

допустимого времени работы генератора при температуре холодного водорода выше допустимой;

допустимой расчетной величины мощности и тока генератора при температуре холодного водорода выше допустимой;

максимальной и минимальной температур холодного и горячего воздуха в воздухоохладителях № 1–4 $T_{\text{ВО N}}^{\text{x max}}$, $T_{\text{ВО N}}^{\text{x min}}$, $T_{\text{ВО N}}^{\text{r max}}$, $T_{\text{ВО N}}^{\text{r min}}$;

допустимого времени работы возбудителя при температуре холодного воздуха выше допустимой.

Текущее тепловое состояние генератора и его вспомогательных систем отображается на цветном графическом дисплее в виде многослойных мнемосхем. По результатам регистрируемой информации формируется сводная ведомость значений параметров, характеризующая тепловое состояние генератора и его охлаждающих систем.

Программная реализация алгоритма теплового контроля турбогенератора с водородным охлаждением реализована А. А. Жамойдиным, Д. Г. Левиным, и С. В. Дубовским в ИВС генератора и внедрена на восьми турбогенераторах 500 МВт. Программно-технические комплексы турбогенераторов подключены к локальной вычислительной сети АСУ ТП электростанции.

В настоящее время функции алгоритма цифрового контроля теплового состояния турбогенераторов с водородным охлаждением и его систем охлаждения прорабатываются применительно к модернизируемым энергоблокам с учетом требований типовой инструкции по эксплуатации.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. К о г а н Ф. Л. Аномальные режимы мощных турбогенераторов. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 192 с.

2. Т и п о в а я инструкция по эксплуатации генератора на электростанциях. РД 34.45.501-88. — СПО «Союзтехэнерго», 1989. — 119 с.

Поступила 11.11.1999

УДК 621.316.925

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА С РАСЩЕПЛЕННЫМИ ОБМОТКАМИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ

Канд. техн. наук, доц. НОВАШ И. В.

Белорусская государственная политехническая академия

Рассматриваемая в статье математическая модель ориентирована на расчеты переходных процессов при включении трансформатора, скачкообразных изменениях вторичных нагрузок, питающих напряжений, коротких замыканиях, их отключении и т. п. Рассматривается трехфазный трехстержневой двухобмоточный трансформатор с расщепленной обмоткой низшего напряжения и группой соединений $Y_0/\Delta/\Delta-11-11$.

Математическая модель составлена в соответствии со «второй теорией рассеяния» [1], основанной на наличии самостоятельных магнитных потоков в элементах магнитопровода и междуобмоточных пространствах аналогично тому, как это делалось применительно к двухобмоточным трансформаторам и автотрансформаторам [2, 3].

В моделях, основанных на второй теории рассеяния, отсутствуют индуктивности рассеяния отдельных обмоток, которые для расчета переходных процессов при различных режимах не могут быть однозначно определены. Принятая для составления модели конструкция трансформатора [4] и распределение магнитных потоков представлены на рис. 1, схема соединения обмоток – на рис. 2.

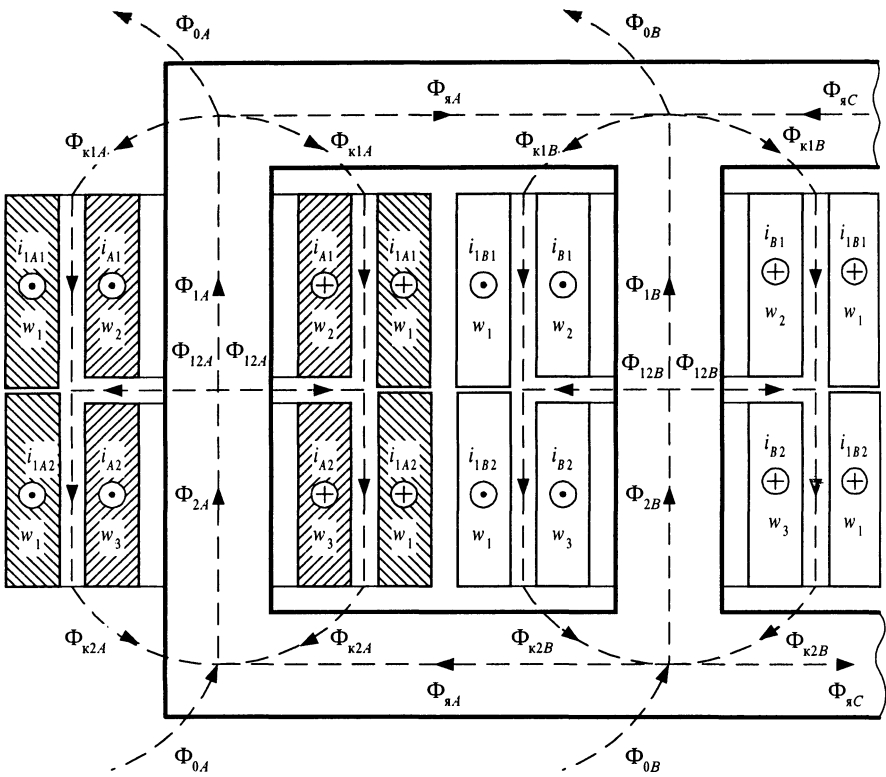


Рис. 1

Основным назначением модели является выработка входной информации релейной защиты трансформатора при различных аварийных и послеаварийных режимах для исследования работоспособности защиты методом вычислительного эксперимента [5]. Такая информация представляет собой последовательности мгновенных значений токов и напряжений трансформатора, для получения которых используется математический аппарат обыкновенных дифференциальных уравнений, численно решаемых шаговыми методами.

Электрические контуры схемы рис. 2 на стороне высшего напряжения (ВН) описываются следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}
 u_{1j} &= R_{T11}i_{1j1} + w_1 \frac{d}{dt}(\Phi_{1j} - \Phi_{\kappa1j}) + u_{10} & (j = A, B, C); \\
 u_{1j} &= R_{T12}i_{1j2} + w_1 \frac{d}{dt}(\Phi_{2j} - \Phi_{\kappa2j}) + u_{10} & (j = A, B, C).
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

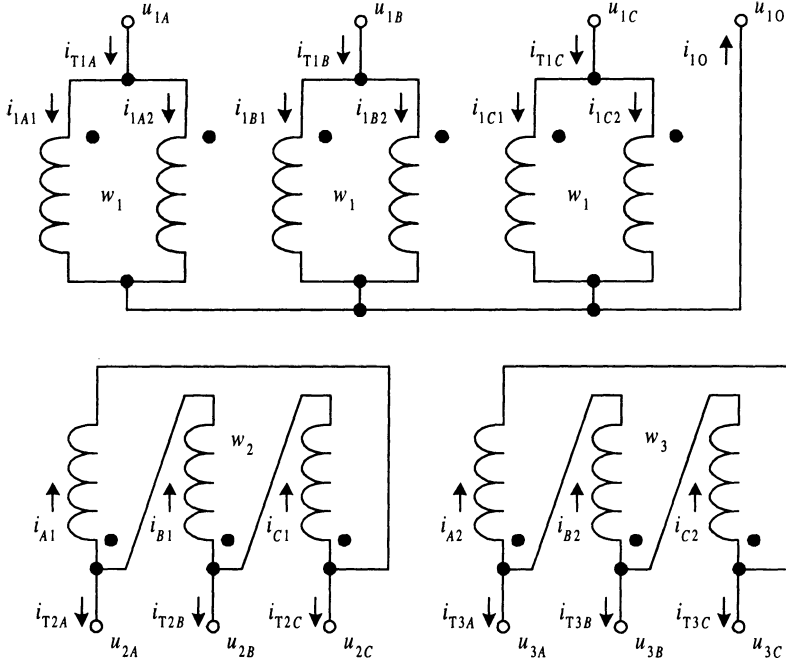


Рис. 2

Дифференциальные уравнения электрических контуров на стороне низшего напряжения (НН) имеют вид:

$$\begin{aligned}
 u_{2j} - u_{2l} &= R_{T2}i_{j1} + w_2 \frac{d\Phi_{1j}}{dt} & (j = A, B, C; l = C, A, B); \\
 u_{3j} - u_{3l} &= R_{T3}i_{j2} + w_3 \frac{d\Phi_{2j}}{dt} & (j = A, B, C; l = C, A, B).
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Здесь $\Phi_{1,2j} = s_c B_{1,2j}$ — магнитные потоки стержней магнитопровода;

$B_{1,2j}$ — соответствующие им значения индукций;

s_c — сечения стержней;

$\Phi_{\kappa1j}, \Phi_{\kappa2j}$ — магнитные потоки рассеяния в пространствах между вторичными и первичными обмотками;

R_{T11}, R_{T12} — активные сопротивления параллельных ветвей первичной обмотки;

R_{T2}, R_{T3} — активные сопротивления вторичных обмоток.

Уравнения баланса магнитных потоков в элементах магнитопровода и междуобмоточных пространствах:

$$\begin{aligned}
 \Phi_{lA} &= \Phi_{\kappa lA} + \Phi_{\text{я}A} + \Phi_{0A} & (l = 1, 2); \\
 \Phi_{lB} &= \Phi_{\kappa lB} - \Phi_{\text{я}A} - \Phi_{\text{я}C} + \Phi_{0B} & (l = 1, 2);
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_{lC} &= \Phi_{\kappa lC} + \Phi_{\text{я}C} + \Phi_{0C} \quad (l = 1, 2); \\ \Phi_{12j} &= \Phi_{2j} - \Phi_{1j} \quad (j = A, B, C); \\ \Phi_{12j} &= \Phi_{\kappa 2j} - \Phi_{\kappa 1j} \quad (j = A, B, C),\end{aligned}\quad (3)$$

где $\Phi_{\text{я}A,C} = s_{\text{я}} B_{\text{я}A,C}$ — магнитные потоки в элементах ярма;

$B_{\text{я}A,C}$ — соответствующие им значения индукций;

$s_{\text{я}}$ — сечение ярма;

Φ_{0j} — магнитные потоки, замыкающиеся по стенкам бака и околообмоточным пространствам;

Φ_{12j} — то же, в пространствах между обмотками НН трансформатора.

Уравнения равновесия МДС в магнитных контурах, образованных элементами магнитопровода и междуобмоточными пространствами:

$$\begin{aligned}0,5l_c H_{1j} + R_{\mu\kappa} \Phi_{\kappa 1j} - R_{\mu 12} \Phi_{12j} &= w_2 i_{j1} \quad (j = A, B, C); \\ 0,5l_c H_{2j} + R_{\mu\kappa} \Phi_{\kappa 2j} + R_{\mu 12} \Phi_{12j} &= w_3 i_{j2} \quad (j = A, B, C); \\ 0,5l_c (H_{1j} + H_{2j}) + R_{\mu 0} \Phi_{0j} &= w_1 (i_{1j1} + i_{1j2}) + w_2 i_{j1} + w_3 i_{j2}; \\ 0,5l_c (H_{1A} - H_{1B}) + 0,5l_c (H_{2A} - H_{2B}) + l_{\text{я}} H_{\text{я}A} &= \\ = w_1 (i_{1A1} + i_{1A2}) - w_1 (i_{1B1} + i_{1B2}) + w_2 (i_{A1} - i_{B1}) + w_3 (i_{A2} - i_{B2}); \\ 0,5l_c (H_{1B} - H_{1C}) + 0,5l_c (H_{2B} - H_{2C}) - l_{\text{я}} H_{\text{я}C} &= \\ = w_1 (i_{1B1} + i_{1B2}) - w_1 (i_{1C1} + i_{1C2}) + w_2 (i_{B1} - i_{C1}) + w_3 (i_{B2} - i_{C2}).\end{aligned}\quad (4)$$

Здесь $H_{1,2j}$, $H_{\text{я}A,C}$ — напряженности магнитного поля в стержнях и элементах ярма магнитопровода;

$R_{\mu\kappa}$, $R_{\mu 0}$, $R_{\mu 12}$ — магнитные сопротивления на путях магнитных потоков $\Phi_{\kappa 1,2j}$, Φ_{0j} , Φ_{12j} соответственно;

l_c , $l_{\text{я}}$ — длины стержня и двух элементов ярма соответственно.

Связь между напряженностями и индукциями в стержнях и элементах ярма магнитопровода определяется характеристиками намагничивания: $H_{1,2j} = f(B_{1,2j})$; $H_{\text{я}A,C} = f(B_{\text{я}A,C})$ [5].

Магнитные сопротивления на путях магнитных потоков $\Phi_{\kappa 1,2j}$, Φ_{0j} , Φ_{12j} определяются через параметры короткого замыкания трансформатора с учетом следующих соображений.

Связь между магнитным сопротивлением R_{μ} на пути потока рассеяния в междуобмоточном пространстве двухобмоточного трансформатора и индуктивным сопротивлением короткого замыкания (КЗ) X_{κ} , приведенным к стороне обмотки с числом витков $w_{\text{об}}$, определяется выражением [5]

$$R_{\mu} = \frac{w_{\text{об}}^2 \omega_0}{X_{\kappa}}.$$

Применительно к рассматриваемому трансформатору исходя из физического смысла его междуобмоточных индуктивностей КЗ $X_{\kappa \text{ВН}}$ и $X_{\kappa \text{НН}}$ справедливы соотношения:

$$R_{\mu\kappa} = 0,5R_{\mu\text{ВН}}; R_{\mu12} = R_{\mu\text{НН}} - 0,25R_{\mu\text{ВН}}; R_{\mu0} = \frac{w_{\text{об}}^2\omega_0}{X_{\mu0}},$$

где

$$R_{\mu\text{ВН}} = \frac{w_{\text{об}}^2\omega_0}{X_{\kappa\text{ВН}}}; R_{\mu\text{НН}} = \frac{w_{\text{об}}^2\omega_0}{X_{\kappa\text{НН}}}.$$

В настоящей работе индуктивные сопротивления КЗ приводятся к числу витков первичной обмотки трансформатора.

Уравнения электрических контуров на стороне ВН трансформатора могут быть упрощены с использованием соотношений

$$\Phi_{1j} - \Phi_{\kappa1j} = \Phi_{2j} - \Phi_{\kappa2j},$$

вытекающих из уравнений (3). С учетом этих соотношений из уравнений (1) следует, что при равенстве активных сопротивлений $R_{\tau11} = R_{\tau12}$ токи в параллельных ветвях первичной обмотки во всех режимах трансформатора, описываемых рассматриваемой моделью, будут одинаковыми. Вместо шести дифференциальных уравнений контуры ВН трансформатора можно описывать уравнениями

$$u_{1j} = R_{\tau1}i_{\tau1j} + w_1 \frac{d}{dt}(\Phi_{1j} - \Phi_{\kappa1j}) + u_{\tau0} \quad (j = A, B, C), \quad (5)$$

где $R_{\tau1} = 0,5R_{\tau11}$ — результирующее сопротивление первичных обмоток трансформатора.

Уравнения (2)–(5) полностью описывают электромагнитные переходные процессы в указанных выше режимах работы трансформатора. Для исследования конкретных режимов они дополняются уравнениями источников питания, элементов связи, нагрузок и др. Математическая модель обобщенного объекта (узел нагрузки с питающим трансформатором, понизительная подстанция, отдельный трансформатор с источником питания и т. п.) содержит замкнутую систему дифференциальных и алгебраических уравнений вида:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}y_i &= f_i(y_1, \dots, y_n, x_1, \dots, x_m, t) \quad (i = 1, 2, \dots, n); \\ \Phi_k(x_1, \dots, x_m, y_1, \dots, y_n, t) &= 0 \quad (k = 1, 2, \dots, m). \end{aligned}$$

Дифференциальные уравнения электрических контуров обобщенного объекта образуются путем исключения переменных u_{1i} , u_{2i} , u_{3i} из уравнений баланса напряжений отдельных элементов обобщенного объекта. Алгебраические уравнения — это уравнения, связывающие интегрируемые переменные y_1, \dots, y_n с токами и другими параметрами режима, уравнения баланса токов в узлах электрической схемы обобщенного объекта, уравнения баланса магнитных потоков, баланса МДС в элементах магнитопровода, а также характеристики намагничивания этих элементов. Ввиду нелинейности последних система алгебраических уравнений неразрешима в общем виде, и дифференциальные уравнения не приводятся к нормальной форме Коши. Алгебраические уравнения

решаются на каждом шаге численного интегрирования при известных в начале шага значениях y_1, \dots, y_n .

Для проверки адекватности предложенной модели были выполнены расчеты режимов включения со стороны ВН и коротких замыканий на сторонах НН трансформатора в простейших схемах. Рассматривались схемы с источниками питания в виде симметричной системы напряжений прямой последовательности с неизменными амплитудой и частотой, симметричной системы ЭДС прямой последовательности с неизменными амплитудой и частотой и неизменными активно-индуктивными сопротивлениями. Хорошее совпадение установившихся значений токов КЗ с результатами расчетов по известным методикам дают основание считать рассмотренную модель пригодной для использования в более сложных расчетных схемах. При этом было отмечено, что потоки Φ_{0j} оказывают влияние на токи КЗ на землю на стороне ВН и на броски намагничивающих токов (до 20–30 % в сторону уменьшения). Влияние этих потоков на токи трансформатора во всех остальных режимах не превышает 0,5–1 %. Отмечено увеличение намагничивающих токов при междуфазных КЗ на сторонах НН по сравнению с двухобмоточными трансформаторами обычного исполнения. Эти вопросы заслуживают более тщательного исследования.

ВЫВОД

Рассмотренная математическая модель понижающего трансформатора с расщепленной обмоткой низшего напряжения может быть использована в составе комплексной математической модели обобщенного объекта защиты для проверки технического совершенства релейной защиты трансформатора методом вычислительного эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. З и х е р м а н М. Х. Об электромагнитном рассеянии обмоток трансформаторов // Электричество. – 1983. – № 9. – С. 60–63.
2. Н о в а ш И. В. Математическая модель трехфазного трехстержневого трансформатора на базе второй теории рассеяния // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1986. – № 5. – С. 36–39.
3. Н о в а ш И. В. Математические модели трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов, не содержащие индуктивностей рассеяния отдельных обмоток // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1993. – № 7–8. – С. 27–31.
4. Э л е к т р о т е х н и ч е с к и й справочник: В 3-х т. – Т. 2. Электротехнические изделия и устройства / Под общ. ред. профессоров МЭИ (гл. ред. И. Н. Орлов) и др. – 7-е изд., испр. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 712 с.
5. Р о м а н ю к Ф. А., Н о в а ш В. И. Информационное обеспечение вычислительного эксперимента в релейной защите и автоматике энергосистем. – Мн.: ВУЗ-ЮНИТИ, 1998. – 174 с.