

УДК 621.3

А.А. Кралин¹, В.В. Гуляев², В.В. Еременко¹**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ СО СХЕМОЙ СОЕДИНЕНИЯ Y/Y_0** ¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²Волжский государственный университет водного транспорта

Современные электротехнические системы характеризуются несимметрией напряжения. Несимметрия отрицательно сказывается на работе электрооборудования и может, в том числе, привести к выходу из строя или сокращению срока службы трансформаторного оборудования. Актуальной задачей является исследование процессов, происходящих в трансформаторах при несимметричной нагрузке. В статье рассмотрены несимметричные режимы работы трехфазного трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_0 . Представлены формулы, основанные на методе симметричных составляющих и позволяющие рассчитать несимметричные режимы работы трансформаторного оборудования при широком изменении параметров нагрузки. Проведенные расчеты показали, что при эксплуатации трансформаторов со схемой Y/Y_0 нарушение равенства фазных напряжений приводит к увеличению магнитного потока и перенасыщению одного из стержней. Из результатов расчета токов короткого замыкания установлено, что наибольшие значения имеют токи симметричного трехфазного короткого замыкания. Это необходимо учитывать при выборе устройств защиты трансформаторного оборудования.

Ключевые слова: метод симметричных составляющих, несимметричная нагрузка схемы замещения, несимметричный режим, трехфазный силовой трансформатор.

1. Введение

Совершенствование технологий регулирования параметров напряжения в трансформаторном оборудовании связано, в том числе, с использованием тиристорных переключающих устройств [1]. Переключение первичных обмоток с помощью полупроводниковых коммутаторов вызывает несимметрию напряжения, что может привести к выходу из строя или сокращению срока службы трансформаторного оборудования. Поэтому одной из актуальных задач является исследование несимметричных электромагнитных процессов со схемой соединения обмоток Y/Y_0 [2].

Трансформаторы желательно эксплуатировать при идеальной симметричной нагрузке [3, 4]. Однако, такая нагрузка в электрических системах практически не встречается, поскольку всегда имеются причины, вы-

зывающие несимметрию. Несимметрия возрастает с увеличением мощности однофазных потребителей, питающихся от трехфазных сетей, и получаются особенно большими в аварийных режимах [5]. Например, при двухфазных и однофазных коротких замыканиях, отключении одной из фаз линии передачи и т.п. Располагая математическим описанием процессов в трансформаторе при несимметричной нагрузке, можно дать оценку отклонений от симметрии, допустимым в эксплуатации [6]. Несимметричные явления в трансформаторах вызываются несимметрией нагрузки и несимметрией подведенных напряжений, что неблагоприятно сказывается на работе электропотребителей. Для самого трансформатора несимметричная работа может быть опасна в отношении перегрузки тиристорных ключей, отдельных обмоток, а также чрезмерных повышений фазных напряжений и насыщения магнитопровода трансформатора [7].

II. Материалы и методы

Трехфазные трансформаторы со схемами соединения обмоток Y/Y_0 обычно используются как трансформаторы понизительных подстанций небольшой мощности при питании трехфазных и однофазных потребителей и практически всегда работают с теми или иными режимами отклонениями от симметрии. Такая схема соединения обмоток применяется исключительно в трансформаторах с трехстержневым сердечником.

Метод симметричных составляющих является общим методом анализа несимметричных режимов. Согласно этому методу трехфазная несимметричная система напряжений разлагается на системы напряжений прямой, обратной и нулевой последовательности [8-10]. Главным достоинством данного подхода является возможность использования схем замещения приведенного трансформатора для токов различных последовательностей и проведение расчетов с помощью аналитических формул.

Для токов прямой и обратной последовательностей применяется обычная T-образная схема замещения трансформатора. Для токов нулевой последовательности схема замещения представлена на рис. 1.

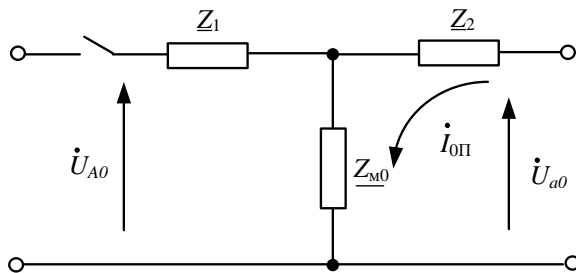


Рис. 1. Схема замещения трансформатора для токов нулевой последовательности

Сопротивления \underline{Z}_1 и \underline{Z}_2 определяются полями рассеяния, сопротивление \underline{Z}_{m0} определяется основным магнитным потоком и для трехстержневого трансформатора составляет приблизительно $10 \cdot \underline{Z}_k$ [11], где \underline{Z}_k – сопротивление короткого замыкания. Ток нулевой последовательности может протекать только во вторичной обмотке и является чисто намагничивающим [10]. В схеме замещения это учитывается тем, что в первичном контуре есть разрыв.

В обмотке, соединенной в звезду, линейные и фазные напряжения связаны соотношениями:

$$\dot{U}'_A = \frac{\dot{U}_{CA} - \dot{U}_{AB}}{3}; \quad (1)$$

$$\dot{U}'_B = \frac{\dot{U}_{AB} - \dot{U}_{BC}}{3}; \quad (2)$$

$$\dot{U}'_C = \frac{\dot{U}_{BC} - \dot{U}_{CA}}{3}. \quad (3)$$

В этих выражениях $\dot{U}'_A, \dot{U}'_B, \dot{U}'_C$ – фазные напряжения прямой и обратной последовательностей:

$$\dot{U}'_A = \dot{i}_A \cdot (\underline{Z}_a + \underline{Z}_k) - \dot{i}_{0П} \cdot (\underline{Z}_a + \underline{Z}_{0П}); \quad (4)$$

$$\dot{U}'_B = \dot{i}_B \cdot (\underline{Z}_b + \underline{Z}_k) - \dot{i}_{0П} \cdot (\underline{Z}_b + \underline{Z}_{0П}); \quad (5)$$

$$\dot{U}'_C = \dot{i}_C \cdot (\underline{Z}_c + \underline{Z}_k) - \dot{i}_{0П} \cdot (\underline{Z}_c + \underline{Z}_{0П}); \quad (6)$$

$$\dot{i}_A + \dot{i}_B + \dot{i}_C = 0, \quad (7)$$

где $\underline{Z}_a, \underline{Z}_b, \underline{Z}_c$ – сопротивления фаз нагрузки, \underline{Z}_k – сопротивление короткого замыкания, $\dot{i}_{0П}$ – ток нулевой последовательности, $\underline{Z}_{0П} = \underline{Z}_{m0} + \underline{Z}_2$ – сопротивление нулевой последовательности.

Введем следующие обозначения $\underline{Z}_{AK} = \underline{Z}_a + \underline{Z}_k$, $\underline{Z}_{BK} = \underline{Z}_b + \underline{Z}_k$, $\underline{Z}_{CK} = \underline{Z}_c + \underline{Z}_k$, $\underline{Z}_{a0} = \underline{Z}_a + \underline{Z}_{0П}$, $\underline{Z}_{b0} = \underline{Z}_b + \underline{Z}_{0П}$, $\underline{Z}_{c0} = \underline{Z}_c + \underline{Z}_{0П}$. Тогда в матричной форме записи главный определитель системы:

$$\Delta = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{AK} & 0 & 0 & -\underline{Z}_{a0} \\ 0 & \underline{Z}_{BK} & 0 & -\underline{Z}_{b0} \\ 0 & 0 & \underline{Z}_{CK} & -\underline{Z}_{c0} \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$\Delta = \underline{Z}_{AK} \cdot \underline{Z}_{BK} \cdot \underline{Z}_{c0} + \underline{Z}_{AK} \cdot \underline{Z}_{CK} \cdot \underline{Z}_{b0} + \underline{Z}_{BK} \cdot \underline{Z}_{CK} \cdot \underline{Z}_{a0}. \quad (9)$$

Решение системы (4-7) определит неизвестные токи. Определим ток нулевой последовательности:

$$i_{0п} = \frac{\Delta_{0п}}{\Delta}, \quad (10)$$

где $\Delta_{0п}$ – дополнительный определитель:

$$\Delta_{0п} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{AK} & 0 & 0 & \dot{U}'_A \\ 0 & \underline{Z}_{BK} & 0 & \dot{U}'_B \\ 0 & 0 & \underline{Z}_{CK} & \dot{U}'_C \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad (11)$$

$$\Delta_{0п} = -\dot{U}'_A \cdot \underline{Z}_{BK} \cdot \underline{Z}_{CK} - \dot{U}'_B \cdot \underline{Z}_{AK} \cdot \underline{Z}_{CK} - \dot{U}'_C \cdot \underline{Z}_{AK} \cdot \underline{Z}_{BK}. \quad (12)$$

Соответствующие фазные токи:

$$i_A = \frac{\dot{U}'_A - i_{0п} \cdot \underline{Z}_{a0}}{\underline{Z}_{AK}}; \quad (13)$$

$$i_B = \frac{\dot{U}'_B - i_{0п} \cdot \underline{Z}_{b0}}{\underline{Z}_{BK}}; \quad (14)$$

$$i_C = \frac{\dot{U}'_C - i_{0п} \cdot \underline{Z}_{c0}}{\underline{Z}_{CK}}. \quad (15)$$

Ниже представленные выражения позволяют рассчитать несимметричные режимы работы трансформаторного оборудования при широком изменении параметров нагрузки при симметричном и несимметричном приложенном напряжении.

$$\dot{U}'_a = \dot{U}'_A - i_A \cdot \underline{Z}_k + i_{0п} \cdot \underline{Z}_2; \quad (16)$$

$$\dot{U}'_b = \dot{U}'_B - i_B \cdot \underline{Z}_k + i_{0п} \cdot \underline{Z}_2; \quad (17)$$

$$\dot{U}'_c = \dot{U}'_C - i_C \cdot \underline{Z}_k + i_{0п} \cdot \underline{Z}_2. \quad (18)$$

III. Результаты исследования

Несимметрия напряжений в соответствии с ГОСТ на нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения характеризуется следующими показателями: коэффициентом несимметрии напряжений по обратной последовательности и коэффициентом несимметрии напряжений по нулевой последовательности. Нормально

допустимые и предельно допустимые значения данных коэффициентов равны 2,0 и 4,0 % соответственно.

Трехмерный график зависимости коэффициента несимметрии по нулевой последовательности, представленный на рис. 2, иллюстрирует режимы несимметричной работы трансформатора ТМ 400/10 в широком диапазоне изменении нагрузок

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 $2 \cdot Z_n$, что соответствует 50 % нагрузке.

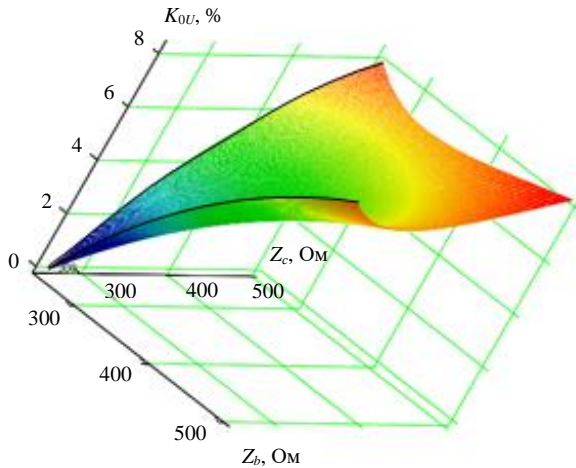


Рис. 2. Трехмерный график зависимость коэффициента несимметрии нулевой последовательности K_{0U} от сопротивлений фаз нагрузки

Из рис. 2 следует, что коэффициент несимметрии нулевой последовательности K_{0U} значительно возрастает при симметричном увеличении сопротивлений в фазах B и C .

В условиях эксплуатации трансформаторов со схемой Y/Y_0 при наличии токов нулевой последовательности нарушение равенства фазных напряжений вызывает увеличение магнитного потока и перенасыщение того стержня, в обмотках которого ЭДС основного поля и ЭДС нулевой последовательности наиболее близки друг к другу. Во избежание значительного неравенства фазных напряжений необходимо ограничивать нагрузку нулевого провода, не допуская значений выше 25 % номинального тока обмотки.

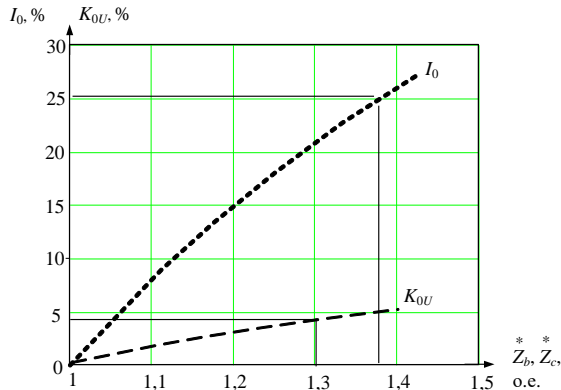


Рис.3. Кривые зависимости коэффициента несимметрии напряжения по нулевой последовательности K_{0U} и тока через нулевой провод I_0

IV. Заключение

В результате исследований установлено, что фазах B и C будет предельно допустимый коэффициент несимметрии нулевой последовательности $K_{0U} = 4\%$, при этом в фазе A нагрузка номинальная. Ток через нулевой провод достигает значения 25% от номинального фазного тока при нагрузках в фазах B и C составляющих 78% от номинальной, при этом в фазе A нагрузка номинальная.

В ходе расчетов определены токи короткого замыкания. Ток первичной обмотки поврежденной фазы A составляет $3,9 \cdot I_H$. Токи в фазах B и C равняются $1,36 \cdot I_H$ и $2,7 \cdot I_H$. При коротком замыкании в фазах A и B токи через тиристоры составят: в фазе $A - 16,67 \cdot I_H$, в фазе $B - 15,5 \cdot I_H$, в фазе $C - 1,67 \cdot I_H$. При симметричном трехфазном коротком замыкании токи во всех фазах составляют $18,2 \cdot I_H$. Следовательно, при выборе устройств защиты трансформаторного оборудования необходимо отстраиваться от симметричного трехфазного короткого замыкания, при котором токи имеют наибольшие значения.

© Кралин А.А., 2018

© Гуляев В.В., 2018

© Еременко В.В., 2018

Библиографический список

- [1] Соснина Е.Н., Лоскутов А.Б., Дмитриев С.М., Чивенков А.И., Лоскутов А.А. Опытная цифровая трансформаторная подстанция с активно-адаптивной системой управления и автоматическим плавным регулированием напряжения и мощности // Промышленная энергетика. 2013. № 12. С. 8-13.

- [2] Серебряков А.С., Осокин В.Л. Несимметричная нагрузка трехфазных трансформаторов при соединении обмоток по схеме $Y/Y - 0$ и $Y/Y_0 - 0$ // Вестник НГИЭИ. 2017. № 3 (70). С. 50-57.
- [3] Савельев А.А. Проблема несимметрии нагрузки в трехфазных распределительных электрических сетях 0,4 кВ и технические средства ее решения // Студенческая наука и XXI век. 2018. № 1 (16). С. 91-94.
- [4] Лизунов С.Д., Лоханин А.К. Силовые трансформаторы. Справочная книга. М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с.
- [5] Шелехина Л.Ю., Ахтырская А.Ю. Влияние несимметрии токов и напряжений на работу электрооборудования // Россия в XXI веке: факторы и механизмы устойчивого развития: труды международной научно-практической конференции. 2016. С. 25-28.
- [6] Кралин А.А., Гуляев В.В., Лапаев Д.Н. Моделирование режимов параллельной работы трехфазных распределительных трансформаторов // Актуальные проблемы электроэнергетики: сборник трудов научно-практической конференции. – Н. Новгород: НГТУ, 2014. С. 201-206.
- [7] Кралин А.А. Алтунин Б.Ю., Гуляев В.В. Исследование режимов работы нелинейного трехфазного трансформатора в пакете Simulink // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2012. Вып. 32.
- [8] Мартынов В.А. Расчет неполнофазных режимов работы трехфазных трансформаторов // Электричество. 2003. № 9. С. 54-61.
- [9] Мартынов В.А. Расчет неполнофазных режимов работы трехфазных трансформаторов // Электричество. 2003. № 10. С.17-24.
- [10] Алтунин Б.Ю., Кралин А.А., Карнавский И.А. Исследование несимметричных режимов работы трансформаторно-тиристорного регулятора напряжения и мощности // Промышленная энергетика. 2013. № 12. С. 13-16.
- [11] Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. Том 1. 2-е изд. М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 656 с.

A.A. Kralin¹, V.V. Gulyaev², V.V. Eremenko¹

INVESTIGATION OF ASYMMETRIC OPERATING MODES OF THREE-PHASE TRANSFORMERS WITH Y/Y₀ WINDING CONNECTION

¹ Nizhy Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev,

² Volga State University of Water Transport

Abstract. Modern electrical systems are characterized by voltage asymmetry. Asymmetry adversely affects the operation of electrical equipment, including can lead to failure or shorten the life of transformer equipment. Investigation of the processes occurring in transformers with an asymmetric load is an urgent task. The paper considers asymmetric operating modes of a three-phase transformer with a Y/Y_0 winding connection scheme. The formulas based on the method of symmetric components are presented.

Formulas allow one to calculate the asymmetric operating modes of transformer equipment with a wide variation in the load parameters. The performed calculations showed that a violation of the equality of phase voltages leads to an increase in the magnetic flux and supersaturation of one of the limbs in transformers with a Y/Y_0 connection. From the results of short-circuit currents calculation, it is established that the currents of a symmetrical three-phase short circuit have the greatest values. This must be taken into account when choosing transformer protection equipment.

Keywords: asymmetric mode, asymmetric load of the equivalent circuit, method of symmetric components, three-phase power transformer.

References

- [1] E.N. Sosnina, A.B. Loskutov, S.M. Dmitriev, A.I. Chivenkov and A.A. Loskutov. Experimental digital transformer substation with an actively adaptive control system and automatic smooth regulation of voltage and power // *Industrial Power Engineering*, no. 12, pp. 8-13, Dec. 2013.
- [2] A.S. Serebryakov and V.L. Osokin. Unbalanced load of three-phase transformers at connection of windings according to the scheme Y/Y_0 and Y/Y_0-0 // *Herald NGIEI*, no. 3 (70), pp. 50-57, March 2017.
- [3] A.A. Saveliev. The problem of load asymmetry in three-phase distribution electrical networks of 0,4 kV and technical means of its solution // *Student science and the XXI century*, no. 1 (16), pp. 91-94, 2018.
- [4] S.D. Lizunov and A.K. Lohanin, *Power transformers. The reference book*. Moscow: Energoizdat, 2004.
- [5] L.Yu. Shelekhina and A.Yu. Akhtyrskaya. Influence of unbalance of currents and voltages on the operation of electrical equipment // In proc. Intern. scient.-pract. conf. Russia in the XXI century: factors and mechanisms of sustainable development, 2016, pp. 25-28.
- [6] A.A. Kralin, V.V. Gulyaev and D.N. Lapaev. Simulation of modes of parallel operation of three-phase distribution transformers // in proc. All-Russian Conf. Actual problems of power engineering, 2014, pp. 201-206.
- [7] A.A. Kralin, B.Yu. Altunin and V.V. Gulyaev. Investigation of operating modes of a nonlinear three-phase transformer in the Simulink package // *Vestnik of the Volga State Academy of Water Transport*, vol. 32, 2012.
- [8] V.A. Martynov. Calculation of incomplete-phase operating conditions of three-phase transformers. Part I // *Electricity*, no. 9, pp. 54-61, Oct. 2003.
- [9] V.A. Martynov. Calculation of incomplete-phase operating conditions of three-phase transformers. Part II // *Electricity*, no. 10, pp. 17-24, Nov. 2003.
- [10] B.Yu. Altunin, A.A. Kralin and I.A. Karnavsky. Study of asymmetric operation modes of a transformer-thyristor voltage and power regulator // *Industrial Power Engineering*, no. 12, pp. 13-16, Dec. 2013.
- [11] A.V. Ivanov-Smolensky. *Electric cars. Volume 1: 2 ed.* Moscow: MPEI, 2004.