

УДК 621.313

ОСОБЕННОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТРАНСФОРМАТОРЕ СО СХемой СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК «ЗВЕЗДА-ТРЕУГОЛЬНИК С ЗИГЗАГОМ»

В.М. Збродыга,

зав. каф. электроснабжения БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

М.А. Прищепов,

зав. каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ, докт. техн. наук, доцент

А.И. Зеленкевич,

ст. преподаватель каф. электроснабжения БГАТУ

Г.И. Янукович,

канд. техн. наук, профессор

В статье рассмотрено устройство и процессы преобразования электрической энергии в трансформаторе со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом».

Ключевые слова: трехфазный трансформатор, качество напряжения, несимметрия напряжения, несинусоидальность напряжения.

The article deals with the processes of electric energy transformation in a transformer with the connection scheme of windings "star-triangle with zigzag".

Key words: three-phase transformer, voltage quality, voltage asymmetry, nonsinusoidal voltage.

Введение

Система электроснабжения является электромагнитной средой, в которой, наряду с их основной функцией, имеет место генерирование, распространение и воздействие электромагнитных помех на электроприемники. Возникает задача их электромагнитной совместимости – способности электрооборудования, аппаратов и приборов нормально функционировать в электромагнитной среде, не создавая недопустимых помех для другого оборудования. Проблема качества электроэнергии является одной из важнейших составных частей общей проблемы электромагнитной совместимости. Снижение качества электроэнергии отрицательно влияет на эффективность работы всех элементов систем электроснабжения. Наибольшие проблемы, в том числе и по требуемым материальным затратам, возникают с такими характеристиками качества электроэнергии, как несимметрия и несинусоидальность напряжения.

При решении задачи улучшения показателей несимметрии и несинусоидальности напряжений необходимо исходить из сопоставления ожидаемого эффекта от намеченных мероприятий и неизбежных при этом дополнительных затрат. С учетом особенностей электропотребления и использования электрооборудования в сельском хозяйстве для решения этой задачи в сельскохозяйственных электроустановках

предложено использовать специальные трансформаторы со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом» (Y/Δ с зигзагом), которые могут применяться для питания выпрямительных схем, полупроводниковых преобразователей и других специальных потребителей [1-6]. Предлагаемый трансформатор устойчив к искажающим воздействиям со стороны нагрузки и способен обеспечить высокий уровень качества напряжения [7-10].

Цель данной работы – рассмотреть устройство и процессы преобразования электрической энергии в трансформаторе со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом»

Основная часть

Трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом» состоит из системы обмоток с изоляцией и плоской несимметричной трехстержневой магнитной системы (рис. 1). Обмотки высшего напряжения 1 расположены на стержнях магнитопровода 2 и соединены по схеме «звезда». Фазные обмотки низшего напряжения состоят из двух одинаковых половин 3-4, размещенных на разных стержнях и соединенных последовательно. Причем, одна из половин вторичной фазной обмотки располагается на том же стержне магнитопровода, что и первичная обмотка этой же фазы, а вторая половина — на другом стержне.

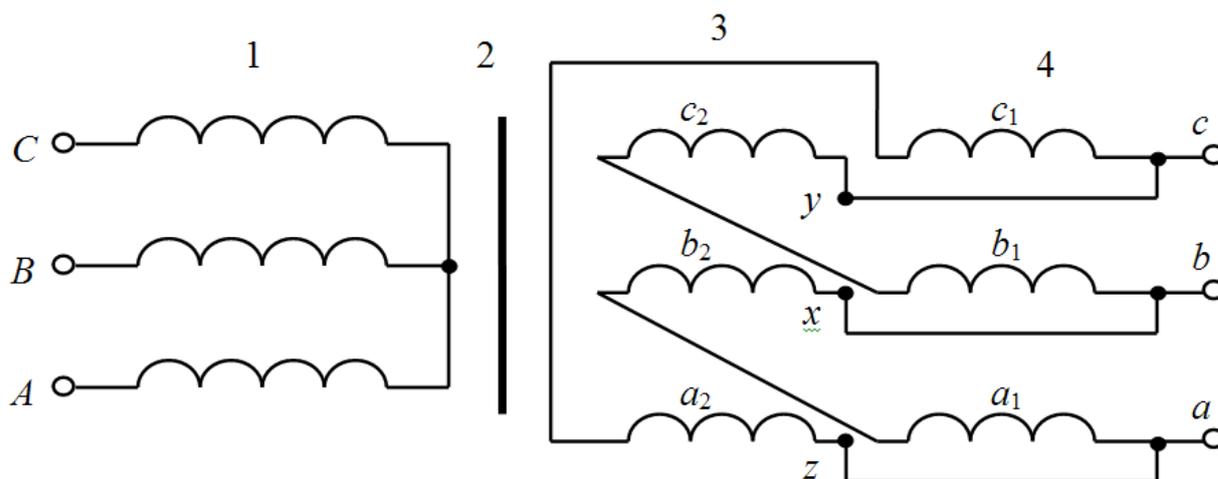


Рисунок 1. Схема соединения обмоток трехфазного трансформатора «звезда-треугольник с зигзагом»

Для упрощения анализа сложных электромагнитных процессов при работе трансформатора примем следующие допущения:

1. Напряжение питающей электрической сети изменяется по синусоидальному закону.
2. Система первичных напряжений трансформатора симметрична независимо от режима его работы.
3. Нагрузка трансформатора симметрична и носит линейный характер.
4. Трансформатор понижающий.

Первичная обмотка подключается к питающей электрической сети, векторы фазных напряжений которой смещены на $1/3$ периода:

$$\begin{aligned} u_A &= U_{Am} \sin \omega t, \\ u_B &= U_{Bm} \sin(\omega t - \frac{2}{3} \pi), \\ u_C &= U_{Cm} \sin(\omega t + \frac{2}{3} \pi), \end{aligned} \quad (1)$$

где U_{Am} , U_{Bm} , U_{Cm} – амплитудные значения напряжений фаз «А», «В», «С» соответственно, В;
 $\omega = 2\pi f_1$ – угловая частота тока фаз, рад/с;
 f_1 – частота тока, Гц;
 t – рассматриваемый момент времени, с.

В режиме холостого хода эти напряжения вызывают протекание токов по фазным обмоткам первичной стороны, несинусоидальных из-за насыщения магнитной системы трансформатора и содержащих высшие нечетные гармоники, кроме гармоник кратных трем. Если несинусоидальные кривые фазных токов заменить эквивалентными синусоидами основной частоты, то фазные токи холостого хода первичной обмотки будут равны

$$\begin{aligned} i_{Ax} &= I_{Amx} \sin(\omega t - \varphi_{Ax}), \\ i_{Bx} &= I_{Bmx} \sin(\omega t - \frac{2}{3} \pi - \varphi_{Bx}), \end{aligned} \quad (2)$$

$$i_{Cx} = I_{Cmx} \sin(\omega t + \frac{2}{3} \pi - \varphi_{Cx}),$$

где I_{Amx} , I_{Bmx} , I_{Cmx} – амплитудные значения эквивалентных синусоид токов холостого хода первичной обмотки трех фаз, А;

φ_{Ax} , φ_{Bx} , φ_{Cx} – угол сдвига фаз соответствующих токов холостого хода и напряжений первичной стороны, рад.

Реактивные составляющие токов холостого хода первичной обмотки создают переменное магнитное поле, фазные магнитодвижущие силы (МДС) которого равны:

$$\begin{aligned} f_A &= I_{Amxp} W_1 \sin(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu}) = \\ &= I_{Am\mu} W_1 \sin(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu}) = \\ &= F_{Am} \sin(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu}), \\ f_B &= I_{Bm xp} W_1 \sin(\omega t - \frac{2}{3} \pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu}) = \\ &= I_{Bm\mu} W_1 \sin(\omega t - \frac{2}{3} \pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu}) = \\ &= F_{Bm} W_1 \sin(\omega t - \frac{2}{3} \pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu}), \quad (3) \\ f_C &= I_{Cm xp} W_1 \sin(\omega t + \frac{2}{3} \pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu}) = \\ &= I_{Cm\mu} W_1 \sin(\omega t + \frac{2}{3} \pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu}) = \\ &= F_{Cm} \sin(\omega t + \frac{2}{3} \pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu}), \end{aligned}$$

где $F_{Am} = I_{Am} W_1, F_{Bm} = I_{Bm} W_1, F_{Cm} = I_{Cm} W_1$ – амплитудные значения фазных МДС первичной обмотки, А;

W_1 – количество витков в обмотке одной фазы первичной стороны трансформатора, шт;

$I_{Am\mu}, I_{Bm\mu}, I_{Cm\mu}$ – реактивные составляющие соответствующих фазных токов холостого хода первичной обмотки, А;

$I_{Am\mu}, I_{Bm\mu}, I_{Cm\mu}$ – амплитудные значения намагничивающих токов соответствующих фаз, А;

$\alpha_{Am}, \alpha_{Bm}, \alpha_{Cm}$ – угол фазового сдвига между токами холостого хода и МДС или магнитными потоками соответствующих фаз (угол магнитного запаздывания), рад.

Причем

$$\begin{aligned} I_{Am\mu} &= I_{Am\mu} = I_{Amx} \cos \alpha_{Am}, \\ I_{Bm\mu} &= I_{Bm\mu} = I_{Bmx} \cos \alpha_{Bm}, \\ I_{Cm\mu} &= I_{Cm\mu} = I_{Cmx} \cos \alpha_{Cm}. \end{aligned} \quad (4)$$

Фазные МДС вызывают соответствующие магнитные потоки:

$$\begin{aligned} \Phi_A &= \frac{f_A}{R_{A\mu}} = \frac{F_{Am}}{R_{A\mu}} \sin(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{Am}) = \\ &= \Phi_{Am} \sin(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{Am}), \\ \Phi_B &= \frac{f_B}{R_{B\mu}} = \frac{F_{Bm}}{R_{B\mu}} \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{Bm}\right) = \\ &= \Phi_{Bm} \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{Bm}\right), \\ \Phi_C &= \frac{f_C}{R_{C\mu}} = \frac{F_{Cm}}{R_{C\mu}} \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{Cm}\right) = \\ &= \Phi_{Cm} \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{Cm}\right), \end{aligned} \quad (5)$$

где $R_{A\mu}, R_{B\mu}, R_{C\mu}$ – сопротивления магнитных цепей соответствующих фаз, Гн⁻¹;

$\Phi_{Am}, \Phi_{Bm}, \Phi_{Cm}$ – амплитудные значения магнитного потока соответствующих фаз, Вб.

Основные магнитные потоки фаз индуцируют в первичной обмотке ЭДС, отстающие по фазе на угол $\pi/2$:

$$\begin{aligned} e_A &= -\frac{d\psi_A}{dt} = -W_1 \frac{d\Phi_A}{dt} = -\omega W_1 \Phi_{Am} \times \\ &\times \cos(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{Am}) = 2\pi f_1 W_1 \Phi_{Am} \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\times \sin\left(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{Am} - \frac{\pi}{2}\right) = \\ &= E_{Am} \sin\left(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{Am} - \frac{\pi}{2}\right), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} e_B &= -\frac{d\psi_B}{dt} = -W_1 \frac{d\Phi_B}{dt} = -\omega W_1 \Phi_{Bm} \times \\ &\times \cos\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{Bm}\right) = 2\pi f_1 W_1 \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\times \Phi_{Bm} \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{Bm} - \frac{\pi}{2}\right) = \\ &= E_{Bm} \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{Bm} - \frac{\pi}{2}\right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e_C &= -\frac{d\psi_C}{dt} = -W_1 \frac{d\Phi_C}{dt} = -\omega W_1 \Phi_{Cm} \times \\ &\times \cos\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{Cm}\right) = 2\pi f_1 W_1 \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\times \Phi_{Cm} \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{Cm} - \frac{\pi}{2}\right) = \\ &= E_{Cm} \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{Cm} - \frac{\pi}{2}\right), \end{aligned}$$

где $\psi_A = W_1 \Phi_A, \psi_B = W_1 \Phi_B, \psi_C = W_1 \Phi_C$ – потокосцепления соответствующих первичных фазных обмоток, Вб;

$$E_{Am} = 2\pi f_1 W_1 \Phi_{Am}, E_{Bm} = 2\pi f_1 W_1 \Phi_{Bm},$$

$E_{Cm} = 2\pi f_1 W_1 \Phi_{Cm}$ – амплитуды соответствующих фазных ЭДС первичной обмотки, В.

Фазные ЭДС первичной обмотки уравновешивают соответствующие первичные напряжения трансформатора.

Основные магнитные потоки фаз также индуцируют ЭДС в половинах вторичных обмоток, которые расположены на тех же стержнях магнитопровода.

Магнитный поток фазы «А» индуцирует ЭДС в половинах вторичных обмоток a_1 и a_2 , принадлежащих разным фазам (рис. 1). Так как половина обмотки a_2 имеет противоположную маркировку выводов по отношению к a_1 , то ее ЭДС дополнительно смещена по фазе на угол $-\pi$. Тогда

$$e_{a1} = -\frac{d\psi_{a1}}{dt} = -\frac{W_2}{2} \frac{d\Phi_A}{dt} = -\omega \frac{W_2}{2} \times \left(-\varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu} - \frac{\pi}{2} \right), \quad (8)$$

$$\times \Phi_{Am} \cos(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu}) = 2\pi f_1 \frac{W_2}{2} \times \\ \times \Phi_{Am} \sin\left(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu} - \frac{\pi}{2}\right) = \\ = E_{a1m} \sin\left(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu} - \frac{\pi}{2}\right), \quad (7)$$

$$e_{a2} = -\frac{d\psi_{a2}}{dt} = -\frac{W_2}{2} \frac{d\Phi_A}{dt} = \\ = -\omega \frac{W_2}{2} \times \Phi_{Am} \cos\left(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu} - \right. \\ \left. - \pi\right) = 2\pi f_1 \frac{W_2}{2} \Phi_{Am} \sin\left(\omega t - \varphi_{Ax} - \right. \\ \left. - \alpha_{A\mu} - \frac{3}{2}\pi\right) = E_{a2m} \sin\left(\omega t - \varphi_{Ax} - \right. \\ \left. - \alpha_{A\mu} - \frac{3}{2}\pi\right),$$

где $E_{a1m} = 2\pi f_1 \frac{W_2}{2} \Phi_{Am}$, $E_{a2m} = 2\pi f_1 \frac{W_2}{2} \Phi_{Am}$

– амплитудные значения ЭДС вторичных обмоток на стержне магнитопровода фазы «А», В,

W_2 – суммарное количество витков во вторичных обмотках трансформатора, находящихся на одном стержне магнитопровода, шт.

Магнитный поток фазы «В» индуцирует ЭДС в половинах вторичных обмоток b_1 и b_2 , (рис. 1):

$$e_{b1} = -\frac{d\psi_{b1}}{dt} = -\frac{W_2}{2} \frac{d\Phi_B}{dt} = -\omega \frac{W_2}{2} \times \\ \times \Phi_{Bm} \cos\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu}\right) = \\ = 2\pi f_1 \frac{W_2}{2} \Phi_{Bm} \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Bx} - \right. \\ \left. - \alpha_{B\mu} - \frac{\pi}{2}\right) = E_{b1m} \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \right.$$

$$e_{b2} = -\frac{d\psi_{b2}}{dt} = -\frac{W_2}{2} \frac{d\Phi_B}{dt} = -\omega \frac{W_2}{2} \times \\ \times \Phi_{Bm} \cos\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu} - \pi\right) = \\ = 2\pi f_1 \frac{W_2}{2} \Phi_{Bm} \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Bx} - \right. \\ \left. - \alpha_{B\mu} - \frac{3}{2}\pi\right) = E_{b2m} \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \right. \\ \left. - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu} - \frac{3}{2}\pi\right),$$

где $E_{b1m} = 2\pi f_1 \frac{W_2}{2} \Phi_{Bm}$, $E_{b2m} = 2\pi f_1 \frac{W_2}{2} \Phi_{Bm}$

– амплитудные значения ЭДС вторичных обмоток на стержне магнитопровода фазы В, В.

Соответственно магнитный поток фазы «С» индуцирует ЭДС в половинах вторичных обмоток c_1 и c_2 (рис. 1):

$$e_{c1} = -\frac{d\psi_{c1}}{dt} = -\frac{W_2}{2} \frac{d\Phi_C}{dt} = -\omega \frac{W_2}{2} \times \\ \times \Phi_{Cm} \cos\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu}\right) = \\ = 2\pi f_1 \frac{W_2}{2} \Phi_{Cm} \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Cx} - \right. \\ \left. - \alpha_{C\mu} - \frac{\pi}{2}\right) = E_{c1m} \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \right. \\ \left. - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu} - \frac{\pi}{2}\right), \quad (9)$$

$$e_{c2} = -\frac{d\psi_{c2}}{dt} = -\frac{W_2}{2} \frac{d\Phi_C}{dt} = -\omega \frac{W_2}{2} \times \\ \times \Phi_{Cm} \cos\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu} - \pi\right) =$$

$$= 2\pi f_1 \frac{W_2}{2} \Phi_{Cm} \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu} - \frac{3}{2}\pi\right) = E_{c2m} \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu} - \frac{3}{2}\pi\right),$$

$$\text{где } E_{c1m} = 2\pi f_1 \frac{W_2}{2} \Phi_{Cm}, \quad E_{c2m} = 2\pi f_1 \frac{W_2}{2} \Phi_{Cm}$$

– амплитудные значения ЭДС вторичных обмоток на стержне магнитопровода фазы «С», В.

Фазные ЭДС вторичной стороны трансформатора, индуцируемые основным магнитным потоком, будут равны сумме ЭДС двух половин вторичной обмотки, расположенных на разных стержнях магнитопровода:

$$\begin{aligned} e_a &= e_{a1} + e_{b2} = E_{a1m} \sin\left(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu} - \frac{\pi}{2}\right) + E_{b2m} \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu} - \frac{3}{2}\pi\right) = 1,73E_{a1m} \times \\ &\times \sin\left(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu} - \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{6}\right) = \\ &= 1,73E_{a1m} \sin\left(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu} - \frac{\pi}{3}\right); \\ e_b &= e_{b1} + e_{c2} = E_{b1m} \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu} - \frac{\pi}{2}\right) + E_{c2m} \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu} - \frac{3}{2}\pi\right) = \\ &= 1,73E_{b1m} \sin\left(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu} - \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{6}\right) + \\ &+ 1,73E_{c2m} \sin\left(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu} - \frac{\pi}{3}\right); \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} e_c &= e_{c1} + e_{a2} = E_{c1m} \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu} - \frac{\pi}{2}\right) + E_{a2m} \sin\left(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu} - \frac{3}{2}\pi\right) = 1,73E_{c1m} \times \\ &\times \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu} - \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{6}\right) = \\ &= 1,73E_{c1m} \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu} - \frac{\pi}{3}\right). \end{aligned}$$

Выражения (10) показывают, что фазные ЭДС вторичной обмотки смещены по фазе относительно одноименных ЭДС первичной обмотки на угол 30° . При этом вторичные фазные ЭДС предложенной схемы на 15% меньше ЭДС схемы соединения «звезда» при том же количестве витков вторичной обмотки. Поэтому предложенная схема требует соответствующего увеличения количества витков во вторичной обмотке для получения требуемого вторичного напряжения.

Если к трансформатору подключить симметричную нагрузку, то под воздействием этих ЭДС через нагрузку и вторичную обмотку будут протекать токи:

$$\begin{aligned} i_a &= I_{am} \sin\left(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu} - \gamma_a - \frac{\pi}{3}\right), \\ i_b &= I_{bm} \sin\left(\omega t - \frac{3}{2}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu} - \gamma_b - \frac{\pi}{3}\right), \quad (11) \\ i_c &= I_{cm} \sin\left(\omega t + \frac{3}{2}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu} - \gamma_c - \frac{\pi}{3}\right), \end{aligned}$$

где I_{am}, I_{bm}, I_{cm} – амплитудные значения соответствующих фазных токов вторичной стороны, А;

$\gamma_a, \gamma_b, \gamma_c$ – углы фазового сдвига между токами и ЭДС соответствующих фаз вторичной обмотки, рад.

Результирующее магнитное поле трансформатора в нагрузочном режиме создается первичной и вторичной обмотками.

Тогда МДС в стержнях магнитопровода, на которых расположены первичные обмотки фаз «А», «В» «С», будут равны соответственно:

$$\begin{aligned} i_A W_1 + i_a \frac{W_2}{2} - i_c \frac{W_2}{2} &= i_{A\mu} W_1 = const, \\ i_B W_1 + i_b \frac{W_2}{2} - i_a \frac{W_2}{2} &= i_{B\mu} W_1 = const, \quad (12) \end{aligned}$$

$$i_C W_1 + i_c \frac{W_2}{2} - i_b \frac{W_2}{2} = i_{C\mu} W_1 = const,$$

где $i_{A\mu}, i_{B\mu}, i_{C\mu}$ – мгновенные значения намагничивающих токов соответствующих фаз, А;

i_A, i_B, i_C – мгновенные значения соответствующих фазных токов первичной стороны, А.

На рисунке 2 представлена схема распределения МДС и магнитных потоков трансформатора в момент времени, соответствующий заданному направлению токов в обмотках. Первичные фазные обмотки оказывают намагничивающее действие на стержни магнитопровода, половины обмоток этих же фаз – размагничивающее, а половины обмоток двух других фаз часть периода изменения тока подмагничивают стержни, а часть периода – размагничивают. Если рассматривать трехстержневой магнитопровод в целом, то видно, что результирующая МДС трехфазной первичной обмотки оказывает намагничивающее действие на трансформатор, а МДС вторичной обмотки – размагничивающее.

Результирующее магнитное поле не зависит от величины нагрузки, потому что пропорционально изменению вторичных токов изменяются токи первичной обмотки, а изменение размагничивающего действия вторичной обмотки компенсируется пропорциональным изменением намагничивающего действия первичной обмотки. Следовательно, основной магнитный поток и индуцируемые им ЭДС в обмотках также не зависят от величины нагрузки.

Величины токов первичной обмотки и их фазовый сдвиг относительно напряжений в нагрузочном режиме будут иными, чем в режиме холостого хода. Первичные токи можно определить из уравнений МДС трансформатора (12):

$$\begin{aligned} i_A &= i_{A\mu} - i_a \frac{W_2}{2W_1} + i_c \frac{W_2}{2W_1}, \\ i_B &= i_{B\mu} - i_b \frac{W_2}{2W_1} + i_a \frac{W_2}{2W_1}, \end{aligned} \quad (13)$$

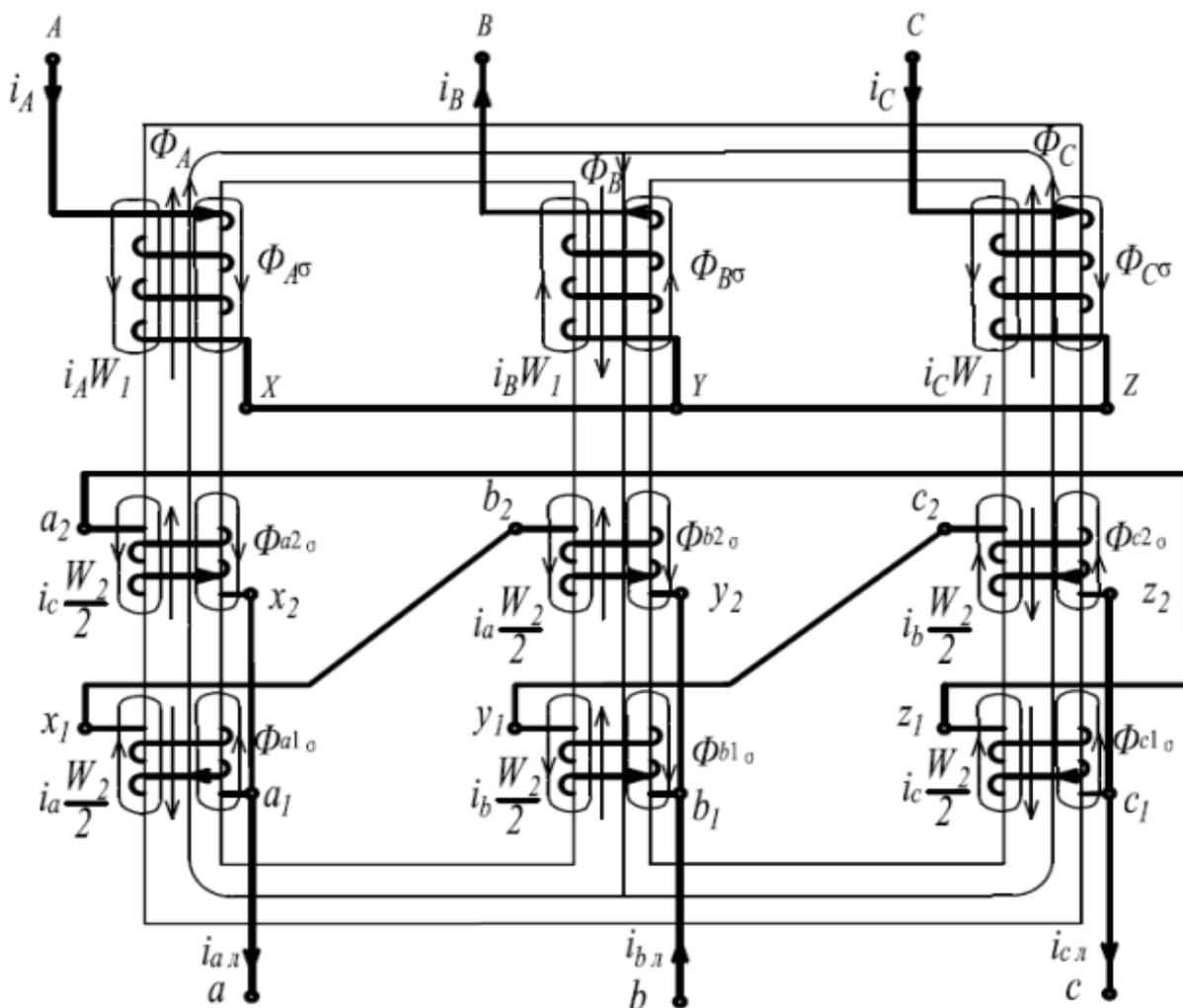


Рисунок 2. Схема распределения МДС и магнитных потоков трехфазного трансформатора «звезда-треугольник с зигзагом»

$$i_C = i_{C\mu} - i_c \frac{W_2}{2W_1} + i_b \frac{W_2}{4W_1}.$$

или

$$\begin{aligned} i_A &= I_{Am} \sin(\omega t - \varphi_A), \\ i_B &= I_{Bm} \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_B), \\ i_C &= I_{Cm} \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_C), \end{aligned} \quad (14)$$

где I_{Am}, I_{Bm}, I_{Cm} – амплитудные значения первичных соответствующих фазных токов при нагрузке, А;

$\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$ – углы сдвига векторов токов и напряжений соответствующих фаз первичной стороны, рад.

Так как магнитное поле трансформатора имеет пространственное распределение, то часть его силовых линий замыкается, минуя магнитопровод и создавая потоки рассеяния первичной обмотки $\Phi_{A\sigma}, \Phi_{B\sigma}, \Phi_{C\sigma}$, а также половин вторичной обмотки $\Phi_{a1\sigma}, \Phi_{a2\sigma}, \Phi_{b1\sigma}, \Phi_{b2\sigma}, \Phi_{c1\sigma}, \Phi_{c2\sigma}$ (рис. 2). Магнитные потоки рассеяния в основном сцеплены с создающими их обмотками и индуцируют в них ЭДС рассеяния.

ЭДС рассеяния первичных фазных обмоток будут равны:

$$\begin{aligned} e_{A\sigma} &= -L_{A\sigma} \frac{di_A}{dt} = -L_{A\sigma} \times \\ &\times \frac{d(I_{Am} \sin(\omega t - \varphi_A))}{dt} = \\ &= -L_{A\sigma} \omega I_{Am} \cos(\omega t - \varphi_A) = \\ &= I_{Am} x_A \sin(\omega t - \varphi_A - \frac{\pi}{2}), \\ e_{B\sigma} &= -L_{B\sigma} \frac{di_B}{dt} = -L_{B\sigma} \times \\ &\times \frac{d(I_{Bm} \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_B))}{dt} = \\ &= -L_{B\sigma} \omega I_{Bm} \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_B) = \\ &= I_{Bm} x_B \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi_B - \frac{\pi}{2}), \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} e_{C\sigma} &= -L_{C\sigma} \frac{di_C}{dt} = -L_{C\sigma} \times \\ &\times \frac{d(I_{Cm} \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_C))}{dt} = \\ &= -L_{C\sigma} \omega I_{Cm} \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_C) = \\ &= I_{Cm} x_C \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi_C - \frac{\pi}{2}), \end{aligned}$$

где $L_{A\sigma}, L_{B\sigma}, L_{C\sigma}$ – индуктивности рассеяния соответствующих первичных фазных обмоток, Гн;

$x_A = \omega L_{A\sigma}, x_B = \omega L_{B\sigma}, x_C = \omega L_{C\sigma}$ – индуктивные сопротивления рассеяния соответствующих фаз первичной обмотки, Ом.

ЭДС рассеяния соответствующих вторичных фазных обмоток будут равны:

$$\begin{aligned} e_{a\sigma} &= e_{a1\sigma} + e_{b2\sigma} = -L_{a1\sigma} \frac{di_a}{dt} - L_{b2\sigma} \frac{di_a}{dt} = \\ &= (-L_{a1\sigma} - L_{b2\sigma}) \frac{di_a}{dt} = (-L_{a1\sigma} - L_{b2\sigma}) \times \\ &\times \frac{d(I_{am} \sin(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu} - \gamma_a - \frac{\pi}{3}))}{dt} = \\ &= (-L_{a1\sigma} - L_{b2\sigma}) \omega I_{am} \cos(\omega t - \varphi_{Ax} - \\ &- \alpha_{A\mu} - \gamma_a - \frac{\pi}{3}) = (\omega L_{a1\sigma} + \omega L_{b2\sigma}) \times \\ &\times I_{am} \sin(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu} - \gamma_a - \frac{5}{6}\pi) = \\ &= I_{am} (x_{a1} + x_{b2}) \sin(\omega t - \varphi_{Ax} - \alpha_{A\mu} - \gamma_a - \frac{5}{6}\pi), \\ e_{b\sigma} &= e_{b1\sigma} + e_{c2\sigma} = -L_{b1\sigma} \frac{di_b}{dt} - L_{c2\sigma} \times \\ &\times \frac{di_b}{dt} = (-L_{b1\sigma} - L_{c2\sigma}) \frac{di_b}{dt} = \\ &= (-L_{b1\sigma} - L_{c2\sigma}) \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \times \frac{d(I_{bm} \sin(\omega t - \frac{3}{2}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu} - \gamma_b - \frac{\pi}{3}))}{dt} = \\
 & = (-L_{b1\sigma} - L_{c2\sigma})\omega I_{bm} \times \\
 & \times \cos(\omega t - \frac{3}{2}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu} - \gamma_b - \frac{\pi}{3}) = \\
 & = (\omega L_{b1\sigma} + \omega L_{c2\sigma})I_{bm} \times \\
 & \times \sin(\omega t - \frac{3}{2}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu} - \gamma_b - \frac{5}{6}\pi) = \\
 & = I_{bm}(x_{b1} + x_{c2}) \times \\
 & \times \sin(\omega t - \frac{3}{2}\pi - \varphi_{Bx} - \alpha_{B\mu} - \gamma_b - \frac{5}{6}\pi), \quad (16) \\
 & e_{c\sigma} = e_{c1\sigma} + e_{a2\sigma} = -L_{c1\sigma} \frac{di_c}{dt} - L_{a2\sigma} \frac{di_c}{dt} = \\
 & = (-L_{c1\sigma} - L_{a2\sigma}) \frac{di_c}{dt} = (-L_{c1\sigma} - L_{a2\sigma}) \times \\
 & \times \frac{d(I_{cm} \sin(\omega t + \frac{3}{2}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu} - \gamma_c - \frac{\pi}{3}))}{dt} = \\
 & = (-L_{c1\sigma} - L_{a2\sigma})\omega I_{cm} \times \\
 & \times \cos(\omega t + \frac{3}{2}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu} - \gamma_c - \frac{\pi}{3}) = \\
 & = (\omega L_{c1\sigma} + \omega L_{a2\sigma})I_{cm} \times \\
 & \times \sin(\omega t + \frac{3}{2}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu} - \gamma_c - \frac{5}{6}\pi) = \\
 & = I_{cm}(x_{c1} + x_{a2}) \times \\
 & \times \sin(\omega t + \frac{3}{2}\pi - \varphi_{Cx} - \alpha_{C\mu} - \gamma_c - \frac{5}{6}\pi),
 \end{aligned}$$

где $L_{a1\sigma}$, $L_{a2\sigma}$, $L_{b1\sigma}$, $L_{b2\sigma}$, $L_{c1\sigma}$, $L_{c2\sigma}$ – индуктивности рассеяния половин вторичных фазных обмоток, соответственно, a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , c_1 , c_2 , Гн;

x_{a1} , x_{a2} , x_{b1} , x_{b2} , x_{c1} , x_{c2} – индуктивные сопротивления рассеяния соответствующих половин вторичных фазных обмоток, Ом.

Соответственно

$$\begin{aligned}
 x_{a1} &= \omega L_{a1\sigma}, x_{a2} = \omega L_{a2\sigma}, \\
 x_{b1} &= \omega L_{b1\sigma}, x_{b2} = \omega L_{b2\sigma}, \\
 x_{c1} &= \omega L_{c1\sigma}, x_{c2} = \omega L_{c2\sigma}.
 \end{aligned} \quad (17)$$

Протекая по обмоткам трансформатора токи вызывают падения напряжений на их активных сопротивлениях.

Согласно второму закону Кирхгофа, фазные напряжения первичной обмотки будут равны:

$$\begin{aligned}
 u_A &= -e_A - e_{A\sigma} + i_A R_A, \\
 u_B &= -e_B - e_{B\sigma} + i_B R_B, \\
 u_C &= -e_C - e_{C\sigma} + i_C R_C,
 \end{aligned} \quad (18)$$

где R_A , R_B , R_C – активные сопротивления соответствующих первичных фазных обмоток, Ом.

Уравнения фазных напряжений вторичной обмотки:

$$\begin{aligned}
 u_a &= e_a + e_{a\sigma} - i_a(R_{a1} + R_{b2}) = \\
 &= e_{a1} + e_{b2} + e_{a\sigma} - i_a(R_{a1} + R_{b2}), \\
 u_b &= e_b + e_{b\sigma} - i_b(R_{b1} + R_{c2}) = \\
 &= e_{b1} + e_{c2} + e_{b\sigma} - i_b(R_{b1} + R_{c2}), \\
 u_c &= e_c + e_{c\sigma} - i_c(R_{c1} + R_{a2}) = \\
 &= e_{c1} + e_{a2} + e_{c\sigma} - i_c(R_{c1} + R_{a2}),
 \end{aligned} \quad (19)$$

где R_{a1} , R_{a2} , R_{b1} , R_{b2} , R_{c1} , R_{c2} – активные сопротивления соответствующих половин вторичных обмоток, Ом.

Так как напряжения, ЭДС, токи, МДС и магнитные потоки трансформатора при принятых допущениях гармонически изменяются во времени по синусоидальному закону, то основные уравнения трансформатора могут быть представлены в комплексной форме, где мгновенные значения вышеперечисленных параметров заменены их действующими значениями. Тогда основные уравнения трансформатора будут иметь следующий вид:

– уравнения фазных напряжений первичной обмотки:

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_A &= -\underline{E}_A - \underline{E}_{A\sigma} + \underline{I}_A R_A = \\
 &= -\underline{E}_A + \underline{I}_A(R_A + jx_A), \\
 \underline{U}_B &= -\underline{E}_B - \underline{E}_{B\sigma} + \underline{I}_B R_B = \\
 &= -\underline{E}_B + \underline{I}_B(R_B + jx_B), \\
 \underline{U}_C &= -\underline{E}_C - \underline{E}_{C\sigma} + \underline{I}_C R_C = \\
 &= -\underline{E}_C + \underline{I}_C(R_C + jx_C).
 \end{aligned} \quad (20)$$

– уравнения фазных напряжений вторичной обмотки:

$$\begin{aligned} \underline{U}_a &= \underline{E}_{a1} + \underline{E}_{b2} + \underline{E}_{a\sigma} - \underline{I}_a (R_{a1} + \\ &+ R_{b2}) = \underline{E}_{a1} + \underline{E}_{b2} - \underline{I}_a [(R_{a1} + R_{b2}) + \\ &+ j(x_{a1} + x_{b2})], \\ \underline{U}_b &= \underline{E}_{b1} + \underline{E}_{c2} + \underline{E}_{b\sigma} - \underline{I}_b (R_{b1} + \\ &+ R_{c2}) = \underline{E}_{b1} + \underline{E}_{c2} - \underline{I}_b [(R_{b1} + R_{c2}) + \\ &+ j(x_{b1} + x_{c2})], \\ \underline{U}_c &= \underline{E}_{c1} + \underline{E}_{a2} + \underline{E}_{c\sigma} - \underline{I}_c (R_{c1} + \\ &+ R_{a2}) = \underline{E}_{c1} + \underline{E}_{a2} - \underline{I}_c [(R_{c1} + R_{a2}) + \\ &+ j(x_{c1} + x_{a2})]; \end{aligned} \quad (21)$$

– уравнения МДС в стержнях магнитопровода:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A W_1 + \underline{I}_a \frac{W_2}{2} - \underline{I}_c \frac{W_2}{2} &= \underline{I}_{A\mu} W_1, \\ \underline{I}_B W_1 + \underline{I}_b \frac{W_2}{2} - \underline{I}_a \frac{W_2}{2} &= \underline{I}_{B\mu} W_1, \\ \underline{I}_C W_1 + \underline{I}_c \frac{W_2}{2} - \underline{I}_b \frac{W_2}{2} &= \underline{I}_{C\mu} W_1. \end{aligned} \quad (22)$$

Заключение

1. Магнитное поле трансформатора «звезда-треугольник с зигзагом» создается совместно первичной и вторичной обмотками: первичная – намагничивает магнитопровод, одни половины вторичных обмоток, расположенные на стержнях с первичными обмотками этих же фаз – размагничивают, а вторые половины – часть периода изменения тока подмагничивают стержни, а часть периода размагничивают.

2. Результирующее магнитное поле трансформатора не зависит от величины нагрузки, потому что изменение размагничивающего действия вторичной обмотки компенсируется пропорциональным изменением намагничивающего действия первичной обмотки. Следовательно, основной магнитный поток и индуцируемые им ЭДС в обмотках также не зависят от величины нагрузки.

3. Фазные ЭДС вторичной обмотки рассматриваемого трансформатора равны геометрической сумме ЭДС двух ее половин, расположенных на разных стержнях магнитопровода, и сдвинуты по фазе на угол 30° относительно одноименных ЭДС первичной обмотки.

4. Вторичные фазные ЭДС предложенной схемы соединения обмоток на 15% меньше ЭДС схемы «звезда» при том же количестве витков вторичной обмотки, что требует соответствующего увеличения количества витков во вторичной обмотке для получения номинального вторичного напряжения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Трёхфазный трансформатор: пат. 2244 Рес. Беларусь / А.П. Сердешнов, Г.И. Янукович, Е.А. Сердешнов, Д.Г. Янукович; заявитель Белор. гос. аграрный технич. ун-т. – № а 950299; заявл. 1995.06. 09; опубл. 30. 09. 1998 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 1998. – № 3(18). – С. 216-217.

2. Збродыга, В.М. Улучшение показателей несимметричности 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. – Минск, 2010. – 20 с.

3. 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.

4. 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.

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

6. 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.-технич. 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.

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

8. Збродыга, В.М. Анализ работы трансформатора Y/Δ с зигзагом при несимметричном характере нагрузки / В.М. Збродыга, Г.И. Янукович, А.П. Сердешнов // Агропанорама. – 2006. – № 5. – С. 8-12.

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.-технич. 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.-практич. конф., Минск, 23-24 октября 2014 г./ БГАТУ; редкол. И.Н. Шило [и др.]. – Минск, 2014. – С. 183-184.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 15.09.2022