ISSN 0002-306X. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2004. Т. LVII, № 1.

УДК 621.311 ЭНЕРГЕТИКА

В.С. ХАЧАТРЯН, К.В. ХАЧАТРЯН

КОРРЕКЦИЯ Y-Z ДИАКОПТИЧЕСКОЙ МАТРИЦЫ ЭЭС ПРИ ПРЕВРАЩЕНИИ СТАНЦИОННЫХ УЗЛОВ ТИПА P-U В НАГРУЗОЧНЫЕ УЗЛЫ

Предлагается метод коррекции диакоптической Y-Z расчетной матрицы при превращении станционных узлов типа P-U в нагрузочные, обеспечивающий высокую маневренность при решении Y-Z формы уравнения установившегося режима большой ЭЭС и требующий минимального объема вычислительных работ.

Ключевые слова: матрица, станция, система, объем, узел, режим, нагрузка.

Широкое применение гибридной Y-Z матрицы для построения нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима электроэнергетической системы (ЭЭС) требует обеспечения ее высокой маневренности при изменении исходной информации относительно активных режимных параметров [1-5].

Одним из важных подходов к решению указанной задачи является применение идеи диакоптики, что приводит к резкому понижению не только требуемого объема памяти, но и объема вычислительных работ [6,7].

Представляя заданную ЭЭС, состоящую из (M+1) узлов, в виде совокупности радиально связанных N подсистем, получим

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{i_1} \\ \hline \dot{I}_{i_2} \\ \hline \cdots \\ \hline \dot{I}_{i_N} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c|c|c} Y_{i_1 j_1} & & & \\ \hline & Y_{i_2 j_2} & & \\ \hline \cdots\cdots & \cdots\cdots & \vdots & \cdots\cdots \\ \hline & & & Y_{i_N j_N} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \dot{U}_{j_1} \\ \hline \dot{U}_{j_2} \\ \hline \cdots\cdots \\ \hline \dot{U}_{j_N} \end{bmatrix}, \qquad (1)$$

где $\dot{I}_i = \left(\dot{I}_{i_1}, \dot{I}_{i_2}, \ldots, \dot{I}_{i_N}\right)$, $\dot{U}_j = \left(\dot{U}_{j_1}, \dot{U}_{j_2}, \ldots, \dot{U}_{j_N}\right)$ - многомерные векторы комплексных токов и напряжений радиально связанных подсистем; $Y_{ij} = \left(Y_{i_1 j_1}, Y_{i_2 j_2} \ldots, Y_{i_N j_N}\right)$ - неособенные квадратные подматрицы узловых комплексных проводимостей тех же подсистем.

Для дальнейшего изложения материала принимается следующая дополнительная система индексов:

- для станционных узлов:

$$m(n) = m_1(n_1),\ m_2(n_2),\ \ldots, m_N(n_N); \qquad (2)$$

- для нагрузочных узлов:

$$k(\ell) = k_1(\ell_1),\ k_2(\ell_2),\ \ldots, k_N(\ell_N)\ . \qquad (3)$$

При этом

$$i(j) = m(n),\ (k,\ \ell). \tag{4}$$

Систему индексов для отдельных подсистем можно представить в виде

$$\begin{aligned} &i_1(j_1) = m_1(n_1),\ k_1(\ell_1), \\ &i_2(j_2) = m_2(n_2),\ k_2(\ell_2), \\ &\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ &i_N(j_N) = m_N(n_N),\ k_N(\ell_N). \end{aligned} \tag{5}$$

С учетом (5) подматричное уравнение первой подсистемы из (1) можно представить в виде

$$\left[\begin{array}{c} \dot{I}_{m_1} \\ \hline \dot{I}_{\ell_1} \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c|c} Y_{m_1 n_1} & Y_{m_1 k_1} \\ \hline Y_{\ell_1 n_1} & Y_{\ell_1 k_1} \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} \dot{U}_{n_1} \\ \hline \dot{U}_{k_1} \end{array}\right]. \tag{6}$$

После определенного преобразования матричное уравнение (6) принимает вид

$$\left[\begin{array}{c} \dot{I}_{m_1} \\ \hline \dot{U}_{k_1} \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c|c} Y_{m_1 n_1} & \dot{A}_{m_1 \ell_1} \\ \hline \dot{B}_{k_1 n_1} & Z_{k_1 \ell_1} \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} \dot{U}_{n_1} \\ \hline \dot{I}_{\ell_1} \end{array}\right], \tag{7}$$

где

$$\begin{aligned} Y_{m_1,n_1} &= Y_{m_1 n_1} - Y_{m_1 k_1} Z_{k_1 \ell_1} Y_{\ell_1 n_1}, \\ \dot{A}_{m_1,\ell_1} &= Y_{m_1 k_1} \cdot Z_{k_1 \ell_1}, \\ \dot{B}_{k_1,n_1} &= Z_{k_1 \ell_1} \cdot Y_{\ell_1 n_1}, \\ Z_{k_1,\ell_1} &= Z_{\ell_1,k_1}. \end{aligned} \tag{8}$$

Для второй подсистемы можем написать

$$\left[\begin{array}{c} \dot{I}_{m_2} \\ \hline \dot{U}_{k_2} \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c|c} Y_{m_2 n_2} & \dot{A}_{m_2 \ell_2} \\ \hline \dot{B}_{k_2 n_2} & Z_{k_2 \ell_2} \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} \dot{U}_{n_2} \\ \hline \dot{I}_{\ell_2} \end{array}\right], \tag{9}$$

где

$$\begin{aligned} Y_{m_2,n_2} &= Y_{m_2 n_2} - Y_{m_2 k_2} Z_{k_2 \ell_2} Y_{\ell_2 n_2}, \\ \dot{A}_{m_2,\ell_2} &= Y_{m_2 k_2} \cdot Z_{k_2 \ell_2}, \\ \dot{B}_{k_2,n_2} &= Z_{k_2 \ell_2} \cdot Y_{\ell_2 n_2}, \\ Z_{k_2,\ell_2} &= Z_{\ell_2,k_2}. \end{aligned} \tag{10}$$

Аналогичным образом можем написать для остальных и N-й подсистем:

$$\left[\begin{array}{c} \dot{I}_{m_N} \\ \hline \dot{U}_{k_N} \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c|c} Y_{m_N n_N} & \dot{A}_{m_N \ell_N} \\ \hline \dot{B}_{k_N n_N} & Z_{k_N \ell_N} \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} \dot{U}_{n_N} \\ \hline \dot{I}_{\ell_N} \end{array}\right], \tag{11}$$

где

$$
\begin{aligned}
Y_{m_N,n_N} &= Y_{m_N n_N} - Y_{m_N k_N} Z_{k_N \ell_N} Y_{\ell_N n_N}\,, \\
\dot{A}_{m_N,\ell_N} &= Y_{m_N k_N} Z_{k_N \ell_N}\,, \\
\dot{B}_{k_N,n_N} &= -Z_{k_N \ell_N} Y_{\ell_N n_N}\,, \\
Z_{k_N,\ell_N} &= Z_{\ell_N,k_N}\,.
\end{aligned} \tag{12}
$$

Представим Y-Z диакоптическую матрицу в виде

$$
\begin{bmatrix}
\begin{array}{c|c} Y_{\Gamma_1,\Gamma_1} & \dot{A}_{\Gamma_1,H_1} \\ \hline \dot{B}_{H_1,\Gamma_1} & Z_{H_1,H_1} \end{array} & & & \\
& \begin{array}{c|c} Y_{\Gamma_2,\Gamma_2} & \dot{A}_{\Gamma_2,H_2} \\ \hline \dot{B}_{H_2,\Gamma_2} & Z_{H_2,H_2} \end{array} & & \\
& & \ddots & \\
& & & \begin{array}{c|c} Y_{\Gamma_N,\Gamma_N} & \dot{A}_{\Gamma_N,H_N} \\ \hline \dot{B}_{H_N,\Gamma_N} & Z_{H_N,H_N} \end{array}
\end{bmatrix} \tag{13}
$$

Предположим, в первой подсистеме один из обобщенных узлов типа P-U превращается в узел типа P-Q, т.е. становится нагрузочным. В результате порядок подматрицы Y_{m_1,n_1} уменьшается на единицу, а порядок подматрицы Z_{k_1,ℓ_1} увеличивается на единицу. При этом число узлов первой подсистемы не меняется.

Пусть номер нового нагрузочного узла типа P-Q совпадает с последним номером узлов с индексами $m_1(n_1)$, при котором соответствующая квадратная матрица принимает вид

$$
Y_1 - Z_1 = \left[\begin{array}{c|c} Y_{\Gamma_1-1,\Gamma_1-1} & \dot{A}_{\Gamma_1-1,H_1+1} \\ \hline \dot{B}_{H_1+1,\Gamma_1-1} & Z_{H_1+1,H_1+1} \end{array}\right]\,. \tag{14}
$$

Можно заметить, что если порядок квадратной матрицы Y_{Γ_1,Γ_1} уменьшается на единицу, то порядок квадратной матрицы Z_{H_1,H_1} увеличивается на единицу.

Теперь необходимо установить численные значения новой матрицы Z_{H_1+1,H_1+1} (14), когда известна матрица Z_{H_1,H_1}, приведенная в (13).

Суть задачи заключается в том, что при построении искомой матрицы Z_{H_1+1,H_1+1} необходимо использовать известную матрицу Z_{H_1,H_1}, не изменяя ее структуры.

Представим структуру исходной неособенной квадратной матрицы порядка H+1, с помощью которой необходимо построить искомую матрицу Z_{H_1+1,H_1+1}:

$$\begin{bmatrix} Y_{\Gamma_1\Gamma_1} & \vline & Y_{\Gamma_1,\Gamma_1+1} & Y_{\Gamma_1,\Gamma_1+2} & \cdots & Y_{\Gamma_1,\Gamma_1+H_1} \\ \hline Y_{\Gamma_1+1,\Gamma_1} & \vline & & & & \\ Y_{\Gamma_1+2,\Gamma_1} & \vline & & [Y]_{H_1,H_1} & & \\ \cdots\cdots\cdots & \vline & & & & \\ Y_{\Gamma_1+H_1,\Gamma_1} & \vline & & & & \end{bmatrix}. \qquad (15)$$

Можно заметить, что квадратная матрица $[Y]_{H_1,H_1}$, приведенная в (15), имеющая порядок H_1, совпадает с порядком матрицы Z_{H_1,H_1}, приведенной в (13).

Теперь необходимо установить матрицу Z_{H_1+1,H_1+1} с использованием известной матрицы, приведенной в (13).

Представим матрицу (15) в следующем виде:

$$Y_{H_1+1,H_1+1} = \left[\begin{array}{c|c} Y_{\Gamma_1\Gamma_1} & Y_{\Gamma_1 H_1} \\ \hline Y_{H_1\Gamma_1} & Y_{H_1,H_1} \end{array}\right]. \qquad (16)$$

В блочной матрице (16) приняты обозначения:

$$Y_{\Gamma_1 H_1} = \lfloor Y_{\Gamma_1,\Gamma_1+1} \quad Y_{\Gamma_1,\Gamma_1+2} \quad \cdots \quad Y_{\Gamma_1,\Gamma_1+H_1} \rfloor, \qquad (17)$$

$$Y^{T}_{H_1\Gamma_1} = \left[Y_{\Gamma_1+1,\Gamma_1} \quad Y_{\Gamma_1+2,\Gamma_1} \quad \cdots \quad Y_{\Gamma_1+H_1,\Gamma_1}\right]^{T}, \qquad (18)$$

где Т - знак транспонирования.

Искомую матрицу Z_{H_1+1,H_1+1} представим в той же структуре, что и исходную матрицу (16):

$$Z_{H_1+1,H_1+1} = \left[\begin{array}{c|c} \dot{T}_{\Gamma_1\Gamma_1} & \dot{T}_{\Gamma_1 H_1} \\ \hline \dot{T}_{H_1\Gamma_1} & \dot{T}_{H_1 H_1} \end{array}\right]. \qquad (19)$$

При этом между блочными матрицами существует зависимость

$$\left[\begin{array}{c|c} Y_{\Gamma_1\Gamma_1} & Y_{\Gamma_1 H_1} \\ \hline Y_{H_1\Gamma_1} & Y_{H_1,H_1} \end{array}\right] \times \left[\begin{array}{c|c} \dot{T}_{\Gamma_1\Gamma_1} & \dot{T}_{\Gamma_1 H_1} \\ \hline \dot{T}_{H_1\Gamma_1} & \dot{T}_{H_1 H_1} \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c|c} 1 & 0 \\ \hline 0 & E \end{array}\right], \qquad (20)$$

где 1 и Е являются единичными матрицами.

Полученная система (20) является блочно-матричной, в которой известными являются блоки $Y_{\Gamma_1\Gamma_1}$, $Y_{\Gamma_1 H_1}$, $Y_{H_1\Gamma_1}$, $Y_{H_1H_1}$ а искомыми - $\dot{T}_{\Gamma_1\Gamma_1}$, $\dot{T}_{\Gamma_1 H_1}$, $\dot{T}_{H_1\Gamma_1}$, $\dot{T}_{H_1H_1}$. Пользуясь методом исключения неизвестных блоков, можно установить следующие их выражения:

$$\dot{T}_{\text{Г}_1\text{Г}_1} = \frac{1}{Y_{\text{Г}_1\text{Г}} - Y_{\text{ГГ}} Y_{\text{НН}}^{-1} Y_{\text{НГ}}}, \tag{21}$$

$$\dot{T}_{\text{Н}_1\text{Г}_1} = -Y_{\text{Н}_1\text{Н}}^{-1} Y_{\text{НГ}} \dot{T}_{\text{ГГ}}, \tag{22}$$

$$\dot{T}_{\text{Г}_1\text{Н}_1} = -Y_{\text{Н}_1\text{Г}} Y_{\text{НН}}^{-1} \dot{T}_{\text{ГГ}}, \tag{23}$$

$$\dot{T}_{\text{Н}_1\text{Н}_1} = Y_{\text{Н}_1\text{Н}}^{-1} + Y_{\text{НН}}^{-1} Y_{\text{НГ}} Y_{\text{ГН}} Y_{\text{НН}}^{-1} \dot{T}_{\text{ГГ}}. \tag{24}$$

Учитывая, что $Y_{\text{Н}_1\text{Н}_1}^{-1} = Z_{\text{Н}_1\text{Н}_1}$, искомая неособенная квадратная матрица (20) принимает следующий окончательный вид:

$$Z_{\text{Н}_1+1,\text{Н}_1+1} = \left[\begin{array}{c|c} \left(Y_{\text{ГГ}} - Y_{\text{ГН}} Z_{\text{НН}} Y_{\text{НГ}}\right)^{-1} & -Y_{\text{ГН}} Z_{\text{НН}} \dot{T}_{\text{ГГ}} \\ \hline -Z_{\text{НН}} Y_{\text{НГ}} \dot{T}_{\text{ГГ}} & Z_{\text{НН}} + Z_{\text{НН}} Y_{\text{НГ}} Y_{\text{ГН}} Z_{\text{НН}} \dot{T}_{\text{ГГ}} \end{array}\right]. \tag{25}$$

Из структуры полученной матрицы (25) можно заметить, что в ней действительно фигурирует известная матрица $Z_{\text{Н}_1,\text{Н}_1}$, приведенная в расчетной диакоптической матрице Y-Z (13).

В полученной матрице (25) верхний левый блок является одним числом, верхний правый блок- строчной матрицей порядка 1хН_1, нижний правый блок - столбцевой матрицей порядка Н_1х1, а нижний правый блок - квадратной матрицей порядка Н_1.

В отличие от классического подхода, предложенный новый метод не требует обращения какой-либо матрицы.

После установления численных значений элементов подматрицы $Z_{\text{Н}_1+1,\text{Н}_1+1}$ нетрудно построить искомую Y_1-Z_1 расчетную матрицу, которая будет иметь структуру, приведенную в виде (14).

Для определения подматриц $Y_{\text{Г}-1,\text{Г}-1}$; $\dot{A}_{\text{Г}-1,\text{Н}+1}$; $\dot{B}_{\text{Н}+1,\text{Г}-1}$ необходимо воспользоваться формулами

$$Y_{\text{Г}_1-1,\text{Г}_1-1} = Y_{(\text{Г}_1-1)(\text{Г}-1)} - Y_{(\text{Г}-1)(\text{Н}+1)} Z_{(\text{Н}+1)(\text{Н}+1)} Y_{(\text{Н}+1)(\text{Г}-1)}, \tag{26}$$

$$\dot{A}_{\text{Г}_1-1,\text{Н}+1} - Y_{(\text{Г}-1)(\text{Н}+1)} Z_{(\text{Н}+1)(\text{Н}+1)}, \tag{27}$$

$$\dot{B}_{\text{Н}+1,\text{Г}_1-1} = -Z_{(\text{Н}_1+1)(\text{Н}+1)} Z_{(\text{Н}+1)(\text{Г}-1)}. \tag{28}$$

После установления структуры искомой матрицы первой подсистемы можно уточнить структуру кибернетической матрицы (13) для осуществления расчета установившегося режима. Аналогичное явление получается при структурном изменении других подсистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Хачатрян В.С., Этмекчян Э.А.** Развитие гибридного метода расчета установившегося режима электрической системы // Электричество .- 1991.- № 1.-С. 6-13.
2. **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.
3. **Хачатрян К. В.** Расчет установившегося режима ЭЭС при P-U типе станционных узлов // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2000.-Т. 53, № 1.- С. 39-43.
4. **Хачатрян В. С., Бадалян Н. П., Хачатрян К. В., Маргарян К. К.** Расчет установившегося режима электроэнергетической системы, когда станционные узлы типа P-U превращаются в нагрузочные узлы типа P-Q // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2002.- Т 54, № 1.- С. 52-57.
5. **Хачатрян В. С., Бадалян Н. П., Хачатрян К. В., Маргарян К. К.** Метод коррекции Y-Z расчетной матрицы электроэнергетической системы // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2001.-Т. 54, № 1.- С. 41-46.
6. **Хачатрян В. С., Бадалян Н. П.** Решение (Y-Z)-уравнений установившегося режима электроэнергетической системы методом декомпозиции // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-1997.-Т. 50, № 2.-С. 96-103.
7. **Хачатрян В.С., Этмекчян Э.А., Бадалян Н.П.** Решение гибридных уравнений установившегося режима электроэнергетической системы методом диакоптики // Электричество .- 1999.- № 4.-С.7-12.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 20.12.2002.

Վ.Ս. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Կ.Վ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ

ԷԷՀ-Ի Y-Z ԴԻԱԿՈՊՏԻԿԱԿԱՆ ՄԱՏՐԻՑԻ ՃՇԳՐՏՈՒՄԸ P-U ՏԵՍՔԻ ԿԱՅԱՆԱՅԻՆ ՀԱՆԳՈՒՅՑՆԵՐԸ ԲԵՌՆԱՅԻՆ ՀԱՆԳՈՒՅՑՆԵՐՈՎ ՓՈԽԱՐԻՆԵԼՈՒ ԴԵՊՔՈՒՄ

Առաջարկվում է Y-Z դիակոպտիկական մատրիցի ճշգրտման մեթոդ P-U տեսքի կայանային հանգույցները բեռնային հանգույցներով փոխարինելու դեպքում: Մեթոդն ապահովում է մեծ մանևրայնություն ԷԷՀ-ի կայունացված ռեժիմի Y-Z տեսքի հավասարումների լուծման ժամանակ և պահանջում նվազագույն հաշվողական աշխատանք:

V.S. KHACHATRYAN, K.V. KHACHATRYAN

Y-Z DIACOPTIC MATRIX CORRECTION OF ELECTRIC POWER SYSTEMS IN TRANSFORMING STATION UNITS OF P-U TYPE INTO LOADING CENTRES

A method of Y-Z design diacoptic matrix correction where station units of P-U type are transformed into loading centres is proposed. This method provides high maneouvrability in solving Y-Z form equations in steady – state electric power systems and requires the minimum volume of computations.