сопротивление вторичной обмотки;

T_2 – постоянная времени вторичного контура ТТ при ненасыщенном магнитопроводе.

Уравнение (5) целесообразно преобразовать к виду

$$\frac{B_{S.УСЛ} \left(1 - B_r^*\right)}{B_m} = K_{Ba}, \quad (6)$$

$$\text{где } B_r^* = \frac{B_r}{B_{S.УСЛ}}.$$

Коэффициент K_{Ba} равен правой части уравнения (5). Он учитывает увеличение индукции в переходном режиме из-за влияния аperiodической составляющей первичного тока.

На основании положений [4] и формулы (2) несложно показать, что соблюдается равенство

$$\frac{B_{S.УСЛ}}{B_m} = \frac{K'_{ПР}}{I_{КЗ}^*}. \quad (7)$$

С учетом формул (6) и (7) получаем условие для выбора приведенной предельной кратности ТТ в переходном режиме

$$K'_{ПР} \geq \frac{K_{Ba} I_{КЗ}^*}{1 - B_r^*}. \quad (8)$$

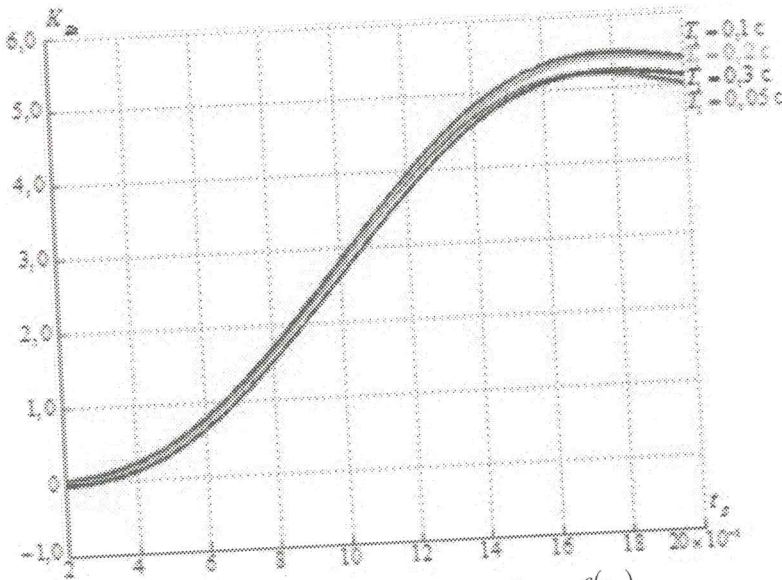


Рисунок 1 – Зависимости $K_{Ba} = f(t_s)$

В соответствии с формулой (5) коэффициент K_{Ba} является функцией постоянных времени T_1 и T_2 , времени до насыщения t_s и начальной фазы ψ .

На рисунке 1 показаны зависимости коэффициента увеличения индукции K_{Ba} от времени до насыщения ТТ t_s при $\psi = 0$ и $T_2 = 2$ с. На основании этого рисунка можно сделать вывод, что при $t_s > 0,5T$ обеспечить выбор приведенной предельной кратности ТТ становится затруднительно.

Постоянная времени T_1 при КЗ на линиях вблизи от шин высшего напряжения электрических станций обычно

не менее 0,05 с. Анализ зависимости $K_{Ba} = f(t_s)$ 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. На рисунке 2 представлены результаты моделирования при $\psi = 0$ и $T_2 = 2$ с. Опыты показали, что с ростом постоянной времени T_2 влияние постоянной времени T_1 на коэффициент увеличения индукции K_{Ba} уменьшается. В итоге, наибольшее влияние на значение K_{Ba} оказывают две величины: t_s и ψ .

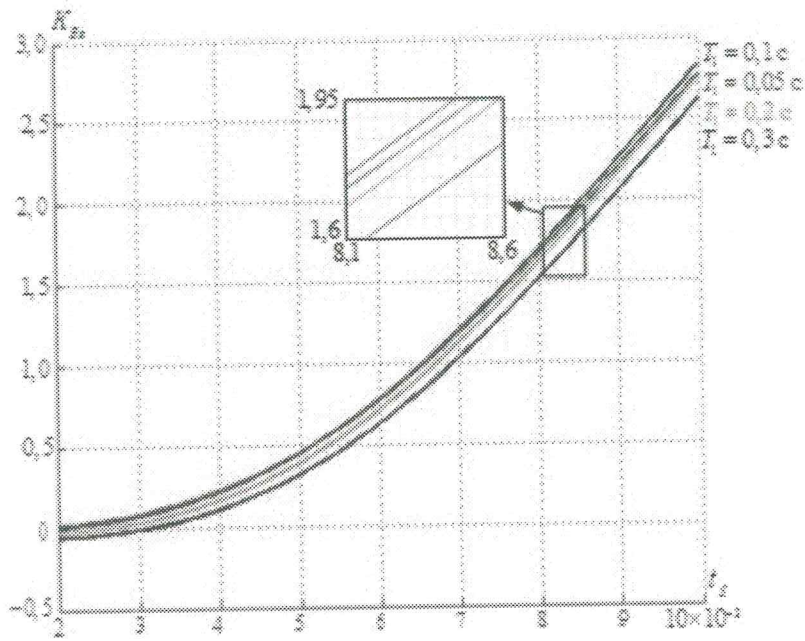


Рисунок 2 – Зависимость $K_{Ba} = f(t_s)$ при различных значениях T_1

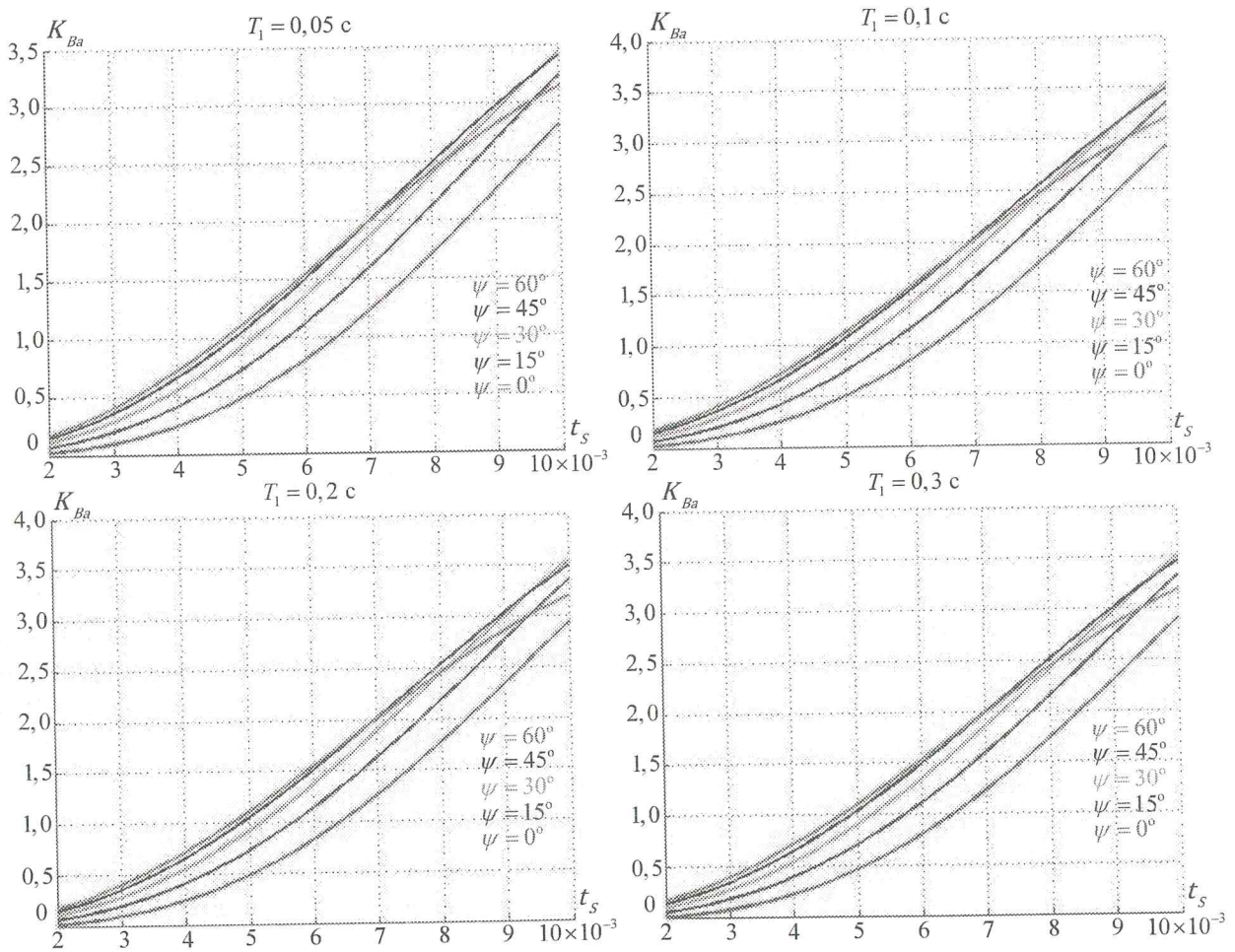


Рисунок 3 – Зависимости $K_{Ba} = f(t_s)$ при различных значениях T_1 и ψ

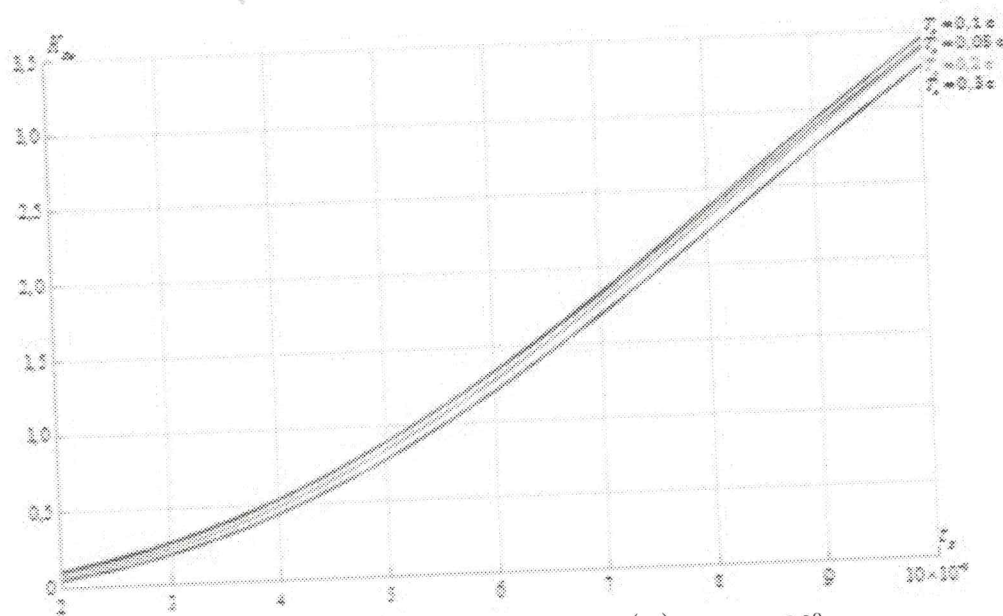


Рисунок 4 – Зависимость $K_{Ba} = f(t_s)$ при $\psi = 30^\circ$

Обычно при исследовании переходных токов небаланса в качестве худшего случая рассматривают $\psi = 0$, так как при этом наблюдается наибольший ток небаланса [5]. Кроме того, после момента насыщения ТТ переходный ток небаланса существенно зависит от постоянной T_1 , поскольку при ее увеличении повышается также максимальное значение напряженности магнитного поля в магнитопроводе ТТ.

Однако для современных цифровых дифференциальных защит трансформаторов существенное значение имеет сам по себе момент времени t_s до насыщения ТТ [4, 6]. 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 ψ в пределах от 0 до 60° . Результаты приведены на рисунке 3. Эти исследования показали, что в качестве расчетного целесообразно принимать $\psi = 30^\circ$, так как при этом начальное значение апериодической составляющей тока КЗ уменьшается всего на 13%, а коэффициент K_{Ba} увеличивается на 15-30%. Зависимости $K_{Ba} = f(t_s)$ при $\psi = 30^\circ$ и различных значениях T_1 приведены на рисунке 4.

Постоянную времени T_2 вторичного контура ТТ на интервале насыщенного

состояния магнитопровода можно вычислять по приближенной формуле

$$T_{2S} \approx \frac{\mu_{\text{диф}} W_2 S_M}{l_{\text{CP}} (r_{\text{ОБМЛ2}} + r_{\text{НГ.РАСЧ}})}, \quad (9)$$

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

Несложно показать, что равенство (9) можно записать в виде

$$\omega T_{2S} \approx \frac{\mu_{\text{диф}} I_{\text{1уд.ном}} K_{\text{ГР}}}{B_{\text{ГР}}}, \quad (10)$$

где $I_{\text{1уд.ном}} = \frac{\sqrt{2} I_{\text{ном.ТТ}} W_1}{l_{\text{CP}}}$ – амплитуда напряженности магнитного поля в сердечнике при номинальном первичном токе и разомкнутой вторичной обмотке ТТ.

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

$$H_{\text{МАКС}} \approx K_{\text{УД}} I_{\text{КЗ}} I_{\text{УД.НОМ.Т}} \left(\frac{I_{\text{НОМ.Т}}}{I_{\text{1НОМ.ТТ}}} \right), \quad (11)$$

где $K_{\text{УД}}$ – ударный коэффициент.

Значение $I_{\text{УД.НОМ.Т}}$ является параметром ТТ. Значение $H_{\text{МАКС}}$ зависит от отношения $I_{\text{НОМ.Т}}/I_{\text{1НОМ.ТТ}}$ и, следовательно, от условий применения ТТ. Анализ формул (10) и (11) с учетом зависимости $\mu_{\text{ДИФ}} = f(H_{\text{МАКС}})$ показал, что T_{2S} возрастает при увеличении параметра $K'_{\text{ТР}}$. А это, в свою очередь, приводит к уменьшению погрешностей ТТ на интервале насыщенного состояния магнитопровода.

Вывод. Использование обобщенного параметра $K'_{\text{ТР}}$ позволяет создать методику расчета времени до насыщения t_s ТТ в переходных режимах, пригодную для использования проектными организациями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 2003 г. – 461 с.
2. Королев Е.П., Либерзон Э.М. Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты. – М.: Энергия, 1980. – 208 с.
3. Трансформаторы тока / В.В. Афанасьев, Н.М. Адоньев, В.М. Кибель и др. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 416 с.
4. Дмитренко А.М., Журавлев Д.П. Анализ и исследование способов торможения цифровых дифференциальных защит блочных трансформаторов. – Электрические станции, 2014, №11. – с. 36-41.
5. Электрические цепи с ферромагнитными сердечниками в релейной защите / А.Д. Дроздов, А.С. Засыпкин, С.Л. Кужеков и др. Под ред. В.В. Платонова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.
6. Кужеков С.Л., Дегтярев А.А., Чередниченко К.В. Об обеспечении необходимой точности работы защитных трансформаторов тока в переходных режимах. – Электрические станции, 2015, №5. – с. 53-60.

Авторы:

Дмитренко Александр Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. В 1962 г. окончил Южно-Российский политехнический университет им. М.И. Платова (НПИ). В 1993 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Времяимпульсные дифференциальные защиты элементов энергосистем».

Журавлев Дмитрий Павлович, в 2011 г. окончил электроэнергетический факультет Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. В настоящее время – инженер ООО НПП «ЭКРА».