

УДК 621.313

<https://doi.org/10.56619/2078-7138-2023-159-5-32-37>

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРА СО СХЕМОЙ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК «ЗВЕЗДА-ТРЕУГОЛЬНИК С ЗИГЗАГОМ» ПРИ НЕЛИНЕЙНОМ ХАРАКТЕРЕ НАГРУЗКИ

В.М. Збродыга,

доцент каф. электроснабжения и электротехники БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

М.А. Прищепов,

зав. каф. электроснабжения сельскохозяйственных предприятий БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

А.И. Зеленкевич,

и.о. зав. каф. электроснабжения и электротехники БГАТУ, канд. техн. наук

И.В. Протосовицкий,

декан агроэнергетического факультета БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

Н.Е. Шевчик,

зам. директора РНПТУП «Институт энергетики НАН Беларуси», канд. техн. наук, доцент

В статье рассмотрены особенности работы трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом» при нелинейном характере нагрузки, в том числе принцип компенсации высших гармоник, кратных трем.

Ключевые слова: трансформатор, высшие гармоники токов и напряжений, магнитодвижущая сила, магнитный поток.

Specific features of transformer operation with the winding connection scheme "star-delta with zigzag" at nonlinear character of load, including the principle of compensation of ultra-harmonics multiple of three, are considered in the article.

Key words: transformer, ultra-harmonics of current and voltage, magnetomotive force, magnetic flux.

Введение

В системах электроснабжения, наряду с их основной функцией, имеет место генерирование, распространение и воздействие высших гармоник токов и напряжений на электроприемники. Высшие гармоники снижают эффективность процессов генерации, передачи и использования электроэнергии. Уменьшение уровней высших гармоник можно обеспечить рациональным построением схемы электрической сети и применением специальных корректирующих устройств: линейных дросселей, пассивных и активных фильтров высших гармоник, питающих трансформаторов со специальными схемами соединения обмоток. В сельских электроустановках для этой цели авторы рассматривают возможность использования трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом» (рис. 1), которые могут применяться для питания выпрямительных схем, полупро-

водниковых преобразователей и других специальных потребителей [1-10].

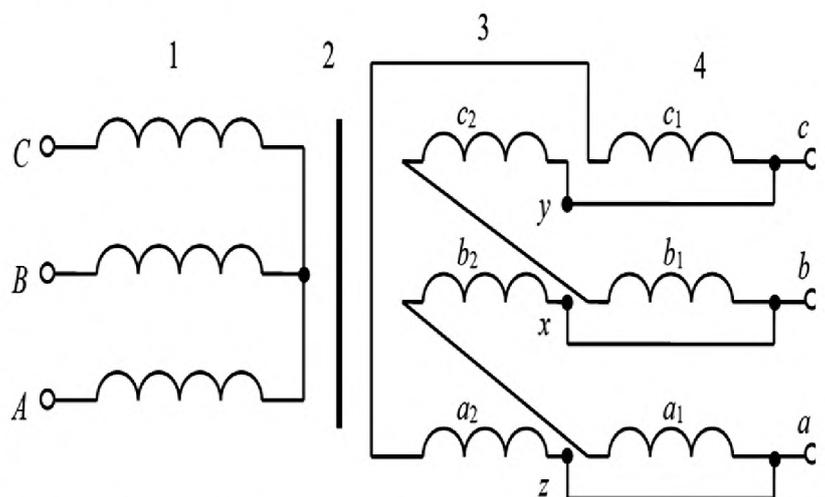


Рисунок 1. Схема соединения обмоток трехфазного трансформатора «звезда-треугольник с зигзагом»: 1 – обмотки высшего напряжения; 2 – магнитопровод; 3-4 – половины фазных обмоток низшего напряжения

Основная часть

При работе трансформатора «звезда-треугольник с зигзагом» на нелинейную нагрузку фазные напряжения его первичной обмотки могут содержать гармоники прямой (первая, четвертая, седьмая и т. д.), обратной (вторая, пятая, восьмая и т. д.) и нулевой (третья и кратные трем) последовательностей:

$$\begin{aligned} u_A &= \sum U_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ &+ \sum U_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\ &+ \sum U_{mA(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}]; \\ u_B &= \sum U_{mB(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)}] + \\ &+ \sum U_{mB(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)}] + \\ &+ \sum U_{mB(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}]; \\ u_C &= \sum U_{mC(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)}] + \\ &+ \sum U_{mC(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)}] + \\ &+ \sum U_{mC(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}], \end{aligned} \quad (1)$$

где $U_{mA(3n+e)}, U_{mB(3n+e)}, U_{mC(3n+e)}$ – амплитудные значения гармоник напряжений фаз «А», «В», «С» первичной обмотки соответственно, В;

ω_1 – угловая частота основной гармоники, рад/с;

φ – угол смещения гармоники по отношению к началу отсчета, рад;

$n = 0, 1, 2, 3, \dots$;

e – индекс принадлежности гармоники к определенной последовательности (1 – прямая, 2 – обратная, 3 – нулевая).

Токи третьей и кратных трем гармоник в первичной обмотке, соединенной в звезду без нулевого провода, отсутствуют. Фазные токи равны сумме основных гармоник и высших гармонических составляющих прямой и обратной последовательности:

$$\begin{aligned} i_A &= \sum I_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \sum I_{mA(3n+2)} \times \\ &\times \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}]; \\ i_B &= \sum I_{mB(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)}] + \\ &+ \sum I_{mB(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)}]; \\ i_C &= \sum I_{mC(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)}] + \\ &+ \sum I_{mC(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)}], \end{aligned} \quad (2)$$

где $I_{mA(3n+e)}, I_{mB(3n+e)}, I_{mC(3n+e)}$ – амплитуды гармоник токов фаз «А», «В», «С» первичной обмотки соответственно, А.

Токи трех фаз каждой из этих гармоник создают симметричную трехфазную систему. Они протекают по первичным фазным обмоткам, замыкаясь через источник питания, а их сумма в нейтральной точке первичной стороны равна нулю.

Фазные напряжения вторичной обмотки трансформатора могут содержать гармоники всех последовательностей:

$$\begin{aligned} u_a &= \sum U_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ &+ \sum U_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\ &+ \sum U_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}]; \\ u_b &= \sum U_{mb(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)}] + \\ &+ \sum U_{mb(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)}] + \\ &+ \sum U_{mb(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}]; \\ u_c &= \sum U_{mc(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)}] + \\ &+ \sum U_{mc(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)}] + \\ &+ \sum U_{mc(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}], \end{aligned} \quad (3)$$

где $U_{ma(3n+e)}, U_{mb(3n+e)}, U_{mc(3n+e)}$ – амплитудные значения гармоник напряжений фаз «а», «b», «с» вторичной обмотки соответственно, В.

Фазные токи вторичной обмотки могут содержать гармоники всех последовательностей, включая третью и кратные трем:

$$\begin{aligned} i_a &= \sum I_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ &+ \sum I_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\ &+ \sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}]; \\ i_b &= \sum I_{mb(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)}] + \\ &+ \sum I_{mb(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)}] + \\ &+ \sum I_{mb(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}]; \\ i_c &= \sum I_{mc(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)}] + \\ &+ \sum I_{mc(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)}] + \\ &+ \sum I_{mc(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}], \end{aligned} \quad (4)$$

где $I_{ma(3n+e)}, I_{mb(3n+e)}, I_{mc(3n+e)}$ – амплитуды гармоник токов фаз «а», «b», «с» вторичной обмотки соответственно, А.

Первые и все высшие гармоники токов трех фаз вторичной обмотки прямой и обратной последовательностей образуют симметричную трехфазную систему. Они протекают по вторичным фазным обмоткам, замыкаясь через нагрузку, а их сумма равна нулю. Фазные токи третьей и кратных трем гармоник могут протекать по вторичным фазным обмоткам внутри треугольника, минуя нагрузку (рис. 2). Они равны и одинаково направлены во всех трех фазах в любой момент времени.

На основании второго закона Кирхгофа напряжение фазы «А» первичной обмотки:

$$\begin{aligned}
 u_A = & -\sum E_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] - \\
 & -\sum E_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] - \\
 & -\sum E_{mA(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] + \\
 & +\sum I_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot Z_{1(3n+1)} + \\
 & +\sum I_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot Z_{1(3n+2)},
 \end{aligned} \quad (5)$$

где $E_{mA(3n+1)}, E_{mA(3n+2)}, E_{mA(3n+3)}$ – амплитудные значения ЭДС высших гармоник, соответственно прямой, обратной и нулевой последовательности фазы «А» первичной обмотки, В;

$Z_{1(3n+1)}, Z_{1(3n+2)}$ – полные сопротивления фаз первичной обмотки токам высших гармоник прямой последовательности и обратной последовательности соответственно, Ом.

С учетом выражений (1) и (5) сумма высших гармоник прямой и обратной последовательностей напряжения фазы «А» первичной стороны:

$$\begin{aligned}
 & \sum U_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\
 & +\sum U_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] = \\
 & = -\sum E_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] - \\
 & -\sum E_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\
 & +\sum I_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot Z_{1(3n+1)} + \\
 & +\sum I_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot Z_{1(3n+2)}. \quad (6)
 \end{aligned}$$

Для третьей и кратных трем высших гармоник напряжения:

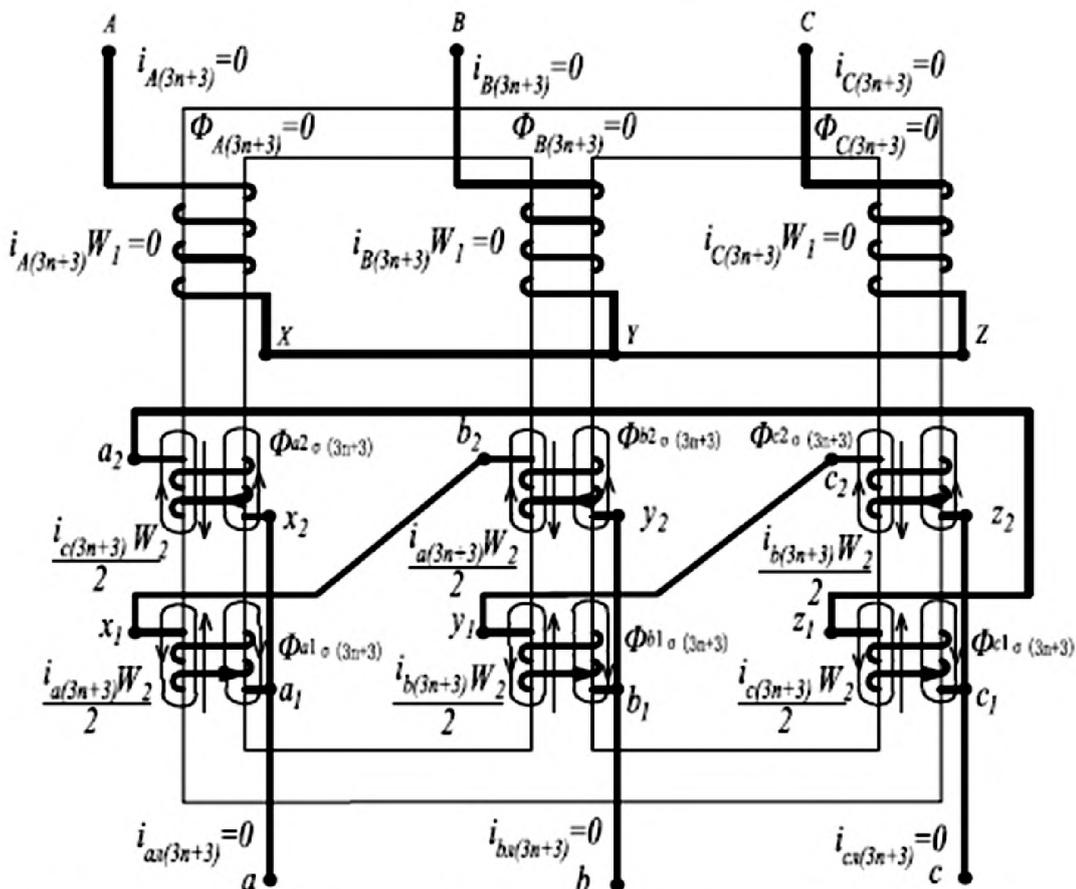


Рисунок 2. Схема распределения магнитодвижущих сил (МДС) и магнитных потоков высших гармоник, кратных трем, в трехфазном трансформаторе «звезда-треугольник с зигзагом»

$$\begin{aligned} & \sum U_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = \\ & = -\sum E_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}]. \end{aligned} \quad (7)$$

Напряжение фазы «а» вторичной обмотки:

$$\begin{aligned} u_a = & \sum E_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum E_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\ & + \sum E_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] - \\ & - \sum I_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot Z_{2-3(3n+1)} - \\ & - \sum I_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot Z_{2-3(3n+2)} - \\ & - \sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot Z_{2-3(3n+3)}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $E_{ma(3n+1)}$, $E_{ma(3n+2)}$, $E_{ma(3n+3)}$ – амплитудные значения ЭДС высших гармоник прямой, обратной и нулевой последовательности фазы «а» вторичной обмотки, В;

$Z_{2-3(3n+1)}$, $Z_{2-3(3n+2)}$, $Z_{2-3(3n+3)}$ – полные сопротивления фаз вторичной обмотки токам высших гармоник прямой, обратной и нулевой последовательности соответственно, Ом.

$$\begin{aligned} Z_{2-3(3n+1)} &= Z_{2(3n+1)} + Z_{3(3n+1)}; \\ Z_{2-3(3n+2)} &= Z_{2(3n+2)} + Z_{3(3n+2)}; \\ Z_{2-3(3n+3)} &= Z_{2(3n+3)} + Z_{3(3n+3)}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $Z_{2(3n+1)}$, $Z_{2(3n+2)}$, $Z_{2(3n+3)}$ – полные сопротивления половин a_1 , b_1 , c_1 вторичных фазных обмоток токам высших гармоник, соответственно прямой, обратной и нулевой последовательности, Ом;

$Z_{3(3n+1)}$, $Z_{3(3n+2)}$, $Z_{3(3n+3)}$ – полные сопротивления половин a_2 , b_2 , c_2 вторичных фазных обмоток токам высших гармоник, соответственно прямой, обратной и нулевой последовательности, Ом.

На основании выражений (3) и (8) сумма высших гармоник прямой и обратной последовательности напряжения фазы «а» вторичной стороны:

$$\begin{aligned} & \sum U_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum U_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] = \\ & = \sum E_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum E_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] - \\ & - \sum I_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot Z_{2-3(3n+1)} - \\ & - \sum I_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot Z_{2-3(3n+2)}. \end{aligned} \quad (10)$$

Для третьей и кратных трех высших гармоник фазы «а» вторичной стороны:

$$\begin{aligned} & \sum U_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = \\ & = \sum E_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] - \\ & - \sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot Z_{2-3(3n+3)}. \end{aligned} \quad (11)$$

Так как фазные токи кратных трех высших гармоник первичной обмотки $i_{A(3n+3)}$, $i_{B(3n+3)}$, $i_{C(3n+3)}$ равны нулю, то создаваемые ими МДС также равны нулю (рис. 2):

$$\begin{aligned} i_{A(3n+3)} W_1 &= 0; \\ i_{B(3n+3)} W_1 &= 0; \\ i_{C(3n+3)} W_1 &= 0, \end{aligned} \quad (12)$$

где W_1 – количество витков в одной фазе первичной обмотки, шт.

Токи кратных трех гармоник равны по величине и имеют одинаковое направление во всех трех фазах вторичной обмотки в любой момент времени (рис. 2):

$$i_{a(3n+3)} = i_{b(3n+3)} = i_{c(3n+3)}. \quad (13)$$

Протекая по вторичным фазным обмоткам, они создают соответствующие МДС. С учетом выражения (17) МДС половин обмоток a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , c_1 , c_2 равны между собой по величине:

$$i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{2} = i_{b(3n+3)} \frac{W_2}{2} = i_{c(3n+3)} \frac{W_2}{2}, \quad (14)$$

где W_2 – количество витков в одной фазе вторичной обмотки, шт.

С учетом направления намотки и маркировки выводов токи гармоник нулевой последовательности обтекают половины фаз вторичных обмоток a_1 , b_1 , c_1 и a_2 , b_2 , c_2 , расположенных на каждом из стержней магнитопровода, в противоположных направлениях (рис. 2).

Учитывая выражения (13) и (14), МДС гармоник нулевой последовательности в стержнях фаз «А», «В», «С» будут равны:

$$\begin{aligned} f_{A(3n+3)} &= i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{2} - i_{c(3n+3)} \frac{W_2}{2} = \\ & = i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{2} - i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{2} = 0; \\ f_{B(3n+3)} &= i_{b(3n+3)} \frac{W_2}{2} - i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{2} = \\ & = i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{2} - i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{2} = 0; \\ f_{C(3n+3)} &= i_{c(3n+3)} \frac{W_2}{2} - i_{b(3n+3)} \frac{W_2}{2} = \end{aligned}$$

$$= i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{2} - i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{2} = 0. \quad (15)$$

Происходит компенсация МДС гармоник нулевой последовательности, а их магнитные потоки в стержнях магнитопровода будут равны нулю:

$$\begin{aligned} \Phi_{A(3n+3)} &= \frac{f_{A(3n+3)}}{R_{A\mu(3n+3)}} = 0; \Phi_{B(3n+3)} = \\ &= \frac{f_{B(3n+3)}}{R_{B\mu(3n+3)}} = 0; \Phi_{C(3n+3)} = \frac{f_{C(3n+3)}}{R_{C\mu(3n+3)}} = 0, \quad (16) \end{aligned}$$

где $R_{A\mu(3n+3)}$, $R_{B\mu(3n+3)}$, $R_{C\mu(3n+3)}$ – сопротивления магнитных цепей соответствующих фаз потоков высших гармоник нулевой последовательности, Гн⁻¹.

Вторичная обмотка самостоятельно уравнивает свои намагничивающие силы гармоник нулевой последовательности, устраняя процесс дополнительного подмагничивания ими магнитопровода, что уменьшает магнитные потери в трансформаторе и повышает его КПД.

Токи гармоник нулевой последовательности вторичной обмотки могут создавать только потоки рассеяния $\Phi_{a1\sigma(3n+3)}$, $\Phi_{a2\sigma(3n+3)}$, $\Phi_{b1\sigma(3n+3)}$, $\Phi_{b2\sigma(3n+3)}$, $\Phi_{c1\sigma(3n+3)}$, $\Phi_{c2\sigma(3n+3)}$ (рис. 2). Причем поля рассеяния будут тем меньше, чем ближе расположены друг к другу части обмотки.

Так как магнитные потоки гармоник нулевой последовательности в стержнях равны нулю, то и ЭДС, создаваемые ими в обмотках, также будут равны нулю:

$$\begin{aligned} e_{A(3n+3)} &= -W_1 \frac{d\Phi_{A(3n+3)}}{dt} = 0; \\ e_{B(3n+3)} &= -W_1 \frac{d\Phi_{B(3n+3)}}{dt} = 0; \\ e_{C(3n+3)} &= -W_1 \frac{d\Phi_{C(3n+3)}}{dt} = 0; \\ e_{a(3n+3)} &= -W_2 \frac{d\Phi_{A(3n+3)}}{dt} = 0; \\ e_{b(3n+3)} &= -W_2 \frac{d\Phi_{B(3n+3)}}{dt} = 0; \\ e_{c(3n+3)} &= -W_2 \frac{d\Phi_{C(3n+3)}}{dt} = 0. \quad (17) \end{aligned}$$

Следовательно, трансформатор не будет генерировать высшие гармоники напряжений нулевой последовательности, обусловленные нелинейной нагрузкой, в питающую сеть, так как

$$\begin{aligned} \sum U_{mA(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] &= \\ = -\sum E_{mA(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] &= 0; \\ \sum U_{mB(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] &= \\ = -\sum E_{mB(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] &= 0; \\ \sum U_{mC(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] &= \\ = -\sum E_{mC(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] &= 0. \quad (18) \end{aligned}$$

Фазные напряжения первичной обмотки будут содержать только гармоники прямой и обратной последовательности:

$$\begin{aligned} u_A &= \sum U_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ &+ \sum U_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] = \\ &= -\sum E_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] - \\ &- \sum E_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\ &+ \sum I_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot Z_{1(3n+1)} + \\ &+ \sum I_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot Z_{1(3n+2)}. \quad (19) \end{aligned}$$

Для фаз «В», «С» соотношения аналогичные.

Для вторичных фазных обмоток:

$$\begin{aligned} \sum E_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] &= 0; \\ \sum E_{mb(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] &= 0; \\ \sum E_{mc(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] &= 0. \quad (20) \end{aligned}$$

Высшие гармоники напряжений нулевой последовательности вторичной обмотки будут вызваны только падениями напряжений от соответствующих токов на сопротивлениях фаз:

$$\begin{aligned} \sum U_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] &= \\ = -\sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot Z_{2-3(3n+3)}; \\ \sum U_{mb(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] &= \\ = -\sum I_{mb(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot Z_{2-3(3n+3)}; \\ \sum U_{mc(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] &= \\ = -\sum I_{mc(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot Z_{2-3(3n+3)}. \quad (21) \end{aligned}$$

Для фаз «В», «С» соотношения аналогичные.

Заключение

1. Искажение синусоидальности напряжений трансформатора обусловлено высшими гармониками прямой и обратной последовательности, которые трансформируются с первичной на вторичную сторону и наоборот, а также падениями напряжений от токов высших гармоник прямой и обратной последовательности на сопротивлениях обмоток.

2. Улучшение формы кривой напряжения происходит вследствие компенсации кратных трем высших гармоник, а их остаточные значения обусловлены падениями напряжений от соответствующих токов на активных сопротивлениях фаз вторичной обмотки. Трансформатор не будет генерировать высшие гармоники напряжений нулевой последовательности, обусловленные нелинейной нагрузкой, в питающую сеть.

3. Вторичная обмотка самостоятельно уравнивает свои намагничивающие силы гармоник нулевой последовательности, устраняя процесс дополнительного подмагничивания ими магнитопровода, что уменьшает магнитные потери в трансформаторе и повышает его КПД. При этом магнитная система трансформатора уравновешена относительно всех гармоник.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Трехфазный трансформатор: пат. 2244 Респ. Беларусь / А.П. Сердешнов, Г.И. Янукович, Е.А. Сердешнов, Д.Г. Янукович; заявитель Белор. гос. аграр. техн. ун-т. – № 950299; заявл. 06.09.95; опубл. 30.09.98 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 1998. – № 3 (18). – С. 216-217.

2. Збродыга, В.М. Улучшение показателей несинусоидальности и несимметрии напряжений в электроустановках сельскохозяйственного назначения применением трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом»: автореф. ...дис. канд. техн. наук: 05.20.02 / В.М. Збродыга; Белор. гос. аграр. техн. ун-т. – Минск, 2010. – 20 с.

3. Збродыга, В.М. Особенности преобразования электрической энергии в трансформаторе со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом» / В.М. Збродыга, М.А. Прищепов, А.И. Зеленкевич, Г.И. Янукович // Агропанорама. – 2022. – № 5. – С. 25-33.

4. Прищепов, М.А. Методика расчета конструктивных параметров трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом» / М.А. Прищепов, В.М. Збродыга, Г.И. Янукович // Агропанорама. – 2010. – № 5. – С. 29-33.

5. Прищепов, М.А. Техничко-экономическая оптимизация параметров трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом» / М.А. Прищепов, В.М. Збродыга, Г.И. Янукович // Агропанорама. – 2010. – № 6. – С. 24-30.

6. Збродыга, В.М. К вопросу повышения качества электроэнергии / В.М. Збродыга, Г.И. Янукович, А.П. Сердешнов // Агропанорама. – 2006. – № 2. – С. 9-12.

7. Янукович, Г.И. Трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Δ с зигзагом / Г.И. Янукович, В.М. Збродыга, Н.Г. Королевич // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: материалы 8-й Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 16-17 мая 2012 г.: в 5 ч. / ГНУ ВИЭСХ; редкол. А.А. Артюшин [и др.]. – Москва, 2012. – Ч. 1. – С. 141-145.

8. Збродыга, В.М. Анализ работы трансформатора Y/Δ с зигзагом при нелинейном характере нагрузки / В.М. Збродыга // Агропанорама. – 2005. – № 6. – С. 10-14.

9. Янукович, Г.И. Трансформатор Y/Δ с зигзагом как источник питания нелинейных электроприемников / Г.И. Янукович, В.М. Збродыга, А.П. Сердешнов // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: материалы 5-й Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 16-17 мая 2006 г.: в 5 ч. / ГНУ ВИЭСХ; редкол. А.А. Артюшин [и др.]. – Москва, 2006. – Ч. 1. – С. 274-277.

10. Янукович, Г.И. О возможности применения трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом» для повышения качества напряжения / Г.И. Янукович, В.М. Збродыга, Н.Г. Королевич, М.П. Збродыга // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 23-24 октября 2014 г. / Белор. гос. аграр. техн. ун-т; редкол. И.Н. Шило [и др.]. – Минск, 2014. – С. 183-184.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 27.09.2023