

ОПТИМАЛЬНОЕ СООТНОШЕНИЕ ЧИСЕЛ ВИТКОВ ПОЛУФАЗ ВТОРИЧНЫХ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА СО СХЕМОЙ ЗИГЗАГ С НУЛЕМ

А.В. Рудых, канд. техн. наук, доцент

Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского
(Россия, Иркутский р-он, п. Молодёжный)

DOI:10.24412/2500-1000-2022-3-2-148-151

Аннотация. Несимметрия напряжения возникает в сетях 0,38 кВ в следствии несимметрии нагрузок по фазам. Это сопровождается отрицательным воздействием на работу осветительных и силовых электроприемников. Устранить несимметрию фазных напряжений можно использованием схематических решений. В первую очередь применением в потребительских трансформаторах схем соединения «звезда – зигзаг» с нулем. Для этого необходимо определить оптимальное соотношение числа витков полуфаз вторичных обмоток трансформатора.

Ключевые слова: несимметрия напряжения, обмотки трансформатора, добавочные потери энергии.

В настоящее время эксплуатируется достаточно большое количество потребительских трансформаторных подстанций с соединением обмоток низшего напряжения по схеме зигзаг с нулем [2]. Трансформаторы с обмотками звезда-зигзаг с нулем обладают рядом эксплуатационных преимуществ по сравнению со схемами звезда-звезда с нулем [5]. Преимущества заключается в работе трансформаторов при несимметричных режимах работы, которые обусловлены особенностями технологических процессов, наличием мощных однофазных потребителей электроэнергии и их графиком работы и т.д. [1].

Устранить наличие тока нулевой последовательности и добавочных потерь, в режимах несимметрии нагрузок по фазам, можно применением схем звезда-зигзаг с нулем второй группы соединения обмоток [4, 5]. Это достигается за счет расщепления обмоток фаз, размещенных на различных стержнях сердечника. Однако следует отметить, что это сопровождается дополнительными расходами проводникового материала, электротехнической стали. На (рис.) представлена векторная диаграмма фазных напряжений обмотки зигзаг при различных группах соединения.

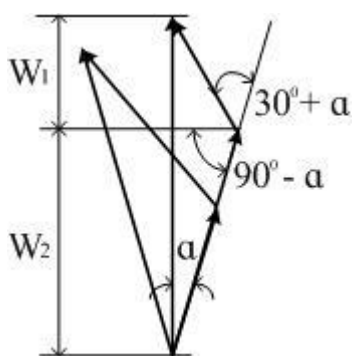


Рисунок. Векторная диаграмма фазных напряжений

Аналитические выражения дополнительного числа витков обмотки зигзаг (рис. 1):

$$\Delta W = W_z - W_y = \frac{W_1}{\sin(30 + \alpha)} + \frac{W_2}{\sin(90 - \alpha)} - W_y, \quad (1)$$

где $\frac{W_1}{\sin(30 + \alpha)}$; $\frac{W_2}{\sin(90 - \alpha)}$ - число витков обмоток полуфаз схемы зигзаг.

Анализируя выражение (1) можно сделать вывод, что наибольшая кратность расхода проводникового материала схемы зигзаг по сравнению со схемой звезда, равна $\frac{2}{\sqrt{3}}$, имеет место при $\alpha = 30^\circ$, что соответствует 11 группе соединения обмоток. Также следует отметить, что вместе с увеличением числа витков вторичной об-

мотки и диаметра катушек, в трансформаторах одинаковой мощности со схемой соединения звезда-зигзаг с нулем, увеличиваются габариты выемной части трансформатора. Это связано с удлинением ярмовой части сердечника [1].

Дополнительные затраты при переходе со схемы звезда-звезда с нулем на схему звезда-зигзаг с нулем:

$$A = F_0 n_0 + F_y n_c + \Delta R n_s \sum_{I_{\min}}^{I_{\max}} I^2 T_s, \quad (2)$$

где F_0 – масса дополнительного материала оболочки;

F_y – масса дополнительного материала ярма;

ΔR – активное сопротивление дополнительной части обмотки зигзаг;

I – ток нагрузки;

T_s – время работы трансформатора на каждом режиме нагрузки;

n_0, n_c, n_s – стоимость обмотки, электротехнической стали и электроэнергии.

Как следует из выражений (1 и 2), дополнительные затраты на обмотку зигзаг зависят от группы соединения обмоток. Для схемы соединения звезда-зигзаг с нулем изменение числа витков расщепленных обмоток сопровождается полной ком-

пенсацией магнитного потока нулевой последовательности основной частоты.

Разность числа витков приведенной первичной и основной из полуфаз вторичной обмотки зигзаг, создающих магнитный поток нулевой последовательности:

$$\Delta W' = \frac{2}{\sqrt{3}} W'_y - W_{az} \frac{\cos(90 - \alpha)}{\cos(30 + \alpha)}, \quad (3)$$

где W_{az} – доля витков обмотки зигзаг, размещенных на стержне фазы А.

В зависимости от группы соединения обмоток, индуктивное сопротивление ну-

левой последовательности трансформатора с соединением обмоток по схеме звезда-зигзаг с нулем:

$$X_0 = \frac{\mu_{\text{обр}} \xi \left[\frac{2}{\sqrt{3}} W'_y - W_{az} \frac{\cos(90 - \alpha)}{\cos(30 + \alpha)} \right]^2 Q_c}{H_c}, \quad (4)$$

где $\mu_{\text{обр}}$ – абсолютная обратная магнитная проницаемость;

ξ – эмпирический коэффициент влияния бака, для потребительских трансформаторов равен 1,1...0,8;

Q_c – сечение стержня сердечника;

H_c – высота сердечника.

Для $\alpha = 30^\circ$ разность ампер-витков первичной и вторичной обмоток равна нулю, в следствии чего в режимах несимметрии токов в фазах магнитное поле незначительно и сосредоточено в пределах обмоток.

Добавочные потери в элементах цепи нулевой последовательности трансформатора пропорциональны квадрату индуктивной составляющей полного сопротив-

ления нулевой последовательности. Дополнительные токовые потери в обмотке зигзаг и эквивалент добавочных затрат на обмотку зигзага и сердечника трансформатора пропорциональны разности числа витков первичной и вторичной обмоток в первой степени. Доля дополнительных потерь в трансформаторах с соединением обмоток по схеме звезда-зигзаг с нулем:

$$\frac{d\Delta p}{d(\Delta W')} = C_1 (\Delta W')^4 - (C_2 + C_3 + C_4) \Delta W', \quad (5)$$

где C_1 – коэффициент пропорциональности добавочных потерь в трансформаторе от магнитного поля нулевой последовательности основной частоты;

C_2, C_3, C_4 – видоизмененные коэффициенты пропорциональности выражения (2).

Решение дифференциального уравнения (5):

$$\Delta W' = \sqrt[3]{\frac{C_2 + C_3 + C_4}{C_1}}. \quad (6)$$

Оптимальная разность витков приведенной первичной (звезда) и полуфазы вторичной (зигзаг) обмоток, при которой дополнительные потери в трансформаторе и добавочные затраты имеют минимальное значение:

$$\Delta W' = \sqrt{\frac{F_0 n_0 + F_\alpha n_c + \Delta R n_\alpha \sum_{I_{\min}}^{I_{\max}} I^2 T_\alpha}{R_0 n_\alpha \sum_{I_{\min}}^{I_{\max}} I_0^2 T_\alpha}}. \quad (7)$$

Выражения (7) говорит о том, что выбор схем соединения обмоток потребительских трансформаторов зависит от уровней несимметрии токов и напряжений. В результате вычислений установлено оптимальное соотношение витков полуфаз при несимметрии токов, которые соответствуют группам соединений 11⁰15' - 11⁰45'.

Предложенная методика позволяет определить оптимальную группу соединения обмоток трансформатора с минимальными дополнительными затратами и потерей электроэнергии. Одиннадцатая группа соединения обмоток, в общем случае, не является экономически выгодной по сравнению с дробными группами.

Библиографический список

1. Prodan C., Poienar N., Ungureanu C. and Cernomazu D. Conclusions about the study of the special connections at the three-phase transformers // *International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering*, 2012, pp. 468-471, doi: 10.1109/ICEPE.2012.6463887.

2. Hurng-Liahng Jou, Jinn-Chang Wu, Kuen-Der Wu, Wen-Jung Chiang and Yi-Hsun Chen. Analysis of zig-zag transformer applying in the three-phase four-wire distribution power system

// *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1168-1173, April 2005, doi: 10.1109/TPWRD.2005.844281.

3. Khatsevskiy K.V., Antonov A.I., Gonenko T.V. and Khatsevskiy V.F. The voltage asymmetry in electrical networks with single-phase load // *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*, 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/Dynamics.2017.8239461.

4. Peng Xiao, D. C. Yu and Wei Yan. A unified three-phase transformer model for distribution load flow calculations // *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, №1, pp. 153-159, Feb. 2006, doi: 10.1109/TPWRS.2005.857847.

5. Liang X., Jackson W. and Laughy R. Transformer Winding Connections for Practical Industrial Applications // *IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference*, 2007, pp. 1-9, doi: 10.1109/PCICON.2007.4365778.

THE OPTIMAL RATIO OF THE NUMBER OF TURNS OF THE SEMI-PHASES OF THE SECONDARY WINDINGS OF A TRANSFORMER WITH A ZIGZAG CIRCUIT WITH ZERO

A.V. Rudykh, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor*
Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Yezhevsky
(Russia, Irkutsk district, Molodyozhny village)

Abstract. *Voltage asymmetry occurs in 0.38 kV networks as a result of phase load asymmetry. This is accompanied by a negative impact on the operation of lighting and power receivers. Phase voltage asymmetry can be eliminated by using schematic solutions. First of all, the use of "star – zigzag" connection schemes with zero in consumer transformers. To do this, it is necessary to determine the optimal ratio of the number of turns of the semi-phases of the secondary windings of the transformer.*

Keywords: *voltage asymmetry, transformer windings, additional energy losses.*