



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В РЕЖИМЕ ПЕРЕВОЗБУЖДЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ПОВЕДЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ

А.М. Дмитренко, В.А. Наумов, А.В. Солдатов, Н.Г. Иванов, А.А. Золотов, Россия, г. Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА»

***Аннотация:** Рассматриваются принципы построения модели силового трансформатора в режиме перевозбуждения с учетом его конструктивных особенностей. Показывается, что классическая Т-образная модель трансформатора не применима для моделирования перевозбуждения из-за сложности определения индуктивности рассеяния обмоток. Предлагается усовершенствованная модель силового трансформатора, учитывающая реальную схему расположения обмоток и немагнитные зазоры в магнитопроводе. Приводятся результаты моделирования режимов перевозбуждения и предлагаются рекомендации по настройке блокировки дифференциальной защиты в этих режимах.*

***Ключевые слова:** дифференциальная защита, перевозбуждение трансформатора, математическая модель трансформатора.*

Введение

Под перевозбуждением трансформатора понимается увеличение амплитуды магнитной индукции B_m или амплитуды потокосцепления ψ_m выше тех значений, которые они имеют в номинальном режиме. В относительных единицах можно записать:

$$B_{*m} = \psi_{*m} = \frac{\psi_m}{\psi_{\text{НОМ}}} \approx \frac{U}{U_{\text{НОМ}}} \frac{f_{\text{НОМ}}}{f}, \quad (1)$$

где U – напряжение на обмотке; f – частота.



На электрических станциях режим перевозбуждения может возникать в следующем случае: близкие короткие замыкания (КЗ) на линии, отходящей от шин высшего напряжения (ВН), и его последующее отключение. В режиме КЗ происходит форсировка тока возбуждения генератора вследствие чего возрастает его ЭДС. После отключения выключателя линии напряжение на обмотке низшего напряжения (НН) трансформатора может достигать $(1,2-1,5)U_{\text{НОМ}}$. А это, в соответствии с равенством (1), приведет к увеличению амплитуды индукции B_m . В современных трансформаторах применяются магнитопроводы из холоднокатаной электротехнической стали с номинальным значением амплитуды магнитной индукции $B_{m \text{ ном}} \approx 1,65$ Тл. В таком случае при $U_{\text{НОМ}} > 1,2$ о.е. амплитуда индукции B_m превышает 2,0 Тл, что приводит к глубокому насыщению магнитопровода и значительному увеличению потоков рассеяния. При этом значительно увеличивается нагрев сплошных стальных деталей конструкции магнитопровода (ярмовых балок, прессующих пластин и др.). Соответственно, происходит нагрев изоляции обмоток и снижение ее ресурса. При перевозбуждении происходит также увеличение намагничивающего тока i_{μ} и возрастание тока небаланса дифференциальной защиты трансформатора, что может привести к ее излишнему срабатыванию.

В [1] в общем виде рассмотрены требования к релейной защите в режиме перевозбуждения и приведены формулы для вычисления различных значений тока i_{μ} (в том числе первой и высших гармоник) при использовании так называемой спрямленной характеристики намагничивания. При этом не учтены особенности выполнения конструкции трансформатора, влияние внешних сопротивлений и др., что приводит к значительному отличию полученных результатов от реальных. Это особенно относится к выполнению требования деблокировки дифференциальной защиты при недопустимом перевозбуждении трансформатора. Рассмотрению и анализу более точных моделей трансформатора в режиме перевозбуждения и посвящен настоящий доклад.



Конструктивные особенности магнитных систем трехфазных силовых трансформаторов

В России широкое распространение имеют трехфазные трансформаторы с плоской трехстержневой магнитной системой. Указанные трансформаторы имеют исполнение обмоток ВН и НН в виде цилиндров, которые расположены на стержне концентрически (рис. 1). Расчету подлежит диаметр стержня d , средние диаметры цилиндров обмоток и диаметр средней окружности между обмотками d_{12} , число витков обмотки высшего напряжения w_1 . Используется также обобщенный параметр $\beta = \pi d_{12} / l$, где l – осевая длина (высота) обмоток.

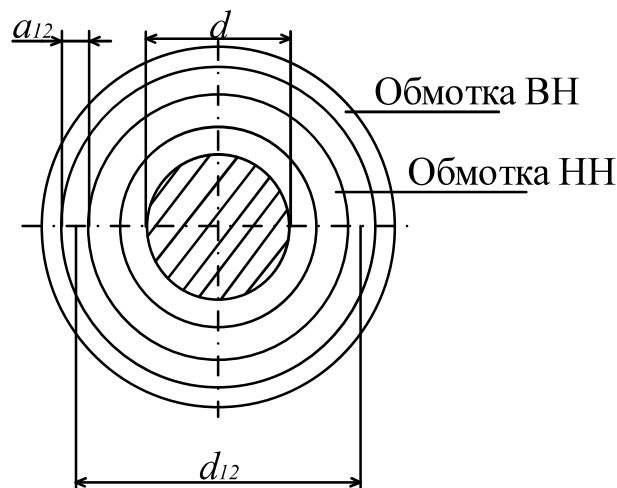


Рис. 1. Схема расположения обмоток трансформатора на стержне магнитопровода

Расчет диаметра стержня можно выполнять по формуле [2]:

$$d = 0,514 \sqrt{\frac{S_{\text{ном.ф}} \beta k_p a_p}{f u_k B_{\text{ном}}^2 m k_c^2}}, \quad (2)$$

где $S_{\text{ном.ф}} = S_{\text{ном}} / 3$ – номинальная мощность одной фазы (кВА); $k_p = 0,95$ – коэффициент Роговского; $a_p = 2a_{12}$; a_{12} – радиальный размер канала между обмотками НН и ВН; k_c – коэффициент заполнения сталью пространства стержня; u_k – напряжение КЗ в процентах.

В качестве типичного принят трансформатор номинальной мощностью $S_{\text{НОМ}} = 40000$ кВА при $U_{\text{НОМ ВН}} = 121$ кВ. При этом получились следующие основные параметры: $d = 0,6$ м; $\beta = 1,65$; $d_{12} = 0,8$ м; $l = 1,55$ м; $w_1 = 703$.

Модель силового трансформатора в режимах перевозбуждения

При моделировании силовых трансформаторов в известных программных комплексах (например, Matlab) используется Т-образная схема замещения (рис. 2). В настоящее время электромагнитные процессы в трансформаторах подробно проанализированы на базе использования вектора Пойнтинга [3]. При этом показано, что понятие рассеяния для отдельной обмотки трансформатора является несостоятельным. Кроме того, необходимо учитывать, что наиболее тяжелые условия перевозбуждения возникают в режиме холостого хода. С учетом изложенного, выражение для потокосцепления обмотки трансформатора можно записать в следующем виде:

$$\Psi_{\text{расч}} = (\mu_0 H s_{\text{кат}} + B_{\text{степ}} s_{\text{ст}}) w, \quad (3)$$

где $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м; $s_{\text{кат}}$ – площадь поперечного сечения стали магнитопровода.

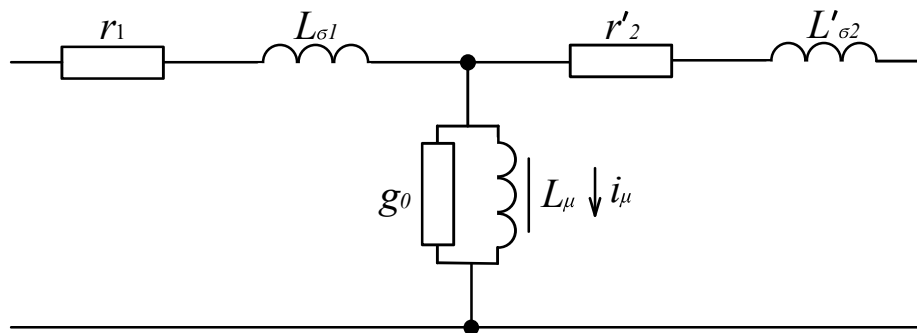


Рис. 2. Т-образная схема замещения трансформатора: $L_{\sigma 1}$ и $L'_{\sigma 2}$ – индуктивности рассеяния первичной и вторичной обмоток; r_1 и r'_2 – активные сопротивления обмоток; g_0 – активная проводимость, обусловленная потерями активной мощности в магнитопроводе трансформатора. Все параметры приведены к первичной обмотке трансформатора



Связь напряженности магнитного поля H и намагничивающего тока i_μ в физическом вакууме задается формулой:

$$i_\mu = \frac{Hk_l l_{\text{кат}}}{w}, \quad (4)$$

где k_l – коэффициент, учитывающий отношение $k_{\text{кат}} / d_{\text{кат}}$.

Под физическим вакуумом понимается мировая материальная среда с особыми свойствами, одним из которых является магнитная проницаемость μ_0 [4]. Появление тока i_μ в обмотке трансформатора приводит к перестройке физического вакуума, что в макроскопическом плане воспринимается как появление напряженности магнитного поля H . Указанная напряженность H не зависит от того имеется ли внутри обмотки стержень из электротехнической стали или нет (первое слагаемое формулы (3)). Второе слагаемое в указанной формуле учитывает появление намагниченности M электротехнической стали в стержне магнитопровода под воздействием магнитного поля H физического вакуума.

С учетом изложенного, целесообразно построить зависимость $\mu M = f(H)$ для широко используемой электротехнической стали марок 3404 – 3407. При этом необходимо иметь в виду, что полное (техническое) насыщение стали наступает при $B \approx 2,0$ Тл и $H \approx 100000$ А/м. Далее создаем таблицу значений $\Psi_{\text{расч. } n} = f(i_{\mu, n})$ в соответствии с формулами (3) и (4).

Предложенная методика позволяет также учесть немагнитные зазоры в конструкции магнитопровода. Поскольку значение эквивалентного зазора $\delta_{\text{экв}}$ точно неизвестно, то в качестве опорной величины используется действующее значение реактивной составляющей тока холостого хода трансформатора при номинальном напряжении. При этом значение $\delta_{\text{экв}}$ считается калибровочным параметром модели. С целью повышения точности моделирования использовалось 35 точек зависимости $\Psi_{\text{расч. } n} = f(i_{\mu, n})$.

Для моделирования режимов перевозбуждения в программных комплексах, использующих Т-образную схемную модель

силового трансформатора, индуктивность рассеяния питающей обмотки задается равной индуктивности питающей системы:

$$L_{\sigma 1} = x_c / \omega ,$$

где x_c – реактивное сопротивление питающей системы; ω – циклическая частота сети.

Активное сопротивление равно сумме активного сопротивления питающей системы и обмотки:

$$r_1 = r_c + r_{\text{обм.Т}} ,$$

где r_c – активное сопротивление питающей системы; $r_{\text{обм.Т}}$ – активное сопротивление обмотки трансформатора.

Индуктивность рассеяния и индуктивность намагничивания моделируемого трансформатора учитывается при этом в индуктивности намагничивания модели L_μ .

Результаты моделирования

На рис. 3 приведены кривые зависимостей гармоник токов намагничивания от уровня питающего напряжения при питании трансформатора со стороны обмотки НН. Сопротивление питающей сети принято в 2 раза больше сопротивления короткого замыкания трансформатора на номинальной частоте.

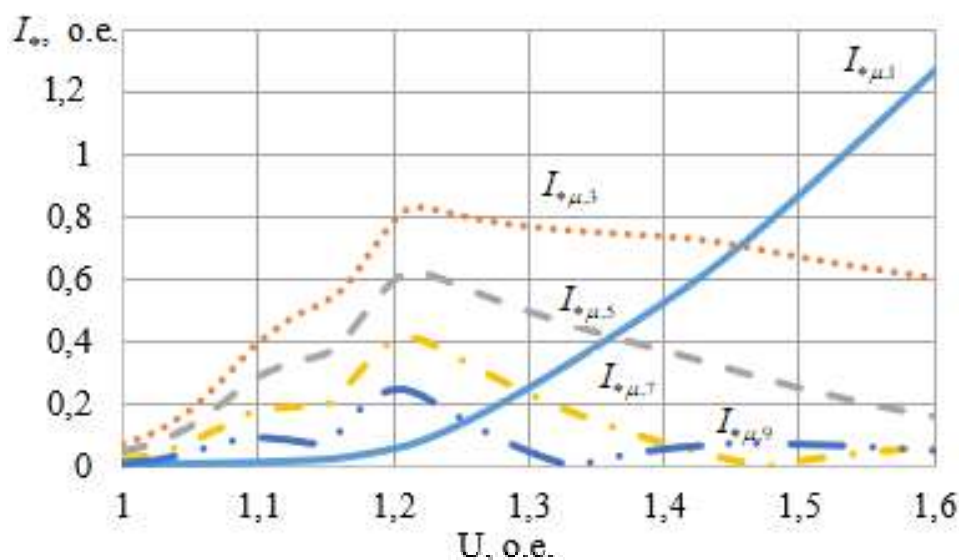


Рис. 3. Зависимости уровня гармонических составляющих в намагничивающем токе от напряжения при питании трансформатора со стороны НН. Уровень основной гармоники приведен к



номинальному току трансформатора ($I_{*\mu,1} = I_{\mu,1} / I_{\text{ном}}$), а уровень высших гармоник – к уровню основной гармоники ($I_{*\mu,v} = I_{\mu,v} / I_{\mu,1}$)

Опасность неселективной работы дифференциальной защиты возникает в режимах перевозбуждения, в который основная гармоника тока намагничивания превышает 0,1 о.е. Это соответствует напряжению питающей системы 1,23 о.е. (кривая 1 на рис. 3). Поэтому при напряжениях выше 1,23 о.е. дифференциальная защита должна блокироваться.

Обычно для блокировки используется составляющая пятой гармоники в дифференциальном токе [7]. При напряжении 1,2 о.е. относительное содержание пятой гармоники составляет 60%. Учитывая, что дифференциальный ток лишь частично состоит из тока намагничивания, для надежной блокировки защиты уставку $I_{*\mu,5}$ принимают равной 0,2–0,25 о.е. [8].

При тяжелых перевозбуждениях содержание пятой гармоники в дифференциальном токе снижается, что приводит к снятию блокировки и срабатыванию дифференциальной защиты. В этом случае срабатывание защиты можно считать полезным, поскольку при высоких кратностях напряжений происходит перегрев и создается опасность повреждения изоляции самого трансформатора.

Опасным для силового трансформатора являются перевозбуждения с кратностями напряжения более 1,35 о.е. [5]. На рис. 3 видно, что при выбранном значении уставки $I_{*\mu,5} = 0,5$ блокировка дифференциальной защиты снимается только при напряжении выше 1,5 о.е. В результате, при кратностях напряжения от 1,35 о.е. до 1,5 о.е. трансформатор будет испытывать перегрев и ресурс его изоляции будет быстро снижаться. В связи с этим, необходимо предусмотреть специальные мероприятия, ограничивающие длительную работу трансформатора в опасном режиме.

Вывод блокировки дифференциальной защиты при недопустимом перевозбуждении

Исследование показало, что если при построении зависимостей величины тока намагничивания от напряжения использовать обобщенный параметр



$$U_{\text{расч}} = U \frac{f}{f_{\text{ном}}}, \quad (5)$$

то относительная величина первой гармоники тока намагничивания $I_{*\mu,1}$ практически не зависит от частоты. Это позволяет сделать вывод, что для отключения трансформатора в режиме недопустимого перевозбуждения можно использовать дифференциальный токовый орган (ДТО), действующий с выдержкой времени. Для трансформатора, имеющего $S_{\text{ном}} = 40000$ кВА, уставка ДТО может быть принята равной 0,4 о.е. Выдержка времени должна обеспечить отстройку от режима броска тока намагничивания при включении трансформатора на холостой ход. Она может приниматься в пределах 0,5–2 с.

При перевозбуждении трансформатора со стороны ВН (что, как правило наблюдается в электрических сетях при резком сбросе нагрузки) значение основной гармоники тока намагничивания $I_{*\mu,1}$ может составлять 0,18–0,27. Это объясняется как влиянием большего диаметра обмотки ВН (по сравнению с обмоткой НН), так и влиянием эквивалентного реактивного сопротивления электрической сети. При этом наибольшее перевозбуждение наблюдается у трансформаторов, имеющих устройство РПН в пределах $\pm 16\%$. При этом приходится отстраивать уставку ДТО от результирующего тока небаланса установившегося режима, что приводит к его загромождению. В таких случаях для отключения трансформатора в режиме недопустимого перевозбуждения целесообразно использовать измерительный орган повышения напряжения со стороны ВН, действующий с выдержкой времени.

Выводы

1. Имитационное моделирование режима перевозбуждения трехфазного трансформатора в программных комплексах необходимо выполнять с учетом реального расположения обмоток на стержнях, а также с учетом влияния сопротивлений питающей сети.

2. При небольших кратностях перевозбуждения первая гармоника намагничивающего тока трансформатора может приводить к появлению тока небаланса дифференциальной защиты,



превышающую ее уставку начального тока срабатывания (порядка $0,3I_{\text{НОМ}}$). Для отстройки от излишнего срабатывания защиты должна применяться блокировка по пятой гармонике.

3. В режимах недопустимого для силового трансформатора перевозбуждения (при напряжениях более 1,35 о.е.) с целью сохранения ресурса обмоток следует выводить блокировку дифференциальной защиты по пятой гармонике и отключать трансформатор от источника питания. В качестве информационных величин для снятия блокировки можно использовать дифференциальный ток основной гармоники или напряжение на обмотках трансформатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Засыпкин А.С.* Релейная защита трансформаторов – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 240 с.

2. *Тихомиров П.М.* Расчет трансформаторов – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

3. *Шакиров М.А.* Вектор Пойнтинга и новая теория трансформаторов. Часть 10. Стержневые трансформаторы – Электричество. 2020, №3.

4. *Яворский Б.М., Детлаф А.А., Лебедев А.К.* Справочник по физике для инженеров и студентов ВУЗов – М.: ООО «Издательство «Оникс»: Издательство «Мир и Образование», 2007 – 1056 с.

5. *Баркан А.Д.* Эксплуатация электрических систем – М.: Высшая школа, 1990. – 304 с.

6. *Коротков В.Ф.* Автоматическое регулирование в электроэнергетических системах. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 416 с.

7. *Циглер Г.* Цифровые устройства дифференциальной защиты: принципы и область применения – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 273 с.

8. *Guzman A., Zocholl S., Benmouayl G.* Performance Analysis of Traditional and Improved Transformer Differential protective relays – 36th Annual Minnesota Power Systems Conference, November 2000.

Авторы:

Дмитренко Александр Михайлович, главный специалист департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», профессор кафедры ЭИЭС имени А.А. Федорова ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Окончил Новочеркасский политехнический институт в 1962 г. В 1993 г. Защитил докторскую диссертацию «Времяимпульсные дифференциальные защиты элементов энергосистем» E-mail: dmitr.am@mail.ru.



Наумов Владимир Александрович, заместитель генерального директора – технический директор ООО НПП «ЭКРА». В 2005 г. Защитил во ВНИИЭ кандидатскую диссертацию «Анализ и совершенствование продольных дифференциальных защит генераторов и блоков генератор-трансформатор». E-mail: naumov_va@ekra.ru.

Солдатов Александр Вячеславович, заместитель директора департамента автоматизации энергосистем по научному сопровождению продукции ООО НПП «ЭКРА», старший преподаватель кафедры ЭИЭС имени А.А. Федорова ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Получил диплом инженера на электроэнергетическом факультете ЧГУ им. И.Н. Ульянова в 2006 г. E-mail: soldatov_av@ekra.ru.

Иванов Николай Геннадьевич, руководитель группы разработки ИЭУ департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», аспирант ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Получил степень магистра техники и технологии по направлению «Электроэнергетика и электротехника» на кафедре ТОЭ и РЗА электроэнергетического факультета ЧГУ им. И.Н. Ульянова в 2013 году. E-mail: ivanov_ng@ekra.ru.

Золотов Александр Артурович, инженер департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», магистрант ЧГУ им. И.Н. Ульянова по направлению «Автоматика энергосистем». Окончил в 2020 г. факультет энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова, получил степень бакалавра по направлению «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». E-mail: zolotov_aa@ekra.ru.