

зис». Однако это объясняется только пробелами в образовании, так как сведения, приводимые в учебной литературе, не достаточны для формирования четких представлений о процессах, особенно, если перемагничивание проходит по несимметричным частным циклам. Рекомендуем поэкспериментировать с программой, задавая сначала малые массивы точек поворота и постепенно усложняя задания. В результате появится доверие к программе.

В заключение следует отметить, что программа «Гистерезис» может использоваться в учебном процессе в виде виртуальной лабораторной работы. В этом случае не вызовет проблем обеспечение достаточного количества индивидуальных заданий.

Список литературы:

- [1] Александров В.В. Математическое моделирование на ЭВМ процессов перемагничивания индуктивных элементов импульсных преобразователей напряжения. [Текст]/ В.В. Александров, О.К. Морозов, В.И. Самулеев, М.Г. Тылес. – Труды 14-го международного научно-промышленного форума «Великие реки». Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, специалистов и студентов «Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек». Том 2. – Н. Новгород: Изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2012. – с. 239–242.
- [2] Аркадьев В.К. Избранные труды [Текст]/ В.К. Аркадьев. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 331 с.

Б.Ю. Алтунин, А.А. Кралин

НГТУ им. Р.Е. Алексеева

В.В. Гуляев

ФБОУ ВПО «ВГАВТ»

РАСЧЕТ НЕПОЛНОФАЗНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ СО СХЕМОЙ СОЕДИНЕНИЯ «ЗВЕЗДА–ЗВЕЗДА С НУЛЕВЫМ ПРОВОДОМ»

Исследование несимметричных режимов позволяет определить допустимые диапазоны изменения нагрузки, параметры трансформаторно-тиристорного оборудования, дать рекомендации по оптимальному распределению нагрузки. Разрабатываемый ТТРН ОТ имеет схему соединения обмоток трансформатора Y/Y_n-0 и практически всегда будет работать с теми или иными отклонениями от симметрии. Эти отклонения возрастают с ростом мощности однофазных потребителей и получаются особенно большими в аварийных несимметричных режимах. Несимметричная работа трансформаторов может быть связана как с несимметрией подведенного напряжения, так и с несимметрией нагрузки. Та и другая причины приводят к несимметрии вторичных напряжений трансформаторов, что сказывается на качестве электроснабжения потребителей. Для самого ТТРН ОТ несимметричная работа может быть опасна в отношении перегрузки отдельных обмоток, тиристорных ключей, а также чрезмерных повышений фазных напряжений и насыщения магнитопровода.

В инженерной практике анализ несимметричных режимов трехфазных трансформаторов, как правило, проводится на основе метода симметричных составляющих [1,2,3]. Основным достоинством данного подхода является возможность использования схем замещения приведенного трансформатора для токов различных последовательностей и проведение расчетов с помощью аналитических формул и компьютерного моделирования.

Электрическая схема трехфазного опытного трансформатора ТСЗН-400/10 представлена на рис. 1. Тиристорное переключающее устройство (ТПУ) обеспечивает автоматическое или ручное переключение ответвлений независимо каждой фазы в пределах $\pm 5\%$ номинального напряжения и протекание каждой полуволны тока через свою часть обмотки.

Многообмоточный трансформатор ТСЗН-400/10 имеет трехстержневой магнитопровод. Каждая фаза разделена на две полуобмотки с регулируемыми отводами $\pm 5\%$ от номинального значения. Первый отвод полуобмотки характеризуется следующими параметрами – индуктивность $L1$, сопротивление $R1$ и число витков сетевой обмотки $w1$. Второй отвод является номинальным с параметрами индуктивности $L2$, сопротивления $R2$ и числом витков сетевой обмотки $w2$. Третий отвод имеет параметры индуктивности $L3$, сопротивления $R3$ и число витков сетевой обмотки $w3$.

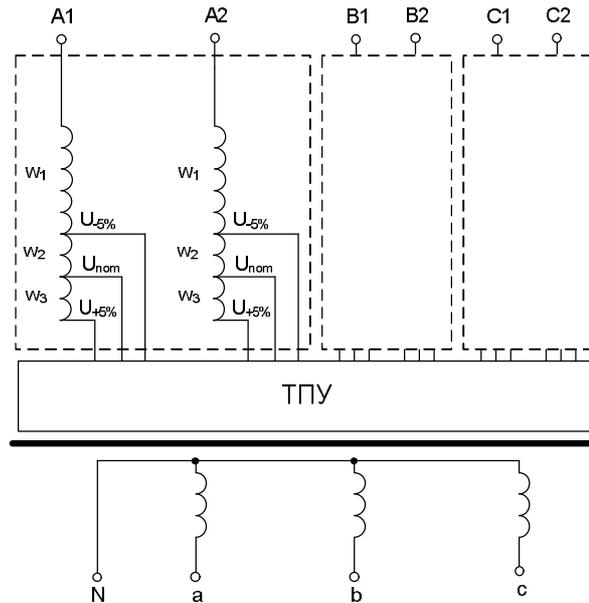


Рис. 1. Электрическая схема трансформатора ТСЗН-400/10

Параметры трансформатора, используемые при расчетах и моделировании, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры трансформатора, используемого при расчетах

Тип трансформатора	ТСЗН-400/10
Номинальное напряжение, кВ	10/0,4
Схема и группа соединения	Y/Y _n -0
Ток холостого хода, %	0,8
Напряжение короткого замыкания, %	5,5
Потери холостого хода, Вт	900
Потери короткого замыкания, Вт	5200

На рис. 2. представлена магнитная схема замещения.

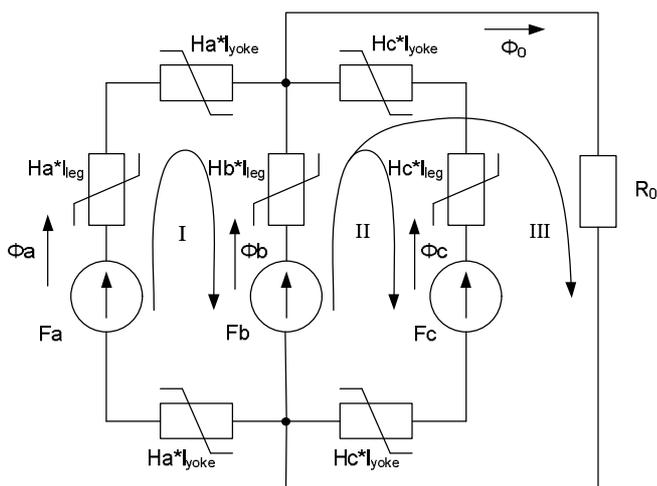


Рис. 2. Схема замещения магнитной цепи

Составим математическое описание электромагнитной системы трансформатора. Для схемы замещения магнитной системы запишем уравнения по первому закону Кирхгофа, а также по второму закону Кирхгофа для контуров I, II и III (рис. 2):

$$\Phi_a + \Phi_b + \Phi_c = \Phi_0; \quad (1)$$

$$F_a - F_b = H_a \cdot (l_{leg} + 2l_{yoke}) - H_b \cdot l_{leg}; \quad (2)$$

$$F_b - F_c = H_b \cdot l_{leg} - H_c \cdot (l_{leg} + 2l_{yoke}); \quad (3)$$

$$F_b = H_b \cdot l_{leg} + R_0 \cdot \Phi_0; \quad (4)$$

$$F_a = (w_{a11}i_{a11} + w_{a12}i_{a12} + w_{a13}i_{a13}) + (w_{a21}i_{a21} + w_{a22}i_{a22} + w_{a23}i_{a23}) + w_{a14}i_{a14}; \quad (5)$$

$$F_b = (w_{b11}i_{b11} + w_{b12}i_{b12} + w_{b13}i_{b13}) + (w_{b21}i_{b21} + w_{b22}i_{b22} + w_{b23}i_{b23}) + w_{b14}i_{b14}; \quad (6)$$

$$F_c = (w_{c11}i_{c11} + w_{c12}i_{c12} + w_{c13}i_{c13}) + (w_{c21}i_{c21} + w_{c22}i_{c22} + w_{c23}i_{c23}) + w_{c14}i_{c14}; \quad (7)$$

Сформируем канал вычисления Φ_b по уравнению (1):

$$\Phi_b = \Phi_0 - \Phi_a - \Phi_c; \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} = S \cdot \begin{bmatrix} B_a \\ B_b \\ B_c \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где S – площадь сечения магнитопровода;

$$B_b = \Phi_b / S; \quad (10)$$

По уравнениям (2) и (3) сформируем канал вычисления $H_a \cdot l_c$ и $H_c \cdot l_c$:

$$H_a \cdot (l_{leg} + 2l_{yoke}) = F_a - F_b + H_b \cdot l_{leg}; \quad (11)$$

$$H_c \cdot (l_{leg} + 2l_{yoke}) = F_c - F_b + H_b \cdot l_{leg}; \quad (12)$$

Соотношение между магнитной индукцией B и напряженностью магнитного поля H в сердечнике – функция $B=f(H)$, составляемая по таблице или графику намагничивания.

$$B_a = f(H_a);$$

$$B_c = f(H_c);$$

Получили:

$$\left\{ \begin{array}{l} H_a = (F_a - F_b + H_b \cdot l_{leg}) / (l_{leg} + 2l_{yoke}) \\ H_c = (F_c - F_b + H_b \cdot l_{leg}) / (l_{leg} + 2l_{yoke}) \\ B_a = f(H_a); \quad B_c = f(H_c) \\ \Phi_a = B_a \cdot S; \quad \Phi_c = B_c \cdot S \\ \Phi_0 = (F_b - H_b \cdot l_{leg}) / R_0 \\ \Phi_b = \Phi_0 - \Phi_a - \Phi_c \\ B_b = \Phi_b / S \\ H_b = f^{-1}(B_b) \end{array} \right. \quad (13)$$

Имитационная модель трехфазного трансформатора с расщепленными обмотками представлена на рис. 3.

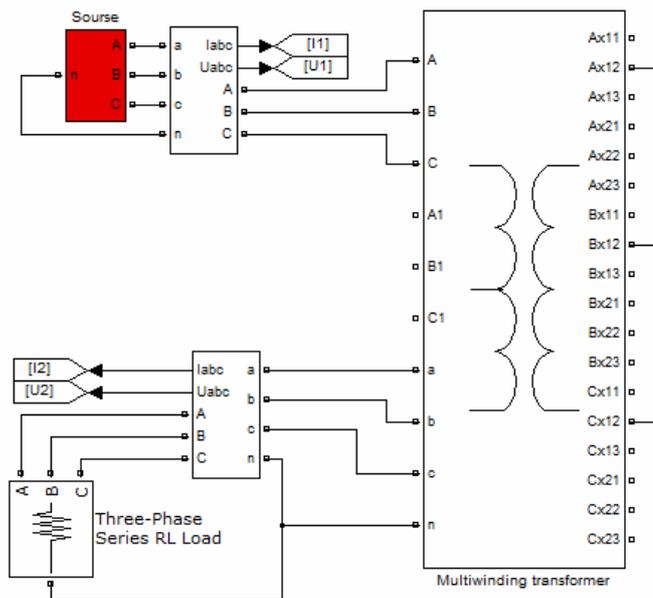


Рис. 3. Имитационная модель исследуемого трехфазного трансформатора.

Режимы несимметричной работы в широком диапазоне изменения нагрузок иллюстрирует трехмерный график, представленный на рис. 4. Данный график построен при неизменном номинальном сопротивлении в фазе A: $Z_a = Z_n$, диапазон изменения сопротивлений в фазах B и C- от Z_n до $2Z_n$, что соответствует 50% нагрузки.

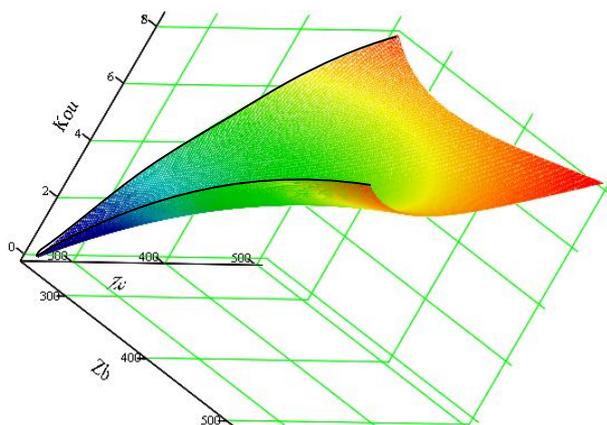


Рис. 4. Трехмерный график – зависимость коэффициента несимметрии нулевой последовательности от сопротивлений фаз нагрузки

Из рис. 4 следует, что коэффициент несимметрии нулевой последовательности $K_{0U\%}$ значительно возрастает при симметричном увеличении сопротивлений в фазах В и С.

По результатам расчетов и выполненного моделирования установлено, что предельно допустимый коэффициент несимметрии нулевой последовательности $K_{0U\%}=4\%$ будет при нагрузках в фазах В и С составляющих 80% от номинальной, при этом в фазе А нагрузка номинальная. Следовательно, нельзя допускать несимметрию нагрузок в фазах более чем 20%.

В аварийных режимах работы токи через тиристорные ключи значительно превышают номинальный ток I_H . Так при коротком замыкании фазы А ток первичной обмотки поврежденной фазы составляет $3,9I_H$. Токи в фазах В и С составляют соответственно $1,36 I_H$ и $2,7 I_H$. При коротком замыкании в фазах А и В токи через тиристоры составят в фазе А – $16,67 I_H$, в фазе В – $15,5 I_H$, в фазе С – $1,67 I_H$. При симметричном трехфазном коротком замыкании токи во всех фазах составят $18,2 I_H$.

Произведенные расчеты работы ТСЗН-400/10 при несимметричном питающем напряжении показали следующее. В случае несимметрии приложенных линейных первичных напряжений на $\pm 10\%$ от номинального значения, коэффициент несимметрии по обратной последовательности $K_{2U\%}$ превышает предельно допустимое значение 4% и в некоторых режимах достигает значения 11,59%.

Список литературы:

- [1] Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. – Л.: Энергия, 1970.
- [2] Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. В 2-х т. Том 1: Учебник для вузов.– 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2004.
- [3] Мартынов В.А. Расчет неполнофазных режимов работы трехфазных трансформаторов // Электричество. – 2003, № 9, № 10.