

УДК 621.311.014

Ю.Н. ВЕПРИК, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ", Харків

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ УСТАНОВИВШИХСЯ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

We present mathematical models of power transformers of various embodiment of the in phase coordinates and the possibility of their representation in a unified form to improve modeling of complex non-symmetric modes of electrical systems.

Представлены математические модели силовых трансформаторов различного конструктивного исполнения в фазных координатах и показана возможность их представления в унифицированной форме для повышения эффективности моделирования сложных несимметричных режимов электрических систем.

Представлено математичні моделі силових трансформаторів різного конструктивного виконання в фазних координатах і показана можливість їх подання в уніфікованій формі для підвищення ефективності моделювання складних несимметричних режимів електричних систем.

Постановка проблемы. Одна из особенностей текущего этапа развития электрических систем состоит в том, что значительная часть оборудования выработала свой ресурс, и вынужденные отключения отдельных фаз оборудования (аварийные, в ремонт) приводят к тому, что возникновение несимметрии параметров режима (простой, сложной) в условиях эксплуатации уже не является мало вероятным, исключительным событием. Методом симметричных составляющих все многообразие возникающих при этом задач не охватывается, поэтому требуют развития и совершенствования математические модели на основе уравнений в фазных координатах как системы в целом, так и отдельных ее элементов, включая и силовые трансформаторы.

Анализ публикаций. Задача формирования уравнений для трехфазных трансформаторов усложняется разнообразием их конструктивного исполнения, схем и групп соединения обмоток, а также отсутствием полных каталожных данных по параметрам и характеристикам силовых трансформаторов. Поэтому некоторые авторы относят сило-

вые трансформаторы к числу элементов, наиболее сложных для математического моделирования [4]. Известный метод развязки магнитосвязанных цепей [1] при практической реализации в программных средствах сталкивается с рядом затруднений, ограничивающих его применение в алгоритмах расчета режимов. С.Б. Лосевым и А.Б. Черниным предложено использовать полносвязные решетчатые схемы однофазных трансформаторов [3] с учетом ветви намагничивания, а схемы трехфазных трансформаторов синтезировать из однофазных. Однако при таком подходе не отражается режим нейтрали при соединении обмоток трехфазного трансформатора в звезду, а возможности формирования моделей трехфазных трансформаторов с произвольными схемами соединения обмоток ограничены. Группы моделей однофазных трансформаторов для моделирования трехфазных используются и в наиболее распространенном прикладном пакете SimPowersystems системы MatLab.

Цель и задачи. Более широкие возможности формализации подхода к построению моделей электрических систем с несимметрией и учета особенностей конструктивного исполнения элементов обеспечиваются в базовой математической модели несимметричных режимов электрических систем [2], реализованной на основе перехода на уровень трехфазных многополюсников и представления элементов уравнениями в фазных координатах. Силовые трансформаторы по конструктивному исполнению различаются схемами соединения обмоток, режимом нейтрали, количеством обмоток, конструкцией сердечника.

Поэтому, с одной стороны, модели трансформаторов все эти особенности должны отражать, но с другой стороны, многообразие форм представления элементов приводит к усложнению модели системы. Поэтому при разработке моделей трансформаторов, как и других элементов, разнообразие форм записи уравнений элементов сети целесообразно сократить и представить их в некоторой унифицированной форме, с тем, чтобы обеспечить формализацию и алгоритмизацию формирования обобщенной базовой модели, не ограничивая ее возможностей.

Основной материал. При моделировании несимметричных режимов электрических систем в фазных координатах естественно представлять трансформатор как систему первичных и вторичных обмоток трех фаз, расположенных на магнитном сердечнике и связанных между собой индуктивно и электрически в соответствии с группой и схемой соединения. Для алгоритмизации процедуры формирования модели такой системы в полной системе уравнений трехфазного трансфор-

мотора целесообразно выделить две группы уравнений: компонентные и топологические.

Компонентные уравнения относятся к отдельным обмоткам (компонентам) трансформатора, характеризуют только их собственные индуктивности и электромагнитные связи между обмотками при отсутствии каких-либо электрических соединений между ними (рис. 1).

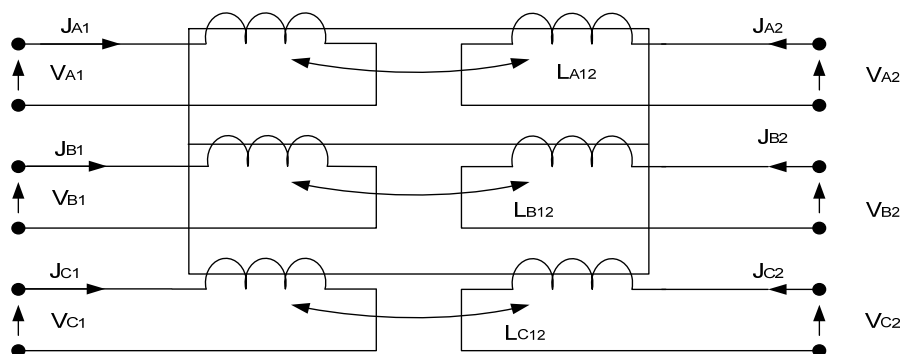


Рис. 1. Электромагнитные связи между обмотками трехфазного трансформатора.

В установившихся режимах токи и падения напряжения в обмотках трехфазного трансформатора синусоидальны, поэтому компонентные уравнения могут быть записаны в комплексной форме.

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (r_A + j\omega L_A) & & \\ & (r_B + j\omega L_B) & \\ & & (r_C + j\omega L_C) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_A \\ J_B \\ J_C \end{bmatrix} + j\omega \begin{bmatrix} L_{Aa} & & \\ & L_{Bb} & \\ & & L_{Cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_a \\ J_b \\ J_c \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} L_{aA} & & \\ & L_{bB} & \\ & & L_{cC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_A \\ J_B \\ J_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (r_a + j\omega L_a) & & \\ & (r_b + j\omega L_b) & \\ & & (r_c + j\omega L_c) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_a \\ J_b \\ J_c \end{bmatrix},$$

или, в более компактной записи

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \left([R_{11}] + j\omega [L_{11}] \right) [J_1] + j\omega [L_{12}] [J_2] \\ [V_2] = j\omega [L_{21}] [J_1] + \left([R_{22}] + j\omega [L_{22}] \right) [J_2], \quad (1)$$

где $[V_1]$, $[V_2]$, $[J_1]$, $[J_2]$, $[R_{11}]$, $[R_{22}]$ – напряжения, токи и активные сопротивления первичных и вторичных обмоток трансформатора; $[L_{11}]$, $[L_{22}]$, $[L_{21}] = [L_{12}]$ – матрицы собственных и взаимных индуктивностей обмоток.

Если уравнения (1) разрешить относительно токов, то получим

еще одну форму записи компонентных уравнений трансформатора

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} J_{A1} \\ J_{B1} \\ J_{C1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} Y_{A1} & & \\ & Y_{B1} & \\ & & Y_{C1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{A1} \\ V_{B1} \\ V_{C1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{A12} & & \\ & Y_{B12} & \\ & & Y_{C12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{A2} \\ V_{B2} \\ V_{C2} \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} J_{A2} \\ J_{B2} \\ J_{C2} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} Y_{A21} & & \\ & Y_{B21} & \\ & & Y_{C21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{A1} \\ V_{B1} \\ V_{C1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{A2} & & \\ & Y_{B2} & \\ & & Y_{C2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{A2} \\ V_{B2} \\ V_{C2} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (2)$$

эквивалентную предыдущим, но более удобную для формирования узловых уравнений электрической сети в форме баланса токов.

В компонентных уравнениях (2) блоки Y диагональны (отсутствует взаимное влияние фаз) в групповых трансформаторах. В трехстержневых взаимное влияние проявляется в несимметричных режимах при наличии составляющей нулевой последовательности. Однако влияние тока нулевой последовательности сказывается практически только на параметры ветви намагничивания X_μ . Влияние же ветви намагничивания на параметры режима трансформатора мало, часто не учитывается, и поэтому в первом приближении, считая

$$X_\mu^{(1)} = X_\mu^{(2)} = X_\mu^{(0)},$$

можно считать, что блоки Y диагональны и в

уравнениях трехстержневых трансформаторов. Если далее учесть, что при симметрии фаз трансформатора

$$\begin{aligned} Y_{A1} = Y_{B1} = Y_{C1} = Y_1, & \quad Y_{A2} = Y_{B2} = Y_{C2} = Y_2, \\ Y_{A12} = Y_{B12} = Y_{C12} = Y_{12}, & \quad Y_{A21} = Y_{B21} = Y_{C21} = Y_{21}, \quad Y_{21} = Y_{12}, \end{aligned}$$

то компонентные уравнения получают вид:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} J_{A1} \\ J_{B1} \\ J_{C1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} Y_1 & & \\ & Y_1 & \\ & & Y_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{A1} \\ V_{B1} \\ V_{C1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{12} & & \\ & Y_{12} & \\ & & Y_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{A2} \\ V_{B2} \\ V_{C2} \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} J_{A2} \\ J_{B2} \\ J_{C2} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} Y_{21} & & \\ & Y_{21} & \\ & & Y_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{A1} \\ V_{B1} \\ V_{C1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_2 & & \\ & Y_2 & \\ & & Y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{A2} \\ V_{B2} \\ V_{C2} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3)$$

Топологические уравнения отражают электрические связи между токами и напряжениями в обмотках и на внешних зажимах и зависят от способа соединения обмоток трансформатора. В матричной форме топологические уравнения записываются с помощью соответствующей

щих матриц соединений обмоток (рис. 2).

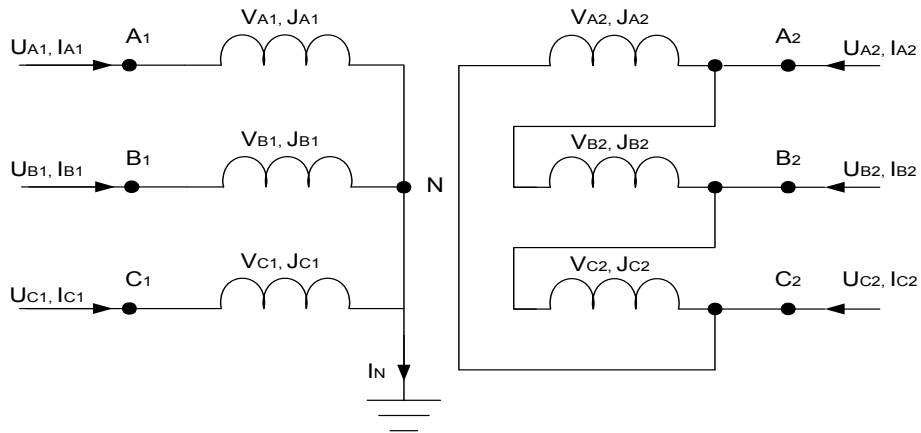


Рис. 2. Схемы соединения и параметры режима обмоток трансформатора Y/Δ-11 с глухозаземленной нейтралью.

Для трехфазного двухобмоточного трансформатора со схемой и группой соединения обмоток Y/Δ-11 и с глухозаземленной нейтралью (рис. 2) топологические уравнения имеют вид:

$$\begin{bmatrix} I_{A1} \\ I_{B1} \\ I_{C1} \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{A1} \\ J_{B1} \\ J_{C1} \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} V_{A1} \\ V_{B1} \\ V_{C1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{A1} \\ U_{B1} \\ U_{C1} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} I_{A2} \\ I_{B2} \\ I_{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{a2} \\ J_{b2} \\ J_{c2} \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} V_{A2} \\ V_{B2} \\ V_{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{a2} \\ U_{b2} \\ U_{c2} \end{bmatrix}$$

где $[I]$, $[U]$ – векторы токов напряжений на внешних зажимах; $[J]$, $[V]$ – векторы токов и напряжений в обмотках трансформатора.

Компонентные (3) и топологические (4) уравнения являются основой для формирования математической модели трансформатора Y0/ Δ-11. На их основе процедура формирования модели может быть формализована следующим образом.

Умножив первое и второе уравнения (3) на соответствующую матрицу соединений обмоток, подставив вместо напряжений обмоток $[V_1]$, $[V_2]$ их выражения через напряжения на внешних зажимах (4)

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_A \\ J_B \\ J_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_1 \\ Y_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{12} \\ Y_{12} \\ Y_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{A2} \\ U_{B2} \\ U_{C2} \end{bmatrix} \\
& \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{A2} \\ J_{B2} \\ J_{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{21} \\ Y_{21} \\ Y_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} + \\
& + \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_2 \\ Y_2 \\ Y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{A2} \\ U_{B2} \\ U_{C2} \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

и, выполнив перемножение матриц, получим

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} I_{A1} \\ I_{B1} \\ I_{C1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} Y_1 & 0 & 0 \\ 0 & Y_1 & 0 \\ 0 & 0 & Y_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{A1} \\ U_{B1} \\ U_{C1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{12} & 0 & -Y_{12} \\ -Y_{12} & Y_{12} & 0 \\ 0 & -Y_{12} & Y_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{A2} \\ U_{B2} \\ U_{C2} \end{bmatrix} \\
\begin{bmatrix} I_{A2} \\ I_{B2} \\ I_{C2} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} Y_{21} & -Y_{21} & 0 \\ 0 & Y_{21} & -Y_{21} \\ -Y_{21} & 0 & Y_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{A1} \\ U_{B1} \\ U_{C1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2Y_2 & -Y_2 & -Y_2 \\ -Y_2 & 2Y_2 & -Y_2 \\ -Y_2 & -Y_2 & 2Y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{A2} \\ U_{B2} \\ U_{C2} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{5}$$

Уравнения (5) отражают связь между токами и напряжениями обмоток фаз ВН и НН и используются в [2] в качестве математической модели трансформатора $Y_0/\Delta-11$ в фазных координатах в стационарных несимметричных режимах. Они, как и уравнения других элементов в [2], представлены в унифицированной форме, удобной для включения в модель системы – разрешены относительно токов, отражают зависимости между токами и напряжениями фаз на внешних зажимах, матрицы параметров сформированы в виде блоков размером 3×3 .

Формирование уравнений трансформаторов с другими схемами соединения обмоток выполняется по этому же алгоритму и отличается только тем, что используются соответствующие топологические уравнения (матрицы соединений обмоток) и при необходимости выполняются дополнительные операции по приведению уравнений к унифицированному виду.

Так, для трехфазного двухобмоточного трансформатора со схемой и группой соединений обмоток $Y/\Delta-11$ и изолированной нейтра-

люю топологические уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_{A1} \\ I_{B1} \\ I_{C1} \\ 0 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{A1} \\ J_{B1} \\ J_{C1} \end{bmatrix}; & \begin{bmatrix} V_{A1} \\ V_{B1} \\ V_{C1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{A1} \\ U_{B1} \\ U_{C1} \\ U_N \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} I_{A2} \\ I_{B2} \\ I_{C2} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{a2} \\ J_{b2} \\ J_{c2} \end{bmatrix}; & \begin{bmatrix} V_{A2} \\ V_{B2} \\ V_{C2} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{a2} \\ U_{b2} \\ U_{c2} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

Если, аналогично предыдущему, умножить первое и второе компонентные уравнения (4) на соответствующую матрицу соединения обмоток, подставить вместо напряжений обмоток $[V_1], [V_2]$ их выражения через напряжения на внешних зажимах и выполнить перемножение матриц, то получим

$$\begin{bmatrix} I_{A1} \\ I_{B1} \\ I_{C1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 & 0 & 0 \\ 0 & Y_1 & 0 \\ 0 & 0 & Y_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{Ai} - U_N \\ U_{Bi} - U_N \\ U_{Ci} - U_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{12} & 0 & -Y_{12} \\ -Y_{12} & Y_{12} & 0 \\ 0 & -Y_{12} & Y_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{A2} \\ U_{B2} \\ U_{C2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} I_{A2} \\ I_{B2} \\ I_{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{21} & -Y_{21} & 0 \\ 0 & Y_{21} & -Y_{21} \\ -Y_{21} & 0 & Y_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{Ai} - U_N \\ U_{Bi} - U_N \\ U_{Ci} - U_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2Y_2 & -Y_2 & -Y_2 \\ -Y_2 & 2Y_2 & -Y_2 \\ -Y_2 & -Y_2 & 2Y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{A2} \\ U_{B2} \\ U_{C2} \end{bmatrix}$$

Напряжение на нейтрали трансформатора U_N можно исключить. Для этого достаточно в уравнении $J_{A1} + J_{B1} + J_{C1} = 0$ заменить токи обмоток через напряжения в соответствии с компонентными уравнениями.

$Y_1(U_{A1} - U_N) + Y_{12}V_{A2} + Y_1(U_{B1} - U_N) + Y_{12}V_{B2} + Y_1(U_{C1} - U_N) + Y_{12}V_{C2} = 0$
Сгруппировав члены уравнения с учетом того, что $(V_{A2} + V_{B2} + V_{C2}) = 0$, получим

$$U_N = \frac{1}{3}(U_{A1} + U_{B1} + U_{C1}) \quad (8)$$

Выразив U_N через напряжения фаз и, подставляя (8) в уравнения (7), получим окончательно уравнения в фазных координатах трансформатора $Y/\Delta-11$ с изолированной нейтралью в унифицированной форме:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_{A1} \\ I_{B1} \\ I_{C1} \end{bmatrix} &= \frac{Y_1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{A1} \\ U_{B1} \\ U_{C1} \end{bmatrix} + Y_{12} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{A2} \\ U_{B2} \\ U_{C2} \end{bmatrix}; \\ \begin{bmatrix} I_{A2} \\ I_{B2} \\ I_{C2} \end{bmatrix} &= Y_{21} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{A1} \\ U_{B1} \\ U_{C1} \end{bmatrix} + Y_2 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{A2} \\ U_{B2} \\ U_{C2} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (9)$$

Для трехфазного двухобмоточного трансформатора $Y/\Delta-11$ с сопротивлением Z_N в нейтрали компонентные и топологические уравнения имеют тот же вид, что и в предыдущем случае, с тем лишь отличием, что уравнение баланса токов для средней точки обмотки, соединенной в звезду, имеет вид $J_{A1} + J_{B1} + J_C + J_N = 0$, а ток в нейтрали $J_N = U_N/Z_N$. Выразив токи обмоток через напряжения

$$Y_1(U_{A1} - U_N) + Y_{12}U_{A2} + Y_1(U_{B1} - U_N) + Y_{12}U_{B2} + Y_1(U_{C1} - U_N) + Y_{12}U_{C2} - Y_N U_N = 0,$$

получим

$$\begin{aligned} U_N &= \frac{Y_1}{3Y_1 + Y_N} (U_{A1} + U_{B1} + U_{C1}) = \frac{Z_N}{Z_1 + 3Z_N} (U_{A1} + U_{B1} + U_{C1}) = \\ &= 3Z_N \frac{U^{(0)}}{Z_1 + 3Z_N} = 3Z_N I^{(0)}. \end{aligned} \quad (10)$$

Подставляя (10) в (9), с учетом обозначений

$$k_N = \frac{Y_1}{3Y_1 + Y_N} = \frac{Z_N}{Z_1 + 3Z_N},$$

получим окончательно уравнения в фазных координатах трансформатора $Y/\Delta-11$ с сопротивлением Z_N в нейтрали, представленные также унифицированным виде:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_{A1} \\ I_{B1} \\ I_{C1} \end{bmatrix} &= Y_1 \begin{bmatrix} (1-k_N) & -k_N & -k_N \\ -k_N & (1-k_N) & -k_N \\ -k_N & -k_N & (1-k_N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{A1} \\ U_{B1} \\ U_{C1} \end{bmatrix} + Y_{12} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{A2} \\ U_{B2} \\ U_{C2} \end{bmatrix}; \\ \begin{bmatrix} I_{A2} \\ I_{B2} \\ I_{C2} \end{bmatrix} &= Y_{21} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{A1} \\ U_{B1} \\ U_{C1} \end{bmatrix} + Y_2 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{A2} \\ U_{B2} \\ U_{C2} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (11)$$

Формирование уравнений для трансформаторов с другими схемами соединения обмоток отличается лишь тем, что используются матрицы соединений $[C]$, соответствующие этим схемам.

Выводы.

1. Использование для моделирования аварийных и эксплуатационных несимметричных режимов уравнений в фазных координатах позволяет естественным образом отразить все виды несимметрии в матрицах параметров соответствующих элементов.

2. Переход на уровень трехфазных многополюсников, представление уравнений элементов в унифицированной форме (преобразование уравнений с разными схемами соединения обмоток и режимом нейтрали, использование соответствующих уравнений в фазных координатах) позволяет сократить разнообразие форм записи уравнений элементов сети и обеспечить формализацию и алгоритмизацию формирования обобщенной базовой модели, не ограничивая ее возможностей.

Список литературы. 1. Щербина Ю. В. Представление трансформаторов электрических сетей схемами замещения без трансформирующих элементов / Ю.В. Щербина, А.И. Фраткин, О.В. Холодова // Вестник Киевского политехн. ин-та. Электроэнергетика. – 1981. – № 18. 2. Веприк Ю.Н. Задача математического моделирования стационарных режимов электрических систем в обобщенной постановке / Ю.Н. Веприк // Электротехника и электромеханика. – 2010. – № 3. – С. 59-61. 3. Лосев С. Б. Вычисление электрических величин в несимметричных режимах работы электрических систем / С.Б. Лосев, А.Б. Чернин // М.: Энергоатомиздат, 1983. – 528 с. 4. Коротков Б.А. Алгоритмы имитационного моделирования переходных процессов в электрических системах / Б.А. Коротков, В.Н. Попков // Л.: 1987. – 280 с.

*Поступила в редколлегию 28.03.2012
Рецензент д.т.н., проф. Луников В.С.*