

Двухпроводная система электропередачи трёхфазного тока

КОСОУХОВ Ф.Д., ВАСИЛЬЕВ Н.В., БОРОШНИН А.Л., ФИЛИППОВ А.О.,
ГОРБУНОВ А.О. ТЕРЕМЕЦКИЙ М.Ю.

Двухпроводная система электропередачи трёхфазного тока содержит два трансформаторных преобразователя числа фаз (ТПЧФ). Первый преобразователь (ТПЧФ-1) преобразует симметричную трёхфазную систему токов источника питания в однофазный ток, одновременно повышая напряжение двухпроводной линии, по которой электрическая энергия передается на значительное расстояние к второму преобразователю (ТПЧФ-2). В нем понижается напряжение, и однофазный ток преобразуется в симметричную трехфазную систему токов. В каждом трансформаторном преобразователе преобразование токов осуществляется трехфазным трансформатором со специальной схемой соединения обмоток и двумя конденсаторными батареями (фазообразующими элементами). Приведены результаты анализа ТПЧФ-1, на основании которых получены математические выражения для сопротивлений фазообразующих элементов, а также значений напряжения, тока и мощности этих элементов, трансформатора и нагрузки. Построены векторная диаграмма для ТПЧФ-1 и графические зависимости токов преобразователя и реактивных мощностей фазообразующих элементов от нагрузки, а также зависимости значений емкости конденсаторных батарей от тока нагрузки. Приведены математические выражения для всех параметров ТПЧФ-2.

Ключевые слова: двухпроводная система электропередачи, трёхфазный ток, трансформаторный преобразователь числа фаз, анализ схемы преобразователя, математические выражения

Двухпроводные системы электропередачи постоянного тока имеют практическое применение [1]. На основе этих систем разработана резонансная система электроснабжения сельскохозяйственных потребителей малой мощности [2–4]. В Санкт-Петербургском государственном аграрном университете разработано устройство передачи электрической энергии трёхфазного тока по двухпроводной линии [5]. Электрическая схема этого устройства приведена на рис. 1.

Устройство содержит два трансформаторных преобразователя числа фаз (ТПЧФ). Первый преобразователь 1 преобразует симметричную трехфазную систему токов источника питания в однофазный ток, одновременно повышая напряжение двухпроводной линии 5, по которой электрическая

энергия передается на значительное расстояние к второму преобразователю 8 (ТПЧФ-2). В нем происходит понижение напряжения и одновременно однофазный ток преобразуется в симметричную трехфазную систему токов приемника 9. Таким образом, основными электротехническими устройствами данной системы электропередачи являются трансформаторные преобразователи числа фаз, которые трансформируют напряжение и преобразуют число фаз.

Энергетические показатели предложенной системы электропередачи. В рассматриваемой системе электропередачи (рис. 1) электрическая энергия от трёхфазного источника преобразуется с помощью ТПЧФ-1 в энергию однофазного тока высокого напряжения, которая по двухпроводной линии пере-

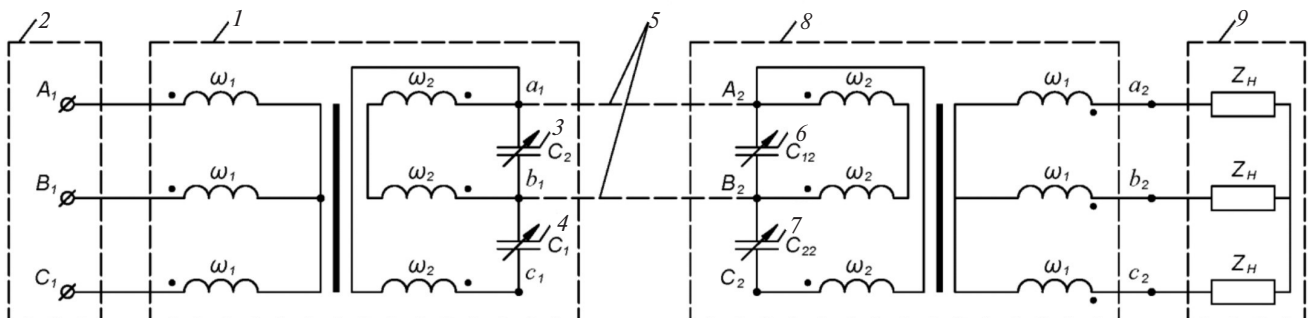


Рис. 1. Электрическая схема устройства передачи электрической энергии трёхфазного тока по двухпроводной линии

даётся к трансформаторному преобразователю числа фаз ТПЧФ-2, где энергия однофазного тока преобразуется в энергию трёхфазного тока с понижением напряжения до необходимого уровня. Таким образом, фазопреобразующими элементами в данной системе электропередачи являются обыкновенный трёхфазный трансформатор со специальной схемой соединения обмоток и две конденсаторные батареи, которые одновременно с фазопреобразованием обеспечивают компенсацию реактивной мощности энергосистемы. Конденсаторные батареи могут быть включены как с высоковольтной стороны трансформатора (рис. 1), так и с низковольтной его стороны. Поэтому напряжение линии электропередачи при подключении конденсаторов с высоковольтной стороны трансформатора может составлять 10 кВ, а с низковольтной стороны — 35, 110 кВ.

Что касается значения номинальной мощности данной системы электропередачи, то особых ограничений для ТПЧФ нет, так как в нем применяется обыкновенный трёхфазный трансформатор.

В связи с тем, что в ТПЧФ нет дополнительных потерь мощности, кроме потерь в трансформаторе и конденсаторной батарее, его КПД примерно равен КПД трансформатора.

Протяжённость двухпроводной линии электропередачи зависит от уровня её напряжения и может достигать таких же значений, как и для трёхпроводных линий напряжением 10, 35 и 110 кВ.

Важным вопросом, с нашей точки зрения, является разработка метода анализа трансформаторных преобразователей числа фаз. На основе анализа ТПЧФ определены зависимости параметров конденсаторных батарей, обеспечивающих заданный режим работы системы электропередачи, а также установлены зависимости токов, напряжений и мощностей трансформатора и фазопреобразующих элементов от значения нагрузки и её коэффициента мощности. Эти зависимости необходимы при проектировании трансформаторных преобразователей числа фаз.

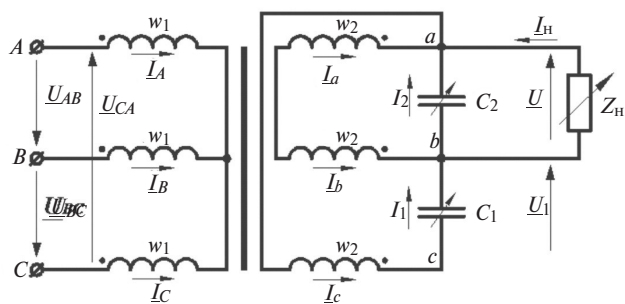


Рис. 2. Принципиальная схема трансформаторного преобразователя числа фаз (ТПЧФ-1)

Анализ трансформаторного преобразователя числа фаз (ТПЧФ-1). Трансформаторный преобразователь числа фаз (рис. 2) содержит трехфазный трехстержневой трансформатор с одинаковым по числу витков w_1 первичными обмотками. Вторичные обмотки с числом витков w_2 , тоже одинаковы. Конструкция трансформатора ТПЧФ-1 не отличается от конструкции обыкновенного силового трансформатора. Первичные обмотки соединены в звезду, к ним подводится симметричная трехфазная система напряжений. Вторичные обмотки соединены по специальной схеме: обмотки фазы a и фазы b соединены последовательно и встречно; обмотка фазы c соединена с обмоткой фазы a последовательно и согласно, т.е. все три вторичные обмотки соединены последовательно.

В качестве фазопреобразующих элементов в ТПЧФ-1 применены две конденсаторные батареи C_1 и C_2 . Батарея C_1 включена последовательно со вторичной обмоткой фазы c трансформатора, а батарея C_2 и однофазная нагрузка Z_H включены параллельно, подсоединены к выходным зажимам ab трансформатора.

Принцип действия ТПЧФ-1 заключается в следующем. В трансформаторном преобразователе происходит двойное преобразование тока однофазной нагрузки в симметричную трехфазную систему токов на входе ТПЧФ-1. Во вторичной обмотке трансформатора с помощью специальной схемы включения обмоток и двух фазопреобразующих конденсаторов ток однофазной нагрузки преобразуется в трехфазную несимметричную систему токов. Разложение этой системы токов на симметричные составляющие показывает, что ток обратной последовательности в этой трехфазной несимметричной системе отсутствует. В результате, в первичную обмотку ТПЧФ-1 трансформируется только ток прямой последовательности, так как ток нулевой последовательности при соединении обмоток звездой без нулевого провода отсутствует. В результате, вторичное преобразование в ТПЧФ-1 осуществляется электромагнитным путем: на входе трансформатора при симметричной системе напряжений будет трехфазная симметричная система токов.

Установим зависимости параметров фазопреобразующих элементов от значения нагрузки Z_H и ее $\cos \varphi_H$ при условии симметрии первичных токов трансформатора.

При анализе схемы ТПЧФ-1 (рис. 1) принимаем следующие допущения.

1. Трансформатор принимаем совершенным [6], поэтому при любой нагрузке его комплексный коэффициент трансформации по напряжению

$$\underline{n} = \frac{\underline{U}_A}{\underline{U}_a} = \frac{\underline{U}_B}{\underline{U}_b} = \frac{\underline{U}_C}{\underline{U}_c} = ne^{j180^\circ}, \quad (1)$$

где $n = w_1 / w_2$; $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ — комплексы фазных напряжений первичной обмотки трансформатора; $\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c$ — то же вторичной обмотки трансформатора.

2. Потерями в конденсаторных батареях пренебрегаем, т.е.

$$\underline{Z}_1 = -jx_1 = x_1 e^{-j90^\circ}; \quad \underline{Z}_2 = -jx_2 = x_2 e^{-j90^\circ}. \quad (2)$$

3. Однофазная нагрузка имеет индуктивный характер.

$$\underline{Z}_H = R_H + jX_H = Z_H e^{j\varphi_H}. \quad (3)$$

4. Трёхфазная система напряжений на входе трансформатора симметрична.

Направляя по вещественной оси вектор фазного напряжения $\underline{U}_A = \underline{U}_\Phi$, запишем комплексы фазных напряжений первичной обмотки трансформатора:

$$\begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{U}_\Phi; \\ \underline{U}_B &= \underline{U}_\Phi e^{j\frac{4\pi}{3}} = \underline{a}^2 \underline{U}_\Phi; \\ \underline{U}_C &= \underline{U}_\Phi e^{j\frac{2\pi}{3}} = \underline{a} \underline{U}_\Phi. \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнения для ТПЧФ-1. Задаём направления токов во всех ветвях схемы (рис. 2) и составляем уравнения в комплексной форме (направления токов в фазах первичной и вторичной обмоток трансформатора принимаем такими же, как и направления соответствующих фазных напряжений).

На основании закона равновесия МДС вдоль замкнутого контура трансформатора составляем два уравнения [6]:

$$\underline{I}_A w_1 + \underline{I}_a w_2 - \underline{I}_b w_2 - \underline{I}_B w_1 = 0; \quad (5)$$

$$\underline{I}_B w_1 + \underline{I}_b w_2 - \underline{I}_c w_2 - \underline{I}_C w_1 = 0. \quad (6)$$

Остальные уравнения составляем по законам Кирхгофа:

$$\underline{I}_a + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0; \quad (7)$$

$$\underline{I}_a - \underline{I}_c + \underline{I}_2 + \underline{I}_H = 0; \quad (8)$$

$$\underline{I}_a + \underline{I}_c = 0; \quad (9)$$

$$\underline{U} + \underline{U}_b - \underline{U}_a = 0; \quad (10)$$

$$\underline{U}_a - \underline{U}_b + \underline{U}_c + \underline{U}_1 = 0; \quad (11)$$

$$\underline{I}_2 \underline{Z}_2 - \underline{I}_H \underline{Z}_H = 0; \quad (12)$$

$$\underline{U} = \underline{I}_2 \underline{Z}_2 = \underline{I}_H \underline{Z}_H = 0; \quad (13)$$

$$\underline{Z} = \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_H}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_H}. \quad (14)$$

Решение уравнений для ТПЧФ-1. Систему уравнений (5)—(14) решаем с учетом (1)—(4). В результате получаем три уравнения с тремя неизвестными $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \frac{U_\Phi}{3n^2 \underline{Z}_1} \left(4\underline{a}^2 + j^3 \sqrt{3} \underline{a} \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}} \right); \\ \underline{I}_B &= \frac{U_\Phi}{3n^2 \underline{Z}_1} \left(8\underline{a}^2 + j^3 \sqrt{3} \underline{a} \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}} \right); \\ \underline{I}_C &= \frac{U_\Phi}{3n^2 \underline{Z}_1} 4\underline{a}^2. \end{aligned} \quad (15)$$

Проверка правильности выражений (15):

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0;$$

$$4\underline{a}^2 - 8\underline{a}^2 + 4\underline{a}^2 + j^3 \sqrt{3} \underline{a} \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}} - j^3 \sqrt{3} \underline{a} \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}} = 0.$$

Определение параметров фазопреобразующих элементов ТПЧФ-1. Для определения параметров фазопреобразующих элементов разложим систему токов (15) на симметричные составляющие и определим выражение комплексного коэффициента обратной последовательности токов $\underline{K}_{2i} = \frac{\underline{I}_2}{\underline{I}_1}$:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \frac{U_\Phi}{3n^2 \underline{Z}_1} \left(-4 - 3 \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}} \right); \quad \underline{I}_2 = \frac{U_\Phi}{3n^2 \underline{Z}_1} \left(-4\underline{a} + 3\underline{a}^2 \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}} \right); \\ \underline{I}_0 &= \frac{U_\Phi}{9n^2 \underline{Z}_1} \left[(4\underline{a}^2 - 8\underline{a}^2 + 4\underline{a}^2) + \right. \\ &\quad \left. + j \left(3\sqrt{3} \underline{a} \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}} - 3\sqrt{3} \underline{a} \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}} \right) \right] = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Система токов в первичной цепи трансформатора будет симметричной при условии, если $\underline{K}_{2i} = 0$ или $\underline{I}_2 = 0$, так как ток нулевой последовательности (16) в этой цепи отсутствует. Приравняв в (16) $\underline{I}_2 = 0$, получим

$$-4\underline{a} \underline{Z} + 3\underline{a}^2 \underline{Z}_1 = 0. \quad (17)$$

Подставив в (17) выражения (2), (3), (14) и приравняв к нулю отдельно вещественную и мнимую части этого уравнения, получим два уравнения:

$$3x_1 x_2 - 3x_1 x_H + 3\sqrt{3} x_1 R_H - 8x_2 x_H = 0; \quad (18)$$

$$3x_1 R_H - 3\sqrt{3} x_1 x_2 + 3\sqrt{3} x_1 x_H + x_2 R_H = 0,$$

в результате решения которых находим сопротивления фазопреобразующих элементов:

$$x_1 = \frac{2(R_H^2 + x_H^2)}{\sqrt{3}R_H} = \frac{2Z_H}{\sqrt{3}\cos\varphi_H}; \quad (19)$$

$$x_2 = \frac{\sqrt{3}(R_H^2 + x_H^2)}{\sqrt{3}x_H - R_H} = \frac{\sqrt{3}Z_H}{2\sin(\varphi_H - 30^\circ)}. \quad (20)$$

Из (19) и (20) следует, что при изменении угла нагрузки φ_H в диапазоне от 30° до 90° ($\cos\varphi_H = 0,866 \div 0$), оба симметрирующих элемента ТПЧФ-1 имеют ёмкостный характер. При $\varphi_H = 30^\circ$, $x_2 = \infty$, т.е. фазопреобразование осуществляется при наличии в схеме одного элемента. При углах $\varphi_H < 30^\circ$ симметрирование возможно при условии, если второй элемент будет иметь индуктивный характер.

Определение токов ТПЧФ-1. Подставив (2), (3), (14), (19) и (20) в уравнения (15), получим симметричную систему токов в первичной цепи трансформатора:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \frac{2U_\Phi \cos\varphi_H}{\sqrt{3}n^2 Z_H} e^{-j150^\circ} = \frac{2I_H \cos\varphi_H}{3n} e^{-j150^\circ}; \\ \underline{I}_B &= \frac{2U_\Phi \cos\varphi_H}{\sqrt{3}n^2 Z_H} e^{-j90^\circ} = \frac{2I_H \cos\varphi_H}{3n} e^{-j90^\circ}; \\ \underline{I}_C &= \frac{2U_\Phi \cos\varphi_H}{\sqrt{3}n^2 Z_H} e^{-j30^\circ} = \frac{2I_H \cos\varphi_H}{3n} e^{-j30^\circ}, \end{aligned} \quad (21)$$

где $I_H = \frac{\sqrt{3}U_\Phi \cos\varphi_H}{nZ_H}$ — модуль тока однофазной нагрузки.

Используя уравнения (7)—(14) и выражения (19), (20), определяем токи фазопреобразующих элементов:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \frac{\sqrt{3}U_\Phi \cos\varphi_H}{nZ_H} e^{j150^\circ} = I_H \cos\varphi_H e^{j150^\circ}; \\ \underline{I}_2 &= \frac{2U_\Phi \sin(\varphi_H - 30^\circ)}{nZ_H} e^{-j60^\circ} = \frac{2}{\sqrt{3}} I_H \sin(\varphi_H - 30^\circ) e^{-j60^\circ}; \end{aligned} \quad (22)$$

комплекс тока однофазной нагрузки

$$\underline{I}_H = I_H e^{-j(150^\circ - \varphi_H)}; \quad (23)$$

токи во вторичных обмотках трансформатора:

$$\begin{aligned} \underline{I}_a &= \frac{U_\Phi \cos\varphi_H}{nZ_H} e^{j60^\circ} = \frac{I_H \cos\varphi_H}{\sqrt{3}} e^{j60^\circ}; \\ \underline{I}_b &= \frac{U_\Phi \cos\varphi_H}{nZ_H} e^{-j120^\circ} = \frac{I_H \cos\varphi_H}{\sqrt{3}} e^{-j120^\circ}; \\ \underline{I}_c &= \frac{\sqrt{3}U_\Phi \cos\varphi_H}{nZ_H} e^{j150^\circ} = I_H \cos\varphi_H e^{j150^\circ}. \end{aligned} \quad (24)$$

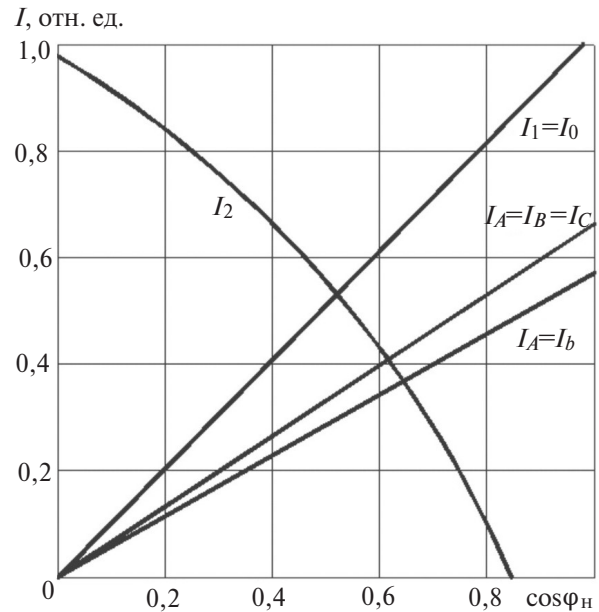


Рис. 3. Зависимости токов ТПЧФ-1 от $\cos\varphi_H$ при $n=1$, $I_H = I_{H,ном}$

На основании выражений (21)—(24) на рис. 3 построены зависимости токов ТПЧФ-1 от коэффициента мощности однофазной нагрузки, из которого следует, что с изменением $\cos\varphi_H$ изменяются по значению токи первичных и вторичных обмоток трансформатора, а также токи фазопреобразующих элементов.

Определение напряжений ТПЧФ-1. Используя (1), по заданным \underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C находим напряжения на вторичных обмотках трансформатора:

$$\underline{U}_a = \frac{U_\Phi}{n} e^{-j180^\circ}; \quad \underline{U}_b = \frac{U_\Phi}{n} e^{j60^\circ}; \quad \underline{U}_c = \frac{U_\Phi}{n} e^{-j60^\circ}, \quad (25)$$

а из уравнений (10), (11) с учётом (25) определяем напряжения на фазопреобразующих элементах и однофазной нагрузке:

$$\underline{U}_1 = \frac{2U_\Phi}{n} e^{j60^\circ}; \quad \underline{U}_2 = \underline{U} = \frac{\sqrt{3}U_\Phi}{n} e^{-j150^\circ}. \quad (26)$$

На основании выражений (21)—(26) на рис. 4 построена векторная диаграмма для ТПЧФ-1 при номинальной нагрузке и $\varphi_H = 60^\circ$ (токи и напряжения — в отн. ед.). За базисные значения приняты номинальный ток однофазной нагрузки $I_6 = I_{H,ном}$ и фазное напряжение первичной обмотки трансформатора $I_6 = I_\Phi$.

Из векторной диаграммы следует, что при симметричной системе токов в первичных обмотках трансформатора система токов во вторичных его обмотках несимметрична, причём $I_a = I_b$, $I_c = \sqrt{3}I_a$. С изменением угла φ_H изменяются по значению все токи (рис. 4), однако фазы этих токов остаются неизменными.

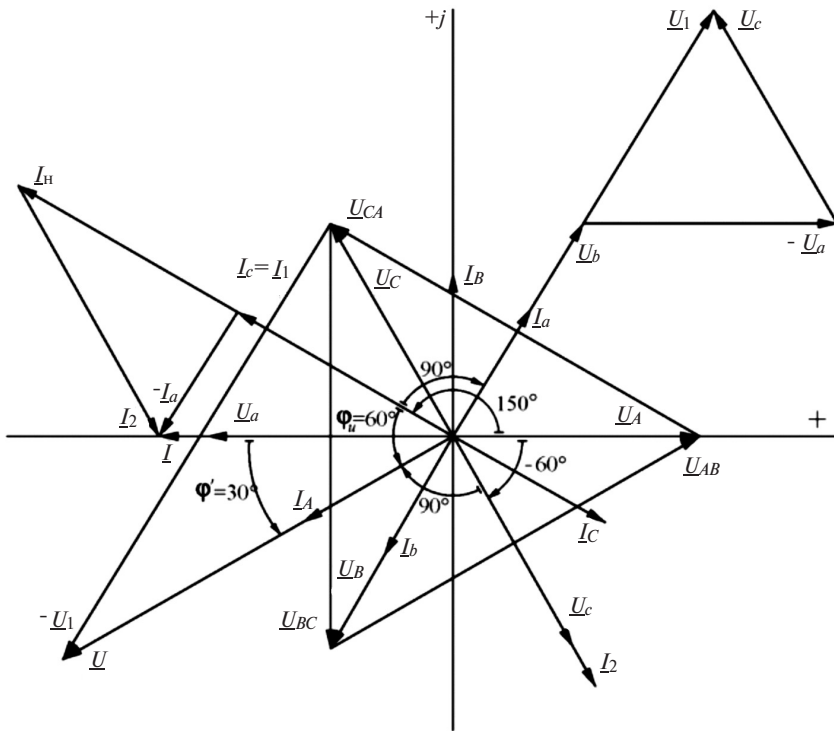


Рис. 4. Векторная диаграмма для ТПЧФ-1 при номинальной нагрузке, $\varphi_H = 60^\circ, n = 1$

Определение симметричных составляющих системы вторичных токов. Разложим несимметричную систему МДС вдоль замкнутого контура вторичной обмотки трансформатора на симметричные составляющие:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 w_2 &= \frac{2 I_H w_2 \cos \varphi_H}{3} e^{j30^\circ}; \\ \dot{I}_2 w_2 &= 0; \\ \dot{I}_0 w_2 &= \frac{I_H w_2 \cos \varphi_H}{3} e^{j150^\circ}. \end{aligned} \quad (27)$$

Токами первичных обмоток трансформатора (21) создаётся симметричная система МДС прямой последовательности:

$$\dot{I}_A w_2 = \frac{2 I_H w_2 \cos \varphi_H}{3} e^{-j150^\circ}. \quad (28)$$

Из (27) и (28) следует, что $\dot{I}_1 w_2 = -\dot{I}_A w_1$, т.е. составляющая МДС прямой последовательности вторичной обмотки трансформатора полностью уравновешивается МДС первичной обмотки. Остается неуравновешенной составляющая МДС нулевой последовательности. Для компенсации этой МДС необходимо предусмотреть дополнительную компенсационную обмотку или соединить первичные обмотки трансформатора в треугольник [6].

Определение мощностей ТПЧФ-1 и емкостей фазообразующих элементов. Комплексные мощности однофазной нагрузки \underline{S}_H , фазообразующих

элементов S_1, S_2 и трансформатора S_{BX} определяем на основании (4), (21)–(23) и (26):

$$\underline{S}_H = \underline{U} \underline{I}_H^* = S_H e^{j\varphi_H}; \quad (29)$$

$$\underline{S}_1 = \underline{U} \underline{I}_1^* = \frac{2}{\sqrt{3}} S_H \cos \varphi_H e^{-j90^\circ}; \quad (30)$$

$$\underline{S}_2 = \underline{U} \underline{I}_2^* = \frac{2}{\sqrt{3}} S_H \sin(\varphi_H - 30^\circ) e^{-j90^\circ}; \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \underline{S}_{BX} &= \underline{U}_A \underline{I}_A^* + \underline{U}_B \underline{I}_B^* + \underline{U}_C \underline{I}_C^* = \\ &= -S_H \cos \varphi_H + j \frac{1}{\sqrt{3}} S_H \cos \varphi_H. \end{aligned} \quad (32)$$

Для составления баланса мощностей найдем сумму комплексных мощностей нагрузки и фазообразующих элементов:

$$\begin{aligned} \underline{S}_H + \underline{S}_1 + \underline{S}_2 &= \\ &= S_H \cos \varphi_H - j \frac{1}{\sqrt{3}} S_H \cos \varphi_H. \end{aligned} \quad (33)$$

Сравнение (32) и (33) показывает, что баланс активных и реактивных мощностей имеет место, т.е. подтверждается, таким образом, правильность полученных выражений. Наличие противоположных знаков у комплексов входной (32) и выходной (33) мощности трансформатора объясняется тем, что для коэффициента трансформации (1) принято комплексное выражение [7].

Как видно из (33), угол сдвига фаз на входе ТПЧФ-1, а следовательно и его коэффициент мощности, не зависят от нагрузки:

$$\operatorname{tg} \varphi_{BX} = \frac{Q_{BX}}{P_{BX}} = -\frac{1}{\sqrt{3}}; \quad \varphi_{BX} = -30^\circ; \quad \cos \varphi_{BX} = 0,866.$$

Установленные значения мощности фазообразующих элементов на основании (30) и (31) изменении угла φ_H в диапазоне от 30° до 90° ($\cos \varphi_H = 0,866 \div 0$) равны:

$$Q_{1y} = \frac{2}{\sqrt{3}} S_H \cos 30^\circ = S_H;$$

$$Q_{2y} = \frac{2}{\sqrt{3}} S_H \sin(90^\circ - 30^\circ) = S_H.$$

Таким образом, установленная реактивная мощность фазосдвигающих элементов $Q_{2y} = Q_{1y} + Q_{2y} = 2S_H$, однако максимальная суммарная мощность этих элементов в указанном диапазоне не изменения φ_H не превышает $1,15S_H$ (рис. 5). В

практических условиях диапазон изменения $\cos\varphi_H$ однофазной нагрузки, как правило, значительно меньше принятого диапазона. Поэтому установленная мощность фазообразующих элементов будет менее $2S_H$.

Зная реактивные мощности фазообразующих элементов (30) и (31), нетрудно определить ёмкости конденсаторных батарей:

$$C_1 = \frac{\sqrt{3}I_H \cos\varphi_H}{2\omega U}; \quad C_2 = \frac{2I_H \sin(\varphi_H - 30^\circ)}{\sqrt{3}\omega U}, \quad (34)$$

или в относительных единицах, приняв базисную ёмкость $C_6 = I_{H,ном} / \omega U$;

$$C_1^* = \frac{C_1}{C_6} = \frac{\sqrt{3}I_H \cos\varphi_H}{2I_{H,ном}}; \quad (35)$$

$$C_2^* = \frac{C_2}{C_6} = \frac{2I_H \sin(\varphi_H - 30^\circ)}{\sqrt{3}I_{H,ном}},$$

где ω — угловая частота.

Как видно из (34) и графиков рис. 5 и 6, ёмкости конденсаторных батарей при изменении нагрузки необходимо регулировать по двум параметрам: по току и углу φ_H ($\cos\varphi_H$) нагрузки.

Технико-экономическое обоснование системы электропередачи. Один из авторов статьи — А.О. Филиппов, работая в ПЦ «Западсельэнергопроект» ОАО «СЕВЗАП НТЦ», провел технико-экономическое обоснование двухпроводной системы электропередачи, результаты которого приведены далее [8].

Объект для централизованного электроснабжения удален от источника питания на расстояние

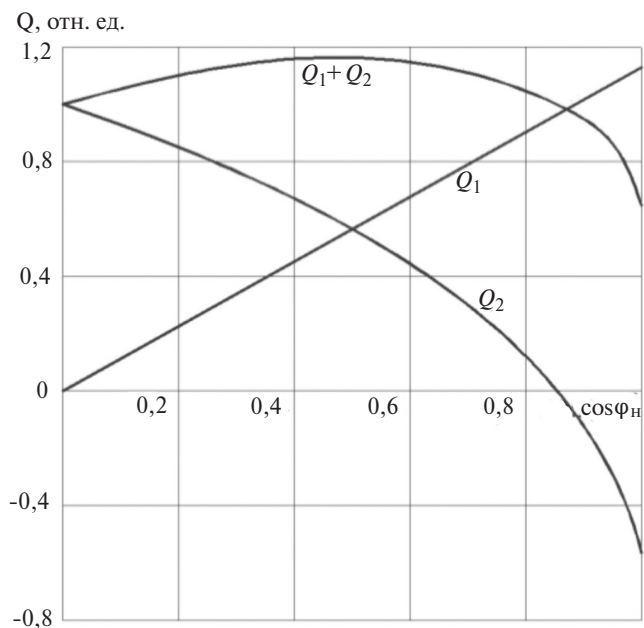


Рис. 5. Зависимости реактивных мощностей фазообразующих элементов ТПЧФ-1 от $\cos\varphi_H$ при $n=1$, $I_H=I_{H,ном}$

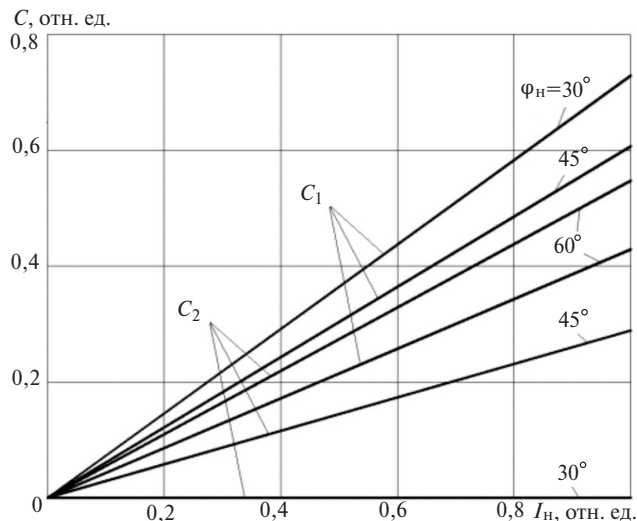


Рис. 6. Зависимости ёмкостей фазообразующих элементов ТПЧФ-1 от тока нагрузки

10 км, активная мощность которого равна $P_{ном} = 80$ кВт, $\cos\varphi_H = 0,8$, $U_{ном} = 380$ В, $S_{ном} = 100$ кВА.

Рассмотрим два варианта электроснабжения удаленного от источника питания объекта.

Первый вариант. Электроснабжение объекта осуществляется по трёхфазной трёхпроводной ВЛ 10 кВ с установленной на потребительской подстанции трёхфазного трансформатора 10/0,4 кВ.

Второй вариант. Электроснабжение того же объекта осуществляется по двухпроводной ВЛ 10 кВ с установкой на подстанции трансформаторного преобразователя числа фаз 10/0,4 кВ, с помощью которого однофазное напряжение преобразуется в трёхфазную симметричную систему напряжений.

После выбора оборудования для двух вариантов электроснабжения объекта установлено: ВЛ 10 кВ для первого варианта выполнена проводом марки СИП-3 сечением 70 мм^2 ; во втором варианте ВЛ 10 кВ выполнена двухпроводной проводом марки СИП-2 сечением 70 мм^2 .

Капитальные затраты на электроснабжение объекта по рассматриваемым двум вариантам будут отличаться в связи с различными затратами на ВЛ 10 кВ, так как в первом варианте ВЛ 10 кВ трёхпроводная, а во втором варианте — двухпроводная (провод одинакового сечения 70 мм^2).

Капитальные затраты на потребительские подстанции будут примерно одинаковы, так как в обоих вариантах применяется один и тот же трансформатор ТМГ-100/10-У1(ХЛ1). Во втором варианте ТПЧФ содержит две конденсаторные батареи, которые являются фазообразующими элементами. Они же одновременно являются устройствами для компенсации реактивной мощности трёхфазной нагрузки.

Если учесть, что в первом варианте тоже необходима компенсация реактивной мощности нагрузки, то на трансформаторной подстанции следует установить конденсаторные батареи.

Таким образом, трансформаторные подстанции по первому и второму вариантам с точки зрения капитальных затрат будут одинаковыми. Поэтому рассчитываем капитальные затраты только на ВЛ 10 кВ протяжённостью 10 км:

по первому варианту — трёхпроводная ВЛ 10 кВ;
по второму варианту — двухпроводная ВЛ 10 кВ.

Расчёты сметной стоимости строительства ВЛ 10 кВ приведены далее.

Затраты	Стоимость, тыс.руб	
	1 вариант	2 вариант
Сметная стоимость в том числе:	4697,58	3209,83
оборудования	324,3	264,59
монтажных работ	30,92	25,51
строительных работ	4342,36	2919,73
Разность сметной стоимости по 1 и 2 вариантам	1487,75	
Отношение сметной стоимости по 1 и 2 вариантам	1,46	

Из приведенных данных видно, что сметная стоимость на строительство трёхпроводной ВЛ 10 кВ выше на 1487,5 тыс. руб. или иначе, двухпроводная ВЛ 10 кВ почти в 1,5 раза дешевле трёхпроводной ВЛ 10 кВ.

Вывод. Предложенный способ анализа трансформаторных преобразователей числа фаз позволяет определять зависимости параметров фазообразующих элементов, токов, напряжений и мощностей от значения нагрузки и её коэффициента мощности, необходимые при проектировании системы электропередачи.

Сметная стоимость на строительство двухпроводной ВЛ 10 кВ почти в 1,5 раза меньше сметной стоимости на строительство трёхпроводной ВЛ 10 кВ. Отсюда очевидно преимущество трансформаторных преобразователей числа фаз для электрооборудования отдельных удаленных от источников питания объектов, особенно расположенных в труднодоступных районах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Нейман Л.Р., Глинтнерник С.Р., Емельянов А.В., Новицкий В.Г.** Электропередача постоянного тока как элемент энергетических систем. — Изд. АН СССР, 1962, 340 с.
2. **Рошин О.А.** Резонансная система электроснабжения сельскохозяйственных потребителей малой мощности: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 2006.
3. **Патент РФ №2255405.** Способ и устройство для передачи электрической энергии/Д.С. Стребков, Ф.С. Бурганов и др. — БИ, 2004, № 18.
4. **Патент РФ №2273939.** Способ и устройство для передачи электрической энергии/ Д.С. Стребков, А.И. Некрасов. — БИ, 2006, №10.

5. **Патент РФ №2532534.** Устройство передачи электрической энергии трехфазного тока по двухпроводной линии/Ф.Д. Косоухов, А.О. Филиппов, Н.В. Васильев, А.Л. Борошнин. — БИ, 2014, №31.

6. **Костенко М.П.** Электрические машины. Часть общая. — М.; Л.:Госэнергоиздат, 1944, 815 с.

7. **Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В.** Основы теории цепей. — М.: Энергия, 1975, 752 с.

8. **Филиппов А.О.** Трансформаторный преобразователь числа фаз для питания трехфазных электродвигателей от однофазной сети: II Всероссийский конкурс молодых специалистов инженерингового профиля в области электроэнергетики. Работы молодых специалистов ОАО Краснодарский край 18—22 сентября 2007 г. «СЕВЗАП НТЦ». СПб, 2007, 158 с.

[25.01.2018]

А в т о р: Косоухов Федор Дмитриевич окончил Ленинградский институт механизации сельского хозяйства в 1954 г. В 1991 г. защитил докторскую диссертацию «Методы расчета, способы и средства снижения потерь электрической энергии и повышения ее качества в сельских распределительных сетях 0,38 кВ при несимметричной нагрузке» в С. Петербургском государственном аграрном университете (СПбГАУ). Профессор кафедры Электроэнергетика и электрооборудование (ЭЭиЭО) СПбГАУ.

Васильев Николай Валерьевич окончил факультет электрификации сельского хозяйства СПбГАУ в 2003 г. В 2008 г. защитил кандидатскую диссертацию «Снижение потерь электрической энергии в сети 0,38 кВ, обусловленных нелинейностью тепличных облучательных установок, путем модернизации пускорегулирующей аппаратуры» в СПбГАУ. Доцент, заведующий кафедрой ЭЭиЭО СПбГАУ,

Борошнин Александр Леонидович окончил факультет электрификации сельского хозяйства СПбГАУ в 2002 г. Генеральный директор ООО «Энергоконтроль».

Филиппов Антон Олегович окончил факультет электрификации сельского хозяйства СПбГАУ в 2007 г. В 2010 г. защитил кандидатскую диссертацию «Снижение потерь электрической энергии в сельских сетях 0,38 кВ с помощью трансформаторного симметрирующего устройства» в СПбГАУ. Сотрудник ФГБУ «Российское энергетическое агентство» Минэнерго РФ.

Горбунов Алексей Олегович окончил факультет электрификации сельского хозяйства СПбГАУ в 2007 г. Сотрудник ООО «Контел».

Терецкий Максим Юрьевич окончил факультет электрификации сельского хозяйства СПбГАУ в 2007 г. В 2012 г. защитил кандидатскую диссертацию «Снижение потерь и повышение качества электрической энергии в сельских распределительных сетях 0,38 кВ при несимметричной нагрузке с помощью трансформатора «звезда-звезда с нулем с симметрирующим устройством» в СПбГАУ. Сотрудник кафедры ЭЭиЭО СПбГАУ.

A Two-Wire Three-Phase Current Power Transmission Line

KOSOUKHOV Fedor D. (St. Petersburg State Agrarian University (St. PSAU), St. Petersburg, Russia) – Professor. Dr. Sci. (Eng.)

VASIL'YEV Nikolay V. (StPSAU, St. Petersburg, Russia) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

BOROSHININ Alexander L. (LTD «Energokontrol» St. Petersburg, Russia) – Director General

FILIPPOV Anton O. (FGBU «Russian Power Agency» of Ministry of Energy of Russian Federation, Russia) – Employee, Cand. Sci. (Eng.)

GORBUNOV Alexi O. (LTD «Kontel», St. Petersburg, Russia) – Employee

TEREMETSKII Maxim Yu. (StPSAU, St. Petersburg, Russia) – Employee

The considered two-wire three-phase current power transmission system contains two phase number transformer converters (PNTC). The first converter (PNTC-1) converts the symmetrical system of three-phase currents of the power supply source into a single-phase current with concurrently increasing the voltage of the two-wire line via which the electric power is transmitted over a significant distance to the second converter (PNTC-2). The second converter reduces the voltage and converts the single-phase current into a symmetrical system of three-phase currents. Currents are converted in each transformer converter by means of a three-phase transformer having a special winding connection diagram and two capacitor banks (phase converting elements). The article presents the PNTC-1 analysis results based on which mathematical expressions have been obtained for the impedances of the phase converting elements and for the voltage, current and power capacity of these elements, transformer, and load. The phasor diagram for the PNTC-1 has been drawn along with graphic dependences of the converter currents and reactive power values of the phase converting elements as a function of load $\cos\varphi_L$, and the dependences of capacitor bank capacitances on the load current. Mathematical expressions for all parameters of the PNTC-2 are given.

Key words: two-wire electric power transmission system, three-phase current, phase number transformer converter, converter circuit analysis, mathematical expressions

REFERENCES

1. Neiman L.R., Glinernik S.R., Yemel'yanov A.V., Novitskii V.G. *Elektroperedacha postoyannogo toka kak element energeticheskikh system* (Electricity transmission of direct-current as element of the power systems). Moscow, Publ. Academy of sciences of the USSR, 1962, 340 p.
2. Roshchin O.A. *Resonansnaya sistema elektrosnabzheniya sel'skokhozyaistvennykh potrebitelei...* (Resonant system of power supply for agricultural consumers...): Diss. for the Degree of Cand. Sci. (Eng.). Moscow, 2006.
3. Pat. RF No. 2255405. *Sposob iustroistvo dlya peredachi elektricheskoi energii* (Method and device for the transmission of electric energy)/D.S. Strebkov, F.S. Burganov et al. – Bulletin of invention, 2004, No. 18.
4. Pat. RF No. 2273939. *Sposob i ustroistvo dlya peredachi elektricheskoi energii* (Method and device for the transmission of electric energy)/D.S. Strebkov, A.I. Nekrasov. – Bulletin of invention, 2006, No. 1.

5. Pat. RF No.2532534. *Ustroistvo peredachi elektricheskoi energii trekhfaznogo toka po dvykhprovodnoi linii* (Device of transmission of electric energy of three-phase current on a diphasic line)/F.D. Kosoukhov, A.O. Filippov, N.V. Vasil'yev, A.L. Boroshnin. Bulletin of invention, 2014, No. 31.

6. Kostenko M.P. *Elektricheskiye mashiny. Chast' obshchaya* (Electric machines. Part general). Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat, 1944, 815 p.

7. Zeveke G.V., Ionkin P.A., Netushil A.V., Strakhov S.V. *Osnovy teorii tsepei* (Bases of theory of chains). Moscow, Publ. Energiya, 1975, 752 p.

8. Filippov A.O. *II Vserossiiskii konkurs molodykh specialistov inzhiniringovo profilya v oblasti elektroenergetiki* (All-russian competition of young specialists of engineering profile in ared of electroenergy). Working as young specialists of Open Corporation «North-western Scientific and Technical center» «NWSTC». Krasnodar edge, on September, 18–22, 2007.

[25.01.2018]