

Ю.А. Сиротин

СТРУКТУРНОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ ПРОЦЕССОВ В ТРЕХФАЗНОЙ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНОЙ ЦЕПИ И КОМПЕНСАЦИЯ ТОКА НЕЙТРАЛИ

Проведено аналіз 0-складової струму і напруги в чотирьохпровідному колі. Показано як виділити частину кола без 0-складових струму і напруги, еквівалентну вихідному колу по миттєвій потужності без 0-складової. Для синусоїдальних процесів з несиметричною напругою запропоновано алгоритм визначення провідностей LC елементів компенсатора струму нейтралі. При симетричній напрузі викладена методика розрахунку реактивних провідностей 0-компенсатора по провідностям навантаження. Розібрані приклади розрахунків.

Проведен анализ 0-составляющей тока и напряжения в четырехпроводной цепи. Показано как выделить часть цепи без 0-составляющих тока и напряжения, эквивалентную исходной цепи по мгновенной мощности без 0-составляющей. Для синусоидальных процессов с несимметричным напряжением предложен алгоритм определения проводимостей LC элементов компенсатора тока нейтрали. При симметричном напряжении изложена методика расчета реактивных проводимостей 0-компенсатора по проводимостям нагрузки. Разобраны примеры расчетов.

ВСТУПЛЕНИЕ

В 3-проводной цепи (в силу 1 закона Кирхгофа) сумма трех линейных токов равна нулю (трехфазный ток не содержит 0-последовательность). Поэтому *мгновенная мощность* (ММ) инвариантна к выбору точки отсчета (ТО) напряжений трех фаз сечения $\langle A, B, C \rangle$. Сумма трех фазных напряжений, измеренных относительно «искусственного заземления» (ИЗ), равна нулю (трехфазное напряжение не содержит 0-последовательность). ИЗ определено центром симметричной звезды с произвольными, но одинаковыми сопротивлениями, которые подключены в сечение $\langle A, B, C \rangle$. Тем самым энергетические процессы в 3-проводной цепи с ИЗ не содержат 0-последовательность тока и напряжения. Это позволяет считать их *двумерными*.

Наличие нейтрали в 4-проводной цепи при несимметричной нагрузке приводит к появлению 0-последовательности тока. Однако *мгновенная мощность* 4-проводной цепи инвариантна к выбору точки отсчета (ТО) четырех напряжений (трех фазных напряжений и напряжения нейтрали), что позволяет в качестве ТО напряжений выбрать нулевой провод (не изменяя величину ММ) и в каждый момент времени энергетические процессы в 4-проводной цепи считать *трехмерными*.

Если в 4-х проводной цепи исключить (скомпенсировать) 0-последовательность тока и выбрать «искусственное заземление» в качестве ТО, то такая цепь математически становится эквивалентной 3-х проводной цепи с двумерными процессами, что упрощает анализ энергетических процессов [1].

Компенсация 0-последовательности тока позволяет в точке подключения 4-проводной нагрузки отключить ее нейтральный провод от нейтрали 4-х проводной сети и замкнуть его на нейтраль компенсатора 0-последовательности. Это позволяет уменьшить нагрузку на нейтраль всей сети.

Тем самым задача компенсации 0-последовательности тока имеет самостоятельный как научный так и практический смысл.

ТОК И НАПРЯЖЕНИЕ 0-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ 4-ПРОВОДНОЙ ЦЕПИ

Орт 0-последовательности

$$e_0 = (1/\sqrt{3})[1, 1, 1]^T, |e_0| = 1 \quad (1)$$

три фаз (сечения $\langle A, B, C \rangle$) позволяет произвольный 3d-вектор столбец $x = (x_a, x_b, x_c)^T$ разложить на ортогональные составляющие (здесь и дальше τ – операция транспонирования):

$$x = x_0 + (x - x_0) = x_0 + x_\Delta; \quad x_0 \perp x_\Delta. \quad (2.a)$$

В разложении (1) компонента

$$x_0 = (x^\tau e_0) e_0 = \frac{x_a + x_b + x_c}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.б)$$

является проекцией вектора $x = (x_a, x_b, x_c)^T$ на орт 0-последовательности и равна 0-составляющей этого вектора. Прямыми вычислениями можно проверить, что вторая компонента разложения (2.a) равна

$$x_\Delta = x - x_0 = \begin{bmatrix} 2x_a - x_b - x_c \\ 2x_b - x_a - x_c \\ 2x_c - x_a - x_b \end{bmatrix} \quad (2.в)$$

Составляющая (2.в) является ортогональным дополнением составляющей (2.б) до полного вектора и не содержит 0-составляющей.

При измерении напряжения в сечении $\langle A, B, C \rangle$ относительно нейтрали 4-проводной системы ММ

$$p(t) = u_a(t)i_a(t) + u_b(t)i_b(t) + u_c(t)i_c(t) = u^\tau i \quad (3)$$

в каждый момент времени равна скалярному произведению 3-х мерных векторов мгновенных значений (м.з.) тока и напряжения трех фаз

$$u = (u_a(t), u_b(t), u_c(t))^T, \quad i = (i_a(t), i_b(t), i_c(t))^T. \quad (4)$$

В силу ортогональности разложения (2.a) в каждый момент времени для 3d-кривых тока и напряжения

$$i = i_0 + i_\Delta, \quad u = u_0 + u_\Delta \quad (5)$$

скалярное произведение (3) представляется как

$$\mathbf{u}^\tau \mathbf{i} = \underbrace{\mathbf{u}_0^\tau \mathbf{i}_0}_{p_0(t)} + \underbrace{\mathbf{u}_\Delta^\tau \mathbf{i}_\Delta}_{p_\Delta(t)}, \quad p(t) = p_0(t) + p_\Delta(t). \quad (6)$$

Вектор напряжений $\mathbf{u}_\Delta = \mathbf{u} - (\mathbf{u}^\tau \mathbf{e}_0) \mathbf{e}_0$ не содержит 0-последовательности. Тем самым, три напряжения, которые в него входят, измерены относительно ИЗ.

Все три координаты вектора напряжений 0-последовательности

$$u_0 = (\mathbf{u}^\tau \mathbf{e}_0) \mathbf{e}_0 = (\tilde{u}, \tilde{u}, \tilde{u})^\tau \quad (7)$$

одинаковы

$$\tilde{u} = \tilde{u}(t) = (u_a(t) + u_b(t) + u_c(t))/3$$

и равны разности напряжений между нейтралью и фиктивной точкой отсчета для сечения $\langle A, B, C \rangle$.

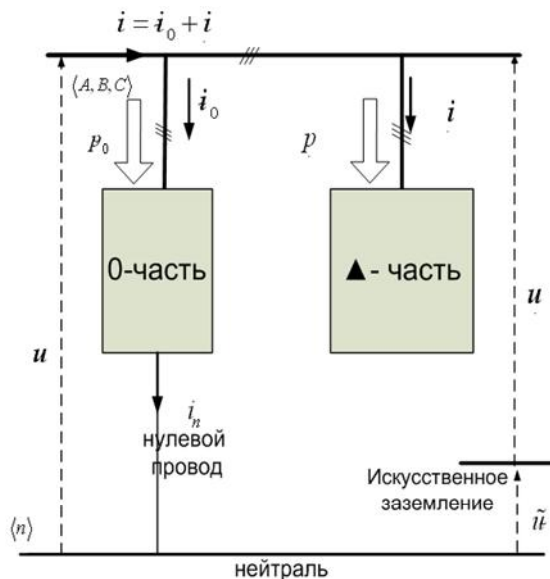


Рис. 1. Структурное представление 4-проводной цепи

В моменты времени t , когда полный ток не содержит 0-компоненту ($i_0(t) = 0$):

- ток в нейтрали $i_n(t)$ 4-проводной системы отсутствует:

$$i_n(t) = \sqrt{3}i_0(t) = 0; \quad (8.a)$$

- полная ММ не содержит 0-последовательности ММ

$$p_0(t) = i_0(t)u_0(t); \quad (8.б)$$

- мгновенная мощность

$$\mathbf{u}^\tau \mathbf{i} = (\mathbf{u}_\Delta)^\tau \mathbf{i}_\Delta, \quad p(t) = p_\Delta(t) \quad (8.в)$$

определена компонентой тока i_Δ без 0-последовательности и компонентой напряжения \mathbf{u}_Δ измеренного относительно ИЗ.

0-последовательность тока однозначно связана с током в нейтрали. 0-последовательность напряжения однозначно связана с выбором точки отсчета напряжения. Таким образом, вычитание в каждой фазе из полного тока величины

$$i_n(t)/3 = (i_a(t) + i_b(t) + i_c(t))/3 \quad (9)$$

приводит к компенсации тока 0-компоненты и тем самым к удалению тока нейтрали. Если ток нейтрали (тождественно) равен нулю, то мощность 0-

последовательности равна нулю $p_0(t)=0$. Такая 4-проводная схема с компенсированным током 0-последовательности эквивалентна 3-проводной схеме, в которой напряжения фаз измеряются относительно ИЗ для трех фаз (а не относительно нейтрального провода). Нулевой провод можно отключить, так как ток в нем равен нулю. Если 0-последовательность напряжения 4-проводной системы равна нулю $u_0(t)=0$, то мощность $p_0(t)=0$, а результаты измерения напряжения относительно нейтрали и искусственной ТО совпадают.

В матричном виде компонента (2.в) записывается как

$$\mathbf{x}_\Delta = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_{\tilde{n}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x}_\Delta = \hat{D}_\Delta \mathbf{x}. \quad (10)$$

Матрица

$$\hat{D}_\Delta = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (11.a)$$

обладает свойством

$$\hat{D}_\Delta \cdot \hat{D}_\Delta = \hat{D}_\Delta. \quad (11.б)$$

Вектор напряжений

$$\mathbf{u}_\Delta = \hat{D}_\Delta \mathbf{u} \quad (12)$$

не содержит 0-последовательности и равен вектору фазных напряжений, измеренному относительно ИЗ.

Алгоритм (12) позволяет измерять фазное напряжение \mathbf{u} относительно произвольной ТО и переводить его в напряжение относительно искусственного заземления. Если исходное напряжение не содержит 0-последовательности, то в силу (11.б) $\hat{D}_\Delta \mathbf{u} = \mathbf{u}$.

КОМПЕНСАЦИЯ ТОКА НЕЙТРАЛИ В СИНУСОИДАЛЬНОМ РЕЖИМЕ

В трёхпроводном сечении $\langle A, B, C \rangle$ трехфазной системы с синусоидальными процессами

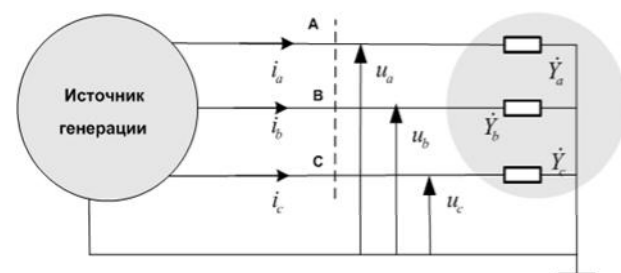


Рис. 2. 3-фазная 4-проводная схема

м.з. напряжения и тока

$$\mathbf{u} = (u_a(t), u_b(t), u_c(t))^\tau = \sqrt{2} \operatorname{Re}[\mathbf{U}e^{j\omega t}], \quad (13)$$

$$\mathbf{i} = (i_a(t), i_b(t), i_c(t))^\tau = \sqrt{2} \operatorname{Re}[\mathbf{I}e^{j\omega t}] \quad (14)$$

однозначно определены трехмерными комплексными векторами (3- комплексными) напряжения и тока

$$\mathbf{U} = (\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c)^\tau, \quad \mathbf{I} = (\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c)^\tau.$$

3-комплексы (вектора комплексных действующих величин) определяются как

$$\mathbf{U} = \frac{\sqrt{2}}{T} \int_s^{s+T} \mathbf{u}(t) e^{-j\omega t} dt, \quad \mathbf{I} = \frac{\sqrt{2}}{T} \int_s^{s+T} \mathbf{i}(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (15)$$

где T – период ($T\omega=2\pi$), s – произвольное число ≥ 0 . В частности, м.з. токов и напряжений 0-последовательности в синусоидальном режиме

$$\mathbf{u}_0(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re}[\mathbf{U}_0 e^{j\omega t}], \quad (16.a)$$

$$\mathbf{i}_0(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re}[\mathbf{I}_0 e^{j\omega t}] \quad (16.б)$$

однозначно определены 3-комплексами напряжения и тока 0-последовательности

$$\mathbf{U}_0 = (\mathbf{U}^\tau \mathbf{e}_0) \mathbf{e}_0, \quad \mathbf{I}_0 = (\mathbf{I}^\tau \mathbf{e}_0) \mathbf{e}_0. \quad (16.в)$$

Из (5) следует разложение 3-комплексов

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}_0 + \mathbf{U}_\Delta, \quad \mathbf{I} = \mathbf{I}_0 + \mathbf{I}_\Delta, \quad (16.г)$$

где $\mathbf{U}_\Delta = \hat{D}_\Delta \mathbf{U}$, $\mathbf{I}_\Delta = \hat{D}_\Delta \mathbf{I}$ – 3-комплексы напряжения и тока без 0-последовательности. В синусоидальном режиме 3-комплексы напряжений и токов в нагрузке цепи (рис. 2) связаны тремя законами Ома

$$\begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{Y}_a \dot{U}_a \\ \dot{I}_b &= \dot{Y}_b \dot{U}_b, \quad \mathbf{I} = \hat{Y} \mathbf{U}. \\ \dot{I}_c &= \dot{Y}_c \dot{U}_c \end{aligned} \quad (17)$$

Матрица комплексных проводимостей фаз нагрузки – диагональная $\hat{Y} = \operatorname{diag}\{\dot{Y}_a, \dot{Y}_b, \dot{Y}_c\}$. В общем случае нагрузка несимметрична $\dot{Y}_a \neq \dot{Y}_b \neq \dot{Y}_c$.

0-последовательность тока трехфазной нагрузки

$$\mathbf{I}_0 = \dot{I}_0 \mathbf{e}_0 = \frac{1}{3} (\dot{Y}_a \dot{U}_a + \dot{Y}_b \dot{U}_b + \dot{Y}_c \dot{U}_c) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (18.a)$$

оценивается комплексной величиной

$$\dot{I}_0 = \mathbf{I}_0^\tau \mathbf{e}_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} \overbrace{(\dot{Y}_a \dot{U}_a + \dot{Y}_b \dot{U}_b + \dot{Y}_c \dot{U}_c)}^{\dot{I}_n}. \quad (18.б)$$

Комплекс тока нейтрали и тока 0-последовательности удовлетворяют условию

$$\dot{I}_n = \sqrt{3} \dot{I}_0 = \dot{Y}_a \dot{U}_a + \dot{Y}_b \dot{U}_b + \dot{Y}_c \dot{U}_c. \quad (18.в)$$

Ток 0-последовательности можно скомпенсировать реактивными элементами, которые подключают фазы к нулевому проводу. Компенсатор 0-последовательности – полностью задан диагональной матрицей $\hat{B}_K = \operatorname{diag}\{Bk_a, Bk_b, Bk_c\}$ реактивных проводимостей. 3-комплекс тока 0-компенсатора

$$\mathbf{Ik} = (\dot{I}k_a, \dot{I}k_b, \dot{I}k_c)^\tau \quad (19)$$

и 3-комплекс напряжения (15) связаны матричным законом Ома

$$\begin{bmatrix} \dot{I}k_a \\ \dot{I}k_b \\ \dot{I}k_c \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} Bk_a \dot{U}_a \\ Bk_b \dot{U}_b \\ Bk_c \dot{U}_c \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Ik} = j \hat{B}_K \mathbf{U}. \quad (20)$$

0-последовательность тока компенсатора

$$\mathbf{Ik}_0 = \dot{I}k_0 \mathbf{e}_0 = (\underbrace{\mathbf{Ik}^\tau \mathbf{e}_0}_{\dot{I}k_0}) \mathbf{e}_0 \quad (21)$$

должна быть в противофазе с 0-последовательностью тока нагрузки

$$\mathbf{Ik}_0 = -\mathbf{I}_0 \quad (\dot{I}k_0 = -\dot{I}_0). \quad (22.a)$$

Условие (22.a) равносильно равенству

$$Bk_a \dot{U}_a + Bk_b \dot{U}_b + Bk_c \dot{U}_c = j \dot{I}_n. \quad (22.б)$$

Комплекс тока нейтрали измеряется или, если нагрузка известна, вычисляется согласно (18.в). В уравнении (22.б) с комплексными коэффициентами неизвестны три вещественные величины (Bk_a, Bk_b, Bk_c). Алгебраическая форма комплексов тока и напряжения

$$\dot{I}_n = I'_n + j I''_n, \quad \mathbf{U} = \begin{bmatrix} U'_a + j U''_a \\ U'_b + j U''_b \\ U'_c + j U''_c \end{bmatrix} \quad (23)$$

разделяет уравнение (22.б) на вещественную и мнимую части и дает систему двух вещественных уравнений с тремя неизвестными. Система неопределенна и имеет бесконечное множество решений. Одно неизвестное можно выбрать произвольно. Полагаем $Bk_c=0$, что приводит к системе уравнений с двумя неизвестными (Bk_a, Bk_b)

$$\begin{cases} Bk_a U'_a + Bk_b U'_b = -I''_n \\ Bk_a U''_a + Bk_b U''_b = I'_n \end{cases}, \quad (24.a)$$

$$\begin{bmatrix} U'_a & U'_b \\ U''_a & U''_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Bk_a \\ Bk_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I''_n \\ I'_n \end{bmatrix}. \quad (24.б)$$

Система (24) однозначно разрешается, если

$$\Delta = U'_a U''_b - U''_a U'_b \neq 0.$$

Матрица

$$\hat{U} = \begin{bmatrix} U'_a & U'_b \\ U''_a & U''_b \end{bmatrix} \quad (25)$$

имеет обратную

$$\hat{U}^{-1} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} U''_b & -U'_b \\ -U''_a & U'_a \end{bmatrix}. \quad (26.a)$$

При несимметричном синусоидальном напряжении получим явные формулы

$$\begin{bmatrix} Bk_a \\ Bk_b \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} U''_b & -U'_b \\ -U''_a & U'_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -I''_n \\ I'_n \end{bmatrix} \quad (26.б)$$

для вычисления реактивных проводимостей компенсатора 0-последовательности (0-компенсатора).

СИММЕТРИЧНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ.

МЕТОД СИММЕТРИЧНЫХ КООРДИНАТ

Если напряжение симметрично прямой последовательности $U = \dot{U}e_1$, то вектор тока нагрузки (17) определен проводимостями нагрузки, как

$$I = [\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c]^\tau = \frac{\dot{U}}{\sqrt{3}} [\dot{Y}_a, \dot{Y}_b \alpha^*, \dot{Y}_c \alpha]^\tau. \quad (27)$$

Здесь и дальше

$$e_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} [1, \alpha^*, \alpha]^\tau, \quad e_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} [1, \alpha, \alpha^*]^\tau$$

– орты прямой и обратной последовательностей ($\alpha = e^{j120^\circ}$). Фазоры (комплексы) токов симметричных последовательностей нагрузки вычисляются согласно [1, 2]

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= I^\tau e_2 = \dot{U} (\dot{Y}_a + \dot{Y}_b + \dot{Y}_c) / 3 \\ \dot{I}_2 &= I^\tau e_1 = \dot{U} (\dot{Y}_a + \dot{Y}_b \alpha + \dot{Y}_c \alpha^*) / 3. \\ \dot{I}_0 &= I^\tau e_0 = \dot{U} (\dot{Y}_a + \dot{Y}_b \alpha^* + \dot{Y}_c \alpha) / 3 \end{aligned} \quad (28)$$

Фазоры токов симметричных последовательностей компенсатора равны

$$\begin{aligned} \dot{I}_{K1} &= I_K^\tau e_2 = \dot{U} (B_{Ka} + B_{Kb} + B_{Kc}) / 3 \\ \dot{I}_{K0} &= I_K^\tau e_0 = \dot{U} (B_{Ka} + B_{Kb} \alpha^* + B_{Kc} \alpha) / 3. \\ \dot{I}_{K2} &= I_K^\tau e_1 = \dot{U} (B_{Ka} + B_{Kb} \alpha + B_{Kc} \alpha^*) / 3 \end{aligned} \quad (29)$$

Введем обозначения для проводимостей 0, 1, 2 – последовательностей компенсатора

$$\begin{aligned} B_{K1} &= (B_{Ka} + B_{Kb} + B_{Kc}) / 3 \\ \dot{B}_{K0} &= (B_{Ka} + B_{Kb} \alpha^* + B_{Kc} \alpha) / 3. \\ \dot{B}_{K2} &= (B_{Ka} + B_{Kb} \alpha + B_{Kc} \alpha^*) / 3 \end{aligned} \quad (30.a)$$

Обозначим [1, 2]

$$\dot{Y}_0 = (\dot{Y}_a + \dot{Y}_b \alpha^* + \dot{Y}_c \alpha) / 3 \quad (30.b)$$

– проводимость 0-последовательности нагрузки. Дополнительно к условию $\dot{I}_{K0} + \dot{I}_0 = 0$ потребуем, чтобы 0-компенсатор не изменял ток прямой последовательности ($\dot{I}_{K1} = 0$). Тогда будем иметь два уравнения для определения трех неизвестных

$$\begin{aligned} (B_{Ka} + B_{Kb} + B_{Kc}) / 3 &= 0 \\ (B_{Ka} + B_{Kb} \alpha^* + B_{Kc} \alpha) / 3 &= j\dot{Y}_0. \end{aligned} \quad (31.a)$$

Так как проводимости обратной и нулевой последовательностей компенсатора комплексно сопряжены $\dot{B}_{K2} = (\dot{B}_{K0})^*$, то 2-последовательность тока компенсатора невозможно выбрать произвольно (в частности, сделать равной нулю). Поэтому уравнения (31.a) дополним уравнением, комплексно сопряженным ко второму уравнению (31.a)

$$(B_{Ka} + B_{Kb} \alpha + B_{Kc} \alpha^*) / 3 = (j\dot{Y}_0)^* \quad (31.b)$$

Запишем систему уравнений (31) в матричном виде

$$\frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^* & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{Ka} \\ B_{Kb} \\ B_{Kc} \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} 0 \\ j\dot{Y}_0 \\ (j\dot{Y}_0)^* \end{bmatrix} \quad (32)$$

Матричное уравнение (32) однозначно разрешается, так как модифицированная матрица Фортексю [1, 2]

$$\hat{F} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^* & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^* \end{bmatrix} \quad (33.a)$$

имеет обратную матрицу (равную комплексно-сопряженной)

$$\hat{F}^{-1} = \hat{F}^* = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^* & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^* \end{bmatrix}. \quad (33.b)$$

Умножая слева матричное уравнение (32) на матрицу \hat{F}^{-1} получим явные формулы

$$\begin{bmatrix} B_{Ka} \\ B_{Kb} \\ B_{Kc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \operatorname{Re}(j\dot{Y}_0) \\ 2 \operatorname{Re}(e^{j210^\circ} \dot{Y}_0) \\ 2 \operatorname{Re}(e^{-j30^\circ} \dot{Y}_0) \end{bmatrix} \quad (34)$$

для вычисления проводимостей 0-компенсатора по проводимости 0-последовательности нагрузки.

После компенсации суммарный трехфазный ток в фазах равен

$$I_\Sigma = \hat{Y}_\Sigma U. \quad (35)$$

Диагональная матрица $\hat{Y}_\Sigma = \hat{Y} + j\hat{B}_K$ равна сумме диагональных матриц нагрузки и компенсатора.

Связь фазных и симметричных координат суммарного трехфазного тока

$$I_\Sigma = (\dot{I}_{\Sigma a}, \dot{I}_{\Sigma b}, \dot{I}_{\Sigma c})^\tau, \quad \tilde{I}_\Sigma = (\dot{I}_{\Sigma 0}, \dot{I}_{\Sigma 1}, \dot{I}_{\Sigma 2})^\tau \quad (36)$$

обеспечивается модифицированной матрицей Фортексю (33.a)

$$\tilde{I}_\Sigma = \hat{F} I_\Sigma.$$

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА КОМПЕНСАТОРА ТОКА НЕЙТРАЛИ

Расчет проводился для синусоидального режима при симметричном напряжении. В рассматриваемых ниже примерах использованы базовые величины: проводимости Y_6 , напряжения U_6 , тока I_6 , которые удовлетворяют соотношению $U_6 = Y_6 I_6$. Величина $U_6 = |U|$ равна действующему значению трехфазного напряжения.

Расчет выполнялся для цепи (см. табл.1) с:

1. однофазной чисто активной нагрузкой;
2. однофазной активно-индуктивной нагрузкой;
3. чисто активной несимметричной нагрузкой;
4. разнородной по фазам (с одинаковыми модулями импедансов фаз) нагрузкой.

Таблица 1

№	1	2	3	4
\dot{Y}_a	Y_6	$Y_6 e^{-j30}$	$2Y_6$	Y_6
\dot{Y}_b	0	0	Y_6	$-jY_6$
\dot{Y}_c	0	0	Y_6	jY_6

Проводимости 0-компенсатора вычислялись согласно (34). Результаты сведены в табл. 2.

Таблица 2

№	1	2	3	4
B_{Ka}	0	$Y_6/3$	0	0
B_{Kb}	$-Y_6/\sqrt{3}$	$-2Y_6/3$	$-Y_6/\sqrt{3}$	$Y_6(1-1/\sqrt{3})$
B_{Kc}	$Y_6/\sqrt{3}$	$Y_6/3$	$Y_6/\sqrt{3}$	$Y_6(1/\sqrt{3}-1)$

Результаты расчета симметричных координат токов до и после компенсации сведены в табл. 3.

Таблица 3

№		1	2	3	4
До	$ I $	$I_6/\sqrt{3}$	$I_6/\sqrt{3}$	$\sqrt{2} I_6$	I_6
	\dot{I}_0	$I_6/3$	$I_6 e^{j30}/3$	$I_6/3$	$I_6(1-\sqrt{3})/3$
	\dot{I}_2	$I_6/3$	$I_6 e^{j30}/3$	$I_6/3$	$I_6(1+\sqrt{3})/3$
	\dot{I}_1	$I_6/3$	$I_6 e^{j30}/3$	$I_6 4/3$	$I_6/3$
После	$\dot{I}_{\Sigma 0}$	0	0	0	0
	$\dot{I}_{\Sigma 2}$	$I_6 2/3$	$I_6/\sqrt{3}$	$I_6 2/3$	$I_6 2/3$
	$\dot{I}_{\Sigma 1}$	$I_6/3$	$I_6 e^{j30}/3$	$I_6 4/3$	$I_6/3$
	$ I_{\Sigma} $	$I_6\sqrt{5}/3$	$I_6 2/3$	$I_6 2\sqrt{5}/3$	$I_6\sqrt{5}/3$

После компенсации суммарный ток (нагрузка + компенсатор) не содержит 0-последовательность (и следовательно ток нейтрали равен 0). Ток 1-последовательности (который содержит активный ток) не изменился. Возрос ток 2-последовательности и, следовательно, полный трехфазный ток также возрос. Процессы становятся двумерными и представляются токами прямой и обратной последовательности. Компенсация 2-последовательности вместе с компенсацией реактивного тока 1-последовательности выполняется на следующем этапе в рамках эквивалентной трехпроводной системы, например, методом Фризе [2, 3].

ВЫВОДЫ

Для 4-проводной схемы проведенный анализ выявил особую роль 0-последовательности тока и напряжения. Показано как выделить 3-проводную цепь, эквивалентную 4-проводной схеме с компенсированным током 0-последовательности. Такая эквивалентная 4-проводной схема поставляет в нагрузку ММ без нулевой последовательности. Алгоритм определения реактивных проводимостей 0-компенсатора позволяет оценить его работу для синусоидальных процессов при симметричном и несимметричном напряжении.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сиротин Ю.А. Анализ энергетических процессов в трехпроводной схеме // Вісник НТУ "ХПІ". – 2011. – № 41. – С. 118-133.
2. Сиротин Ю.А. Схема симметризации Штейнметца как частный случай оптимального компенсатора Фризе // Електрика. – № 1. – 2011. – С. 16-21.
3. Sirotin. Iu.A. Fryze's compensator and Fortescue transformation. "Przegląd Elektrotechniczny"(Electrical Review). – 2011. – Vol. 1. – 101-106.

Bibliography (transliterated): 1. Sirotin Yu.A. Analiz `energeticheskikh processov v trehprovodnoy sheme // Visnik NTU "HPI". - 2011. - № 41. - S. 118-133. 2. Sirotin Yu.A. Shema simmetrizacii Shtejnmetca kak chastnyj sluchaj optimal'nogo kompensatora Frize // `Elektrika. - № 1. - 2011. - S. 16-21. 3. Sirotin. Iu.A. Fryze's compensator and Fortescue transformation. "Przegląd Elektrotechniczny"(Electrical Review). - 2011. - Vol. 1. - 101-106.

Поступила 31.10.2012

Сиротин Юрий Александрович, к.т.н, доц.
 Национальный технический университет
 "Харківський політехнічний інститут"
 кафедра "Автоматизація енергосистем"
 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21
 тел. (057) 343-36-82, e-mail: yuri_sirotin@ukr.net

Sirotin Y.A.

Structural separation of processes in a three-phase four-wire circuit and neutral current compensation.

Analysis of current and voltage 0-components in a three-phase four-wire circuit is made. It is shown how to select part of the circuit without the current and voltage 0-components which is equivalent to the original circuit in terms of instant power without the 0-component. For sinusoidal processes with asymmetric voltage, a computation algorithm for neutral current compensator LC elements conductivity is proposed. For symmetrical voltage, a 0-compensator susceptance calculation methodology based on load conductance is presented. Example calculations are analyzed.

Key words – three-phase four-wire circuit, null susceptance, neutral current compensation.