

Несимметричные режимы работы силовых трансформаторов со схемой соединения обмоток Y/Y_0

Мартынов В.А., д-р техн. наук

На основе метода симметричных составляющих рассмотрены несимметричные и неполнофазные режимы работы силовых трехфазных трансформаторов со схемой соединения обмоток Y/Y_0 .

Ключевые слова: силовой трансформатор, несимметричный режим, неполнофазный режим, метод симметричных составляющих, несимметричная нагрузка, схема замещения трансформатора.

Asymmetrical operating conditions of power transformers with Y/Y_0 windings junction

Martynov V.A., Doctor of ScienceAs

Assymetrical and open-phase operating conditions of three-phase power transformes with Y/Y_0 windings junction are examined based on the method of symmetrical components.

Keywords: power transformer, asymmetrical conditions, open-phase operating conditions, method of symmetrical components, asymmetrical load, transformer substitution circuit.

Трехфазные трансформаторы со схемами соединения обмоток Y/Y_0 обычно используются как трансформаторы понизительных подстанций при питании трехфазных и однофазных потребителей и практически всегда работают 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 трансформатора несимметричная работа может быть опасна в отношении перегрузки отдельных обмоток, 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. Основным достоинством данного подхода является возможность использования схем замещения приведенного трансформатора для токов различных последовательностей и проведение расчетов с помощью простых аналитических формул. При этом анализ многих несимметричных режимов может быть произведен по параметрам трансформаторов, взятым из справочника. И хотя расчет несимметричных режимов трансформаторов методом симметричных составляющих применяется достаточно давно [1, 2], некоторые из встречающихся на практике режимов рассмотрены в технической литературе недостаточно подробно. Это относится, прежде всего, к режимам, возникающим при неполнофазных отключениях или включениях трансформаторов, а также при их пофазной коммутации.

Далее на основе метода симметричных составляющих рассмотрены несимметричные и неполно-

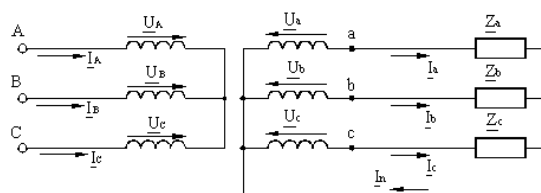


Рис. 1. Общий случай несимметричной работы трансформатора со статической нагрузкой

нофазные режимы работы трехфазных трансформаторов при соединении обмоток по схеме Y/Y_0 .

При исследовании несимметричных режимов, как и в [1, 2], будем считать, что количество витков первичной и вторичной обмоток одинаково, т. е. коэффициент трансформации фазных напряжений равен единице. Это не нарушает общности рассуждений, но позволяет не писать штрихов, соответствующих приведенным величинам. Поскольку схема замещения трансформатора одинакова для токов прямой и обратной последовательностей, то при анализе несимметричных режимов можно не рассматривать отдельно токи и напряжения этих последовательностей, а брать их сумму [1]. При соединении обмоток трансформатора по схеме Y/Y_0 (рис. 1) токи нулевой последовательности могут протекать только во вторичной обмотке. При этом фазные напряжения и токи трансформатора можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{U}'_A + \underline{U}_{A0}; & \underline{U}_a &= \underline{U}'_a + \underline{U}_{a0}; \\ \underline{U}_B &= \underline{U}'_B + \underline{U}_{A0}; & \underline{U}_b &= \underline{U}'_b + \underline{U}_{a0}; \\ \underline{U}_C &= \underline{U}'_C + \underline{U}_{A0}; & \underline{U}_c &= \underline{U}'_c + \underline{U}_{a0}; \\ \underline{I}_A &= \underline{I}'_A; & \underline{I}_a &= \underline{I}'_a + \underline{I}_{a0}; \\ \underline{I}_B &= \underline{I}'_B; & \underline{I}_b &= \underline{I}'_b + \underline{I}_{a0}; \\ \underline{I}_C &= \underline{I}'_C; & \underline{I}_c &= \underline{I}'_c + \underline{I}_{a0}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\underline{U}'_A, \underline{U}'_B, \underline{U}'_C, \underline{I}'_A, \underline{I}'_B, \underline{I}'_C$ – комплексные первичные фазные напряжения и токи трансформатора прямой и обратной последовательностей; $\underline{U}'_a, \underline{U}'_b, \underline{U}'_c, \underline{I}'_{a0}, \underline{I}'_{b0}, \underline{I}'_{c0}$ – комплексные вторичные фазные напряжения и токи трансформатора прямой и обратной последовательностей; \underline{U}_{A0} – комплексное первичное фазное напряжение нулевой последовательности; $\underline{U}_{a0}, \underline{I}_{a0}$ – комплексные вторичные фазные напряжения и ток нулевой последовательности.

Поскольку сопротивление намагничивающей ветви \underline{Z}_m схемы замещения для токов прямой и обратной последовательностей гораздо больше активных и индуктивных сопротивлений рассеяния, то при расчетах для этих последовательностей можно использовать Г-образную схему замещения трансформатора (рис. 2), где \underline{Z}_k – сопротивление короткого замыкания. При этом для токов прямой и обратной последовательностей намагничивающими токами можно пренебречь и считать, что

$$\underline{I}'_A = \underline{I}'_a; \quad \underline{I}'_B = \underline{I}'_b; \quad \underline{I}'_C = \underline{I}'_c. \quad (2)$$

Как известно, сопротивление намагничивающей ветви \underline{Z}_{m0} в схеме замещения нулевой последовательности зависит от конструкции сердечника трансформатора. В групповых и бронестержневых трансформаторах $\underline{Z}_{m0} \approx \underline{Z}_m$, а в трехстержневых – $\underline{Z}_{m0} \approx (7 \div 15) \underline{Z}_k$ и гораздо меньше \underline{Z}_m . В инженерных расчетах для токов нулевой последовательности может быть использована схема замещения, приведенная на рис. 3, при этом величина \underline{Z}_k должна быть взята такой же, как и в схеме на рис. 1 [1].

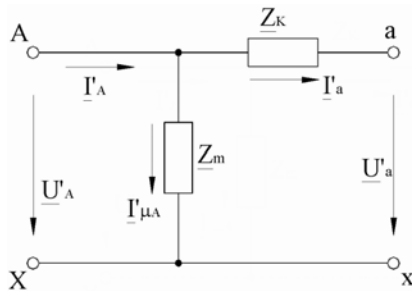


Рис. 2. Схема замещения трансформатора для токов прямой и обратной последовательностей

Первичное и вторичное напряжения нулевой последовательности в данном случае будут равны между собой и могут быть выражены через ток нулевой последовательности по формуле

$$\underline{U}_{A0} \approx \underline{U}_{a0} \approx \underline{I}_{a0} \underline{Z}_{m0} = -\underline{I}_{a0} \underline{Z}_{m0}. \quad (3)$$

Полнофазная работа трансформатора при несимметричной статической нагрузке. С учетом присоединенной статической нагрузки для вторичных фазных напряжений будут справедливы следующие уравнения (рис. 1):

$$\begin{aligned} \underline{U}_a &= \underline{U}'_a + \underline{U}_{a0} = \underline{U}'_a - \underline{I}'_a \underline{Z}_k - \underline{I}'_{a0} \underline{Z}_{m0} = (\underline{I}'_a + \underline{I}'_{a0}) \underline{Z}_a; \\ \underline{U}_b &= \underline{U}'_b + \underline{U}_{a0} = \underline{U}'_b - \underline{I}'_b \underline{Z}_k - \underline{I}'_{a0} \underline{Z}_{m0} = (\underline{I}'_b + \underline{I}'_{a0}) \underline{Z}_b; \quad (4) \\ \underline{U}_c &= \underline{U}'_c + \underline{U}_{a0} = \underline{U}'_c - \underline{I}'_c \underline{Z}_k - \underline{I}'_{a0} \underline{Z}_{m0} = (\underline{I}'_c + \underline{I}'_{a0}) \underline{Z}_c. \end{aligned}$$

При соединении первичной обмотки трансформатора по схеме Y можно считать известными линейные напряжения $\underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}$ и \underline{U}_{CA} , тогда первичные фазные напряжения прямой и обратной последовательностей $\underline{U}'_A, \underline{U}'_B, \underline{U}'_C$ определяются по формулам [1]

$$\begin{aligned} \underline{U}'_A &= \frac{1}{3}(\underline{U}_{AB} - \underline{U}_{CA}), \quad \underline{U}'_B = \frac{1}{3}(\underline{U}_{BC} - \underline{U}_{AB}), \\ \underline{U}'_C &= \frac{1}{3}(\underline{U}_{CA} - \underline{U}_{BC}). \end{aligned} \quad (5)$$

Согласно (5), при симметричных первичных линейных напряжениях фазные напряжения $\underline{U}'_A, \underline{U}'_B$ и \underline{U}'_C представляют собой симметричную систему напряжений прямой последовательности.

Преобразуя (4), получим в общем виде систему уравнений относительно неизвестных токов:

$$\begin{aligned} \underline{U}'_A &= \underline{I}'_a \underline{Z}_A + \underline{I}'_{a0} \underline{Z}_{a0}; \quad \underline{U}'_B = \underline{I}'_b \underline{Z}_B + \underline{I}'_{a0} \underline{Z}_{b0}; \\ \underline{U}'_C &= \underline{I}'_c \underline{Z}_C + \underline{I}'_{a0} \underline{Z}_{c0}, \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \underline{Z}_A &= \underline{Z}_a + \underline{Z}_k; \quad \underline{Z}_B = \underline{Z}_b + \underline{Z}_k; \quad \underline{Z}_C = \underline{Z}_c + \underline{Z}_k; \\ \underline{Z}_{a0} &= \underline{Z}_a + \underline{Z}_{m0}; \quad \underline{Z}_{b0} = \underline{Z}_b + \underline{Z}_{m0}; \quad \underline{Z}_{c0} = \underline{Z}_c + \underline{Z}_{m0}. \end{aligned}$$

Из решения (6) следует:

$$\begin{aligned} \underline{I}'_a = \underline{I}_A &= \frac{\Delta'_a}{\Delta_2}; \quad \underline{I}'_b = \underline{I}_B = \frac{\Delta'_b}{\Delta_2}; \\ \underline{I}'_c = \underline{I}_C &= \frac{\Delta'_c}{\Delta_2}; \quad \underline{I}'_{a0} = \frac{\Delta_0}{\Delta_2}, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta_2 &= \underline{Z}_A \underline{Z}_B \underline{Z}_{c0} + \underline{Z}_A \underline{Z}_C \underline{Z}_{b0} + \underline{Z}_B \underline{Z}_C \underline{Z}_{a0}; \\ \Delta'_a &= \underline{U}'_A (\underline{Z}_B \underline{Z}_{c0} + \underline{Z}_C \underline{Z}_{b0}) - \underline{U}'_B \underline{Z}_C \underline{Z}_{a0} - \underline{U}'_C \underline{Z}_B \underline{Z}_{a0}; \\ \Delta'_b &= \underline{U}'_B (\underline{Z}_A \underline{Z}_{c0} + \underline{Z}_C \underline{Z}_{a0}) - \underline{U}'_A \underline{Z}_C \underline{Z}_{b0} - \underline{U}'_C \underline{Z}_A \underline{Z}_{b0}; \\ \Delta'_c &= \underline{U}'_C (\underline{Z}_A \underline{Z}_{b0} + \underline{Z}_B \underline{Z}_{a0}) - \underline{U}'_A \underline{Z}_B \underline{Z}_{c0} - \underline{U}'_B \underline{Z}_A \underline{Z}_{c0}; \\ \Delta_0 &= \underline{U}'_A \underline{Z}_B \underline{Z}_C + \underline{U}'_B \underline{Z}_A \underline{Z}_C + \underline{U}'_C \underline{Z}_A \underline{Z}_B. \end{aligned}$$

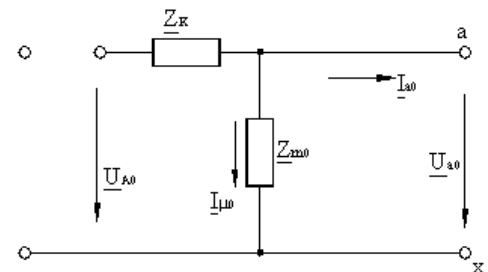


Рис. 3. Схема замещения трансформатора для токов нулевой последовательности

В случае группового или бронестержневого трансформатора, у которого $\underline{Z}_{m0} \approx \underline{Z}_m$ и гораздо больше сопротивлений $\underline{Z}_A, \underline{Z}_B, \underline{Z}_C$, из (7) следует:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{a0} &\approx 0; \\ \underline{U}_{A0} = \underline{U}_{a0} &\approx \frac{\underline{U}'_A \underline{Z}_B \underline{Z}_C + \underline{U}'_B \underline{Z}_A \underline{Z}_C + \underline{U}'_C \underline{Z}_A \underline{Z}_B}{\underline{Z}_A \underline{Z}_B + \underline{Z}_A \underline{Z}_C + \underline{Z}_B \underline{Z}_C}; \\ I_a &\approx \frac{\underline{U}'_A (\underline{Z}_B + \underline{Z}_C) - \underline{U}'_B \underline{Z}_C - \underline{U}'_C \underline{Z}_B}{\underline{Z}_A \underline{Z}_B + \underline{Z}_A \underline{Z}_C + \underline{Z}_B \underline{Z}_C}; \\ I_b &\approx \frac{\underline{U}'_B (\underline{Z}_A + \underline{Z}_C) - \underline{U}'_A \underline{Z}_C - \underline{U}'_C \underline{Z}_A}{\underline{Z}_A \underline{Z}_B + \underline{Z}_A \underline{Z}_C + \underline{Z}_B \underline{Z}_C}; \\ I_c &\approx \frac{\underline{U}'_C (\underline{Z}_A + \underline{Z}_B) - \underline{U}'_A \underline{Z}_B - \underline{U}'_B \underline{Z}_A}{\underline{Z}_A \underline{Z}_B + \underline{Z}_A \underline{Z}_C + \underline{Z}_B \underline{Z}_C}. \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, данный случай аналогичен несимметричной работе трансформатора при обрыве нейтрального провода, при этом величина \underline{U}_{a0} примерно равна напряжению смещения нейтрали \underline{U}_n .

В случае трехстержневого трансформатора, работающего в режиме, близком к холостому ходу, у которого сопротивления \underline{Z}_{m0} и \underline{Z}_k гораздо меньше сопротивлений нагрузки \underline{Z}_a , \underline{Z}_b , \underline{Z}_c , будем иметь:

$$\underline{U}_{a0} \approx 0; \quad I_a \approx \frac{\underline{U}'_A}{\underline{Z}_A}; \quad I_b \approx \frac{\underline{U}'_B}{\underline{Z}_B}; \quad I_c \approx \frac{\underline{U}'_C}{\underline{Z}_C}. \quad (9)$$

Согласно (9), в данном случае, несмотря на наличие неуравновешенных токов нулевой последовательности во вторичной обмотке, фазные напряжения трансформатора и приемника при симметрии линейных напряжений и несимметричной нагрузки остаются практически симметричными.

Из приведенных выше соотношений следует, что в групповых и бронестержневых трансформаторах с соединением обмоток Y/Y_0 сильное искажение системы фазных напряжений трансформатора и приемника возникает уже при незначительных по значению токах нулевой последовательности. Поэтому соединение Y/Y_0 в таких трансформаторах обычно не применяется. У трехстержневых трансформаторов с соединением обмоток Y/Y_0 искажение системы фазных напряжений при наличии токов нулевой последовательности гораздо меньше, так как $\underline{Z}_{m0} \ll \underline{Z}_m$. В нашей стране такие трансформаторы выпускаются мощностью до 6000 кВА, при этом требуется, чтобы ток в нулевом проводе не превышал 25 % номинального тока [3]. Тогда ток нулевой последовательности не будет превосходить $25 : 3 = 8,3$ % номинального тока.

Отключение (обрыв) линейного провода А со стороны питания. В данном режиме к трансформатору будет подводиться однофазное линейное напряжение \underline{U}_{BC} . При этом

$$\underline{I}_a = I_{a0}; \quad \underline{I}_B = I_b = -I_c = -I_{c0}. \quad (10)$$

Линейное напряжение \underline{U}_{BC} можно выразить через вторичные фазные напряжения и токи нагрузки:

$$\underline{U}_{BC} = \underline{U}'_B - \underline{U}'_C = \underline{U}'_b + I_b \underline{Z}_k - \underline{U}'_c - I_c \underline{Z}_k = \underline{U}_{bc} + 2I_b \underline{Z}_k. \quad (11)$$

С учетом присоединенной нагрузки вторичное линейное напряжение \underline{U}_{bc} можно представить в виде

$$\begin{aligned} \underline{U}_{bc} = \underline{U}_b - \underline{U}_c &= (I_b + I_{a0}) \underline{Z}_b - (I_c + I_{a0}) \underline{Z}_c = \\ &= I_b (\underline{Z}_b + \underline{Z}_c) + I_{a0} (\underline{Z}_b - \underline{Z}_c). \end{aligned} \quad (12)$$

Подставляя выражение (12) в (11), получим

$$\underline{U}_{BC} = I_b (\underline{Z}_b + \underline{Z}_c + 2\underline{Z}_k) + I_{a0} (\underline{Z}_b - \underline{Z}_c). \quad (13)$$

Для напряжения нулевой последовательности справедливо уравнение

$$\underline{U}_{a0} = \frac{1}{3} (\underline{U}_a + \underline{U}_b + \underline{U}_c) = \frac{1}{3} (I_a \underline{Z}_a + I_b \underline{Z}_b + I_c \underline{Z}_c). \quad (14)$$

Приравняв правые части уравнений (3) и (14) с учетом (10), получим:

$$I_{a0} (\underline{Z}_a + \underline{Z}_b + \underline{Z}_c + 3\underline{Z}_{m0}) + I_b (\underline{Z}_b - \underline{Z}_c) = 0. \quad (15)$$

Из совместного решения (13) и (15) следует

$$I_b = -I_c = \frac{\underline{U}_{BC}}{\Delta} (\underline{Z}_a + \underline{Z}_b + \underline{Z}_c + 3\underline{Z}_{m0}); \quad (16)$$

$$I_{a0} = -\frac{\underline{U}_{BC}}{\Delta} (\underline{Z}_b - \underline{Z}_c),$$

где

$$\begin{aligned} \Delta = &\underline{Z}_a \underline{Z}_b + \underline{Z}_a \underline{Z}_c + 4\underline{Z}_b \underline{Z}_c + 2\underline{Z}_k (\underline{Z}_a + \underline{Z}_b + \underline{Z}_c) + \\ &+ 3\underline{Z}_{m0} (\underline{Z}_b + \underline{Z}_c + 2\underline{Z}_k). \end{aligned}$$

Отключение (обрыв) линейного провода а с вторичной стороны. Выражения (7) позволяют определить вторичные токи при любой нагрузке. Так, при отключении (обрыве) линейного провода фазы а ($\underline{Z}_A = \underline{Z}_{a0} = \infty$) будем иметь:

$$\begin{aligned} I_a = I_A = -I_{a0} &= -\frac{\underline{U}'_B \underline{Z}_C + \underline{U}'_C \underline{Z}_B}{\underline{Z}_B \underline{Z}_{c0} + \underline{Z}_C \underline{Z}_{b0} + \underline{Z}_B \underline{Z}_C}; \\ I_b = I_B &= \frac{\underline{U}'_B (\underline{Z}_C + \underline{Z}_{c0}) - \underline{U}'_C \underline{Z}_{b0}}{\underline{Z}_B \underline{Z}_{c0} + \underline{Z}_C \underline{Z}_{b0} + \underline{Z}_B \underline{Z}_C}; \\ I_c = I_C &= \frac{\underline{U}'_C (\underline{Z}_B + \underline{Z}_{b0}) - \underline{U}'_B \underline{Z}_{c0}}{\underline{Z}_B \underline{Z}_{c0} + \underline{Z}_C \underline{Z}_{b0} + \underline{Z}_B \underline{Z}_C}. \end{aligned} \quad (17)$$

Отключение (обрыв) нейтрали вторичной обмотки. В данном режиме токи и напряжения нулевой последовательности в трансформаторе будут отсутствовать, и анализ этого режима можно производить, не раскладывая токи и напряжения фаз на симметричные составляющие. При этом первичные фазные напряжения

$$\underline{U}_A = \underline{U}'_A; \quad \underline{U}_B = \underline{U}'_B; \quad \underline{U}_C = \underline{U}'_C$$

связаны с линейными напряжениями соотношениями (5).

При соединении обмоток по схеме Y/Y будут справедливы следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \underline{U}_a = \underline{U}'_a = \underline{U}_A - I_a \underline{Z}_k; \quad \underline{U}_b = \underline{U}'_b = \underline{U}_B - I_b \underline{Z}_k; \\ \underline{U}_c = \underline{U}'_c = \underline{U}_C - I_c \underline{Z}_k; \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} I_A = I'_A = I_a = I'_a; \quad I_B = I'_B = I_b = I'_b; \\ I_C = I'_C = I_c = I'_c. \end{aligned} \quad (19)$$

Составим уравнения для вторичной цепи (рис. 1) в соответствии с законами Кирхгофа:

$$\begin{aligned} U_a - U_b = I_a Z_a - I_b Z_b; \\ U_b - U_c = I_b Z_b - I_c Z_c; \\ I_a + I_b + I_c = 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Выразим вторичные фазные напряжения трансформатора через первичные (18). Тогда решение (20) относительно токов будет иметь следующий вид:

$$I_a = I_A = \frac{\Delta_{a1}}{\Delta_1}; \quad I_b = \frac{\Delta_{b1}}{\Delta_1}; \quad I_c = \frac{\Delta_{c1}}{\Delta_1}, \quad (21)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta_1 = Z_A Z_B + Z_A Z_C + Z_B Z_C; \\ \Delta_{a1} = U_A (Z_B + Z_C) - U_B Z_C - U_C Z_B; \\ \Delta_{b1} = U_B (Z_A + Z_C) - U_A Z_C - U_C Z_A; \\ \Delta_{c1} = U_C (Z_A + Z_B) - U_A Z_B - U_B Z_A; \\ Z_A = Z_a + Z_k; \quad Z_B = Z_b + Z_k; \quad Z_C = Z_c + Z_k. \end{aligned}$$

Выражения (21) позволяют определять фазные токи трансформатора при известных первичных фазных напряжениях треугольника. Поскольку в (21) не входит величина Z_{m0} , то эти выражения справедливы как для трехстержневых, так и для групповых и бронестержневых трансформаторов.

При отключении (обрыве) нейтрали звезды появляется напряжение смещения нейтрали U_n между вторичной обмоткой трансформатора и приемником:

$$U_n = \frac{\frac{U_a}{Z_a} + \frac{U_b}{Z_b} + \frac{U_c}{Z_c}}{\frac{1}{Z_a} + \frac{1}{Z_b} + \frac{1}{Z_c}}. \quad (22)$$

Результаты расчета несимметричных режимов трехфазного трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_0

Режим работы	Значение параметра										
	U_a	U_b	U_c	U_{a0}	I_A	I_B	I_C	I_a	I_b	I_c	I_n
Симметричный: $Z_a = Z_b = Z_c = 1,0$	0,998	0,998	0,998	0	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0
Несимметричный: $Z_a = 1,0; Z_b = 2Z_a; Z_c = 4Z_a$.											
1) Групповой трансформатор	0,653	1,129	1,316	0,382	0,655	0,561	0,331	0,653	0,565	0,329	0,011
2) Трехстержневой трансформатор	0,920	1,118	0,970	0,135	0,755	0,564	0,448	0,920	0,559	0,243	0,623
Несимметричный: $Z_a = 10,0; Z_b = 2Z_a; Z_c = 4Z_a$; трехстержневой трансформатор	0,995	1,013	0,992	0,014	0,079	0,058	0,044	0,100	0,051	0,025	0,066
Отключение фазы А при $Z_a = Z_b = Z_c = 1,0$	0	0,499	0,499	0	0	0,499	0,499	0	0,499	0,499	0
Отключение фазы А в случае группового трансформатора при несимметричной нагрузке: 1) $Z_a = 1,0; Z_b = 2Z_a; Z_c = 4Z_a$;	0,0011	0,333	0,666	0,111	0	0,167	0,167	0,0011	0,167	0,167	0,033
2) $Z_b = 100,0; Z_a = Z_c = 1,0$.	0,0033	0,990	0,012	0,327	0	0,010	0,010	0,0033	0,0099	0,012	0,0099
Отключение фазы А в случае трехстержневого трансформатора при несимметричной нагрузке: 1) $Z_a = 1,0; Z_b = 2Z_a; Z_c = 4Z_a$;	0,050	0,463	0,539	0,033	0	0,183	0,183	0,050	0,231	0,135	0,151
2) $Z_b = 100,0; Z_a = Z_c = 1,0$.	0,182	0,659	0,370	0,118	0	0,188	0,188	0,182	0,0066	0,370	0,547

При этом фазные напряжения приемника (нагрузки) могут быть определены по формулам

$$U_{aH} = U_a - U_n; \quad U_{bH} = U_b - U_n; \quad U_{cH} = U_c - U_n. \quad (23)$$

В качестве примера в таблице приведены результаты расчета [4] несимметричных режимов трехфазного трансформатора при схеме соединения обмоток Y/Y_0 , имеющего следующие параметры (о. е.): $Z_m = Z_{m0} = j100$, $Z_k = j0,065$ в случае группового или бронестержневого трансформатора; $Z_{m0} = 10Z_k = j0,65$ в случае трехстержневого трансформатора. Первичные линейные напряжения принимались симметричными: $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = \sqrt{3}$.

Список литературы

1. Петров Г.Н. Трансформаторы. – М.: ОНТИ, 1934.
2. Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. – Л.: Энергия, 1970.
3. Вольдек А.И. Электрические машины: Учебник для вузов. – Л.: Энергия, 1974.
4. Мартынов В.А. Расчет неполнофазных режимов работы трехфазных трансформаторов // Электричество. – 2003. – № 9. – С. 54–61; № 10. – С. 17–24.

Мартынов Владимир Александрович,
Ивановский государственный энергетический университет,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой теоретических основ электротехники и электротехнологии,
телефон (4932) 38-57-90,
e-mail: zav@toe.ispu.ru