

## Построение Y-Z расчетной гибридной матрицы с учетом комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов

Бадалян Н.П., д-р техн. наук

Рассматривается вопрос построения Y-Z расчетной гибридной матрицы с учетом комплексных коэффициентов трансформации трансформатора, которая используется при построении систем нелинейных алгебраических уравнений установленного режима электроэнергетической системы.

*Ключевые слова:* электроэнергетическая система, базисный узел, матрица, установившийся режим, электроэнергетика, коэффициент трансформации трансформаторов, гибридные матрицы.

### Developing Y-Z Calculated Hybrid Matrix with Complex Coefficients of transformers' transformation

N.P. Badalyan, Doctor of Engineering

The author considers the issue of developing the Y-Z calculated hybrid matrix with transformation complex factors of a transformer. The matrix is used for developing the systems of nonlinear algebraic equations of the established mode in the electropower system.

*Keywords:* power engineering system, reference node, matrix, established mode, coefficient of transformer's transformation. power engineering, hybrid matrix.

В настоящее время гибридные матрицы Y-Z пассивных параметров электроэнергетической системы (ЭЭС) широко используются для построения нелинейных алгебраических уравнений установленного режима ЭЭС, однако без учета комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов [1–12].

Ниже рассматривается метод построения Y-Z гибридной матрицы ЭЭС с учетом комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов.

Матричное уравнение исследуемой ЭЭС в Y форме представляется в следующем виде:

$$\dot{I} = Y\dot{U}, \quad (1)$$

где  $\dot{U}$  – столбцевая матрица комплексных узловых напряжений относительно напряжения базисного узла;  $\dot{I}$  – столбцевая матрица комплексных токов независимых узлов;  $Y$  – неособенная квадратная матрица узловых комплексных проводимостей относительно базисного узла.

Выбирая систему индексов:  $m(n)$  – для стационарных узлов и  $k(\ell)$  – для нагрузочных узлов, уравнение состояния (1) в развернутой форме можно представить в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_m \\ \dots \\ \dot{I}_\ell \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{mn} & Y_{mk} \\ \dots & \dots \\ Y_{\ell n} & Y_{\ell k} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{U}_{n0} \\ \dots \\ \dot{U}_{k0} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Матричное уравнение состояния с использованием гибридных пассивных параметров представляется в виде

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_m \\ \dots \\ \dot{U}_{k0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{m,n} & \dot{A}_{m,\ell} \\ \dots & \dots \\ \dot{C}_{k,n} & Z_{m,\ell} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{U}_{n0} \\ \dots \\ \dot{I}_\ell \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Подматрицы  $Y_{m,n}$  и  $Z_{m,\ell}$  являются квадратными матрицами, порядок которых характеризуется числом независимых соответственно станционных и нагрузочных узлов, а подматрицы  $\dot{A}_{m,\ell}$  и  $\dot{C}_{k,n}$  – комплексные величины, не имеющие размерности, и в общем случае являются прямоугольными подматрицами.

Выделяя гибридную матрицу из (3), получим

$$Y-Z = \begin{bmatrix} Y_{m,n} & \dot{A}_{m,\ell} \\ \dots & \dots \\ \dot{C}_{k,n} & Z_{m,\ell} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где

$$Y_{m,n} = Y_{mn} - Y_{mk} Y_{k\ell}^{-1} Y_{\ell n}; \quad (5)$$

$$A_{m,n} = Y_{mk} Y_{k\ell}^{-1}; \quad (6)$$

$$\dot{C}_{k,n} = -Y_{k\ell}^{-1} Y_{\ell n}; \quad (7)$$

$$Z_{k,\ell} = Y_{k\ell}^{-1}. \quad (8)$$

Анализ формул (5)–(8) показывает, что для установления их численных значений с учетом комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов необходимо иметь полную неособенную матрицу  $Y$ , в элементах которой учтены наличие трансформаторов с комплексными коэффициентами трансформации.

В данном случае необходимо иметь матрицу

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{mn} & Y_{mk} \\ \dots & \dots \\ Y_{\ell n} & Y_{\ell k} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Таким образом, построенная неособенная квадратная матрица (9) является исходной

для построение Y-Z гибридной матрицы. В элементах подматриц  $Y_{mn}$ ,  $Y_{mk}$  и  $Y_{ln}$ ,  $Y_{lk}$  учтены комплексные коэффициенты трансформации трансформаторов, функциональных в отдельных ветвях исследуемой ЭЭС.

Следует отметить, что при построении матрицы (9) никакое ограничение на нее не полагается.

Для иллюстрации процесса построения Y-Z гибридной матрицы с учетом комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов рассмотрим один конкретный численный пример.

**Пример расчета.** Рассматривается схема одной ЭЭС, состоящей из четырех узлов, не имеющей поперечных элементов (рис. 1).

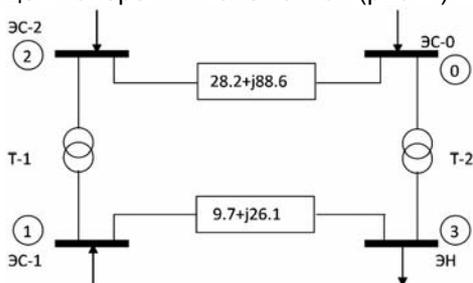


Рис. 1. Исходная схема исследуемой ЭЭС

Можно заметить, что функционируют трансформаторы с комплексными коэффициентами трансформации между узлами 0–3 и 1–2.

Учитывая внутренние комплексные сопротивления трансформаторов, на основании исходной схемы, приведенной на рис. 1, строится расчетная электрическая схема замещения, приведенная на рис. 2.

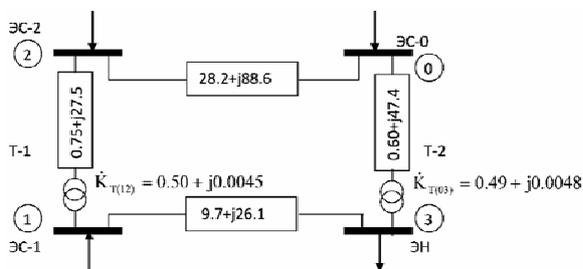


Рис. 2. Расчетная электрическая схема замещения исследуемой ЭЭС

На схеме рис. 2 приведены численные значения как внутренних комплексных сопротивлений трансформаторов, так и комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов.

Пользуясь схемой замещения, приведенной на рис. 2, составляем особенную матрицу узловых комплексных проводимостей, порядок которой равен числу узлов:

$$\begin{matrix}
 & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\
 \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix}
 Y_{02} + Y_{03} & 0 & Y_{02} & -Y_{03} \dot{K}_{T(03)} \\
 0 & Y_{31} + Y_{21} \dot{K}_{T(12)} & -Y_{12} \dot{K}_{T(12)} & -Y_{13} \\
 Y_{20} & Y_{21} \dot{K}_{T(12)} & Y_{02} + Y_{12} & 0 \\
 -Y_{30} \dot{K}_{T(03)} & -Y_{31} & 0 & Y_{13} + Y_{03} K^2_{T(12)}
 \end{bmatrix}
 \end{matrix}
 \tag{10}$$

Можно заметить, что полученная особенная матрица узловых комплексных проводимостей является несимметричной относительно главной диагонали, что стало результатом функционирования трансформаторов с комплексными коэффициентами трансформации в ветвях 0–3 и 1–2.

Поскольку известны численные значения комплексных проводимостей ветвей схемы замещения, то вышеприведенную особенную матрицу узловых проводимостей можно представить в следующем виде:

$$\begin{matrix}
 & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\
 \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix}
 0.004496 - j0.032590 & -0.000000 + j0.000000 & -0.003262 + j0.010248 & -Y_{03} \dot{K}_{T(03)} \\
 -0.000000 + j0.000000 & Y_{31} + Y_{21} K^2_{T(12)} & -Y_{12} \dot{K}_{T(12)} & -0.012511 + j0.033664 \\
 -0.003262 + j0.010248 & Y_{21} \dot{K}_{T(12)} & 0.020764 - j0.050199 & -0.000000 + j0.000000 \\
 -Y_{30} \dot{K}_{T(03)} & -0.012511 + j0.033664 & -0.000000 + j0.000000 & Y_{13} + Y_{03} K^2_{T(12)}
 \end{bmatrix}
 \end{matrix}
 \tag{11}$$

Фактически, несимметричность получается из-за того, что во взаимных комплексных проводимостях соответствующая комплексная проводимость умножается на комплексный коэффициент трансформации трансформатора или на сопряженный комплексный коэффициент трансформации трансформатора. Разумеется, что если коэффициенты трансформации были действительными числами, то можно было бы написать  $\dot{K}_T = \hat{K}_T = 1$  и матрица узловых комплексных проводимостей стала бы симметричной относительно главной диагонали.

Если отбросить строки и столбцы, соответствующие базисному, в данном случае - нулевому узлу, то получим неособенную квадратную матрицу Y обобщенных пассивных параметров с учетом комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов:

$$\begin{matrix}
 & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\
 \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix}
 Y_{31} + Y_{21} K^2_{T(12)} & -Y_{12} \dot{K}_{T(12)} & -0.012511 + j0.033664 \\
 Y_{21} \dot{K}_{T(12)} & 0.020764 - j0.050199 & -0.000000 + j0.000000 \\
 -0.012511 + j0.033664 & -0.000000 + j0.000000 & Y_{13} + Y_{03} K^2_{T(12)}
 \end{bmatrix}
 \end{matrix}
 \tag{12}$$

Можно заметить, что несимметричность неособенной матрицы узловых комплексных проводимостей сохраняется.

Вышеприведенная неособенная матрица (12) является основой для построения Y-Z гибридной матрицы.

Для этого необходимо установить численные значения всех элементов данной матрицы. Поскольку имеем численные значения как комплексных проводимостей, так и комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов, то можем установить следующую матрицу:

	1	2	3
1	0.030013- -j0.043572	-0.000335+ +j0.013174	-0.012511+ +j0.033664
2	-0.000659+ +j0.018169	0.020764- -j0.050199	-0.000000+ +j0.000000
3	-0.012511+ +j0.033664	-0.000000+ +j0.000000	0.013567- -j0.038727

(13)

При этом также можно заметить несимметричность данной матрицы относительно главной диагонали.

Полученная неособенная квадратная матрица (13) является исходной для установления численных значений элементов Y-Z гибридной матрицы.

Разумеется, численные значения элементов искомой Y-Z гибридной матрицы определяются на основании формул (5)–(8).

Установление численных значений  $Y_{m,n}$ ,  $\dot{A}_{m,\ell}$ ,  $\dot{C}_{k,n}$  и  $Z_{m,\ell}$  и будет вызывать какое-либо вычислительное затруднение.

#### Список литературы

1. **Хачатрян В.С., Аль-Дарвиш М.Б.** Решение Y-Z формы уравнений установившегося режима электроэнергетической системы с применением матрицы Гессе // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 1997. – Т. 50. – № 3. – С. 194–203.

2. **Хачатрян В.С., Бадалян Н.П.** Решение Z-Y уравнений установившегося режима электроэнергетической системы методом декомпозиции // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 1997. – Т. 50. – № 2. – С. 96–103.

3. **Хачатрян В.С., Бадалян Н.П.** Решение Y-Z формы уравнений установившегося режима ЭЭС ме-

тодом декомпозиции при P-U типе станционных узлов // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 1997. – Т. 50. – № 2. – С. 287–295.

4. **Хачатрян В.С., Этмекчян Э.А., Бадалян Н.П.** Решение гибридных уравнений установившегося режима электроэнергетической системы методом диакоптики // Электричество. – 1999. – № 4. – С. 7–12.

5. **Nagaendra P.S., Prakasa K.S., Nanda I.I.** A novel hybrid load method // IEEE Transactions. – 1981. – V. PAS-10. – N 1. – P. 303–308.

6. **Метод коррекции Y-Z расчетной матрицы электроэнергетической системы / В.С. Хачатрян, Н.П. Бадалян, К.В. Хачатрян, К.К. Маркарян** // Изв. НАН РА и ГИУА Армении. Сер. ТН. – 2001. – № 2. – С. 41–46.

7. **Бадалян Н.П.** Построение Y-Z, P-Q математической модели установившегося режима ЭЭС и ее реализация методом минимизации // Изв. НАН РА и ГИУА Армении. Сер. ТН. – 2001. – № 3. – С. 372–378.

8. **Хачатрян В.С., Бадалян Н.П.** Диакоптическая Y-Z, P-U математическая модель установившегося режима ЭЭС и ее реализация методом минимизации // Изв. НАН РА и ГИУА Армении. Сер. ТН. – 2002. – № 3. – С. 392–399.

9. **Хачатрян В.С., Бадалян Н.П.** Решение гибридных уравнений установившегося режима электроэнергетической системы // Электричество. – 2003. – № 11. – С. 11–16.

10. **Бадалян Н.П.** Решение гибридных уравнений установившегося режима электроэнергетической системы методом второго порядка при P-Q типе станционных узлов // Вестник МАНЭБ. – 2003. – № 4. – С. 80–84.

11. **Хачатрян К.В.** Коррекция Y-Z диакоптической матрицы ЭЭС когда станционные узлы типа P-U превращаются в нагрузочные узлы // Изв. НАН РА и ГИУА Армении. Сер. ТН. – 2004. – № 1. – С. 77–82.

12. **Хачатрян К.В.** Диакоптическая Y-Z, P-Q математическая модель коррекции установившегося режима ЭЭС и ее реализация методом первого порядка // Вестник МАНЭБ. – 2004. – № 3. – С. 87–89.

*Бадалян Норайр Петикович,*

ГОУВПО «Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярёва»,  
доктор технических наук, профессор кафедры электротехники,  
e-mail: norayrbadalyan@mail.ru