7. М е т о д расчета переходных электромагнитных процессов в многослойных структурах плоских контактных соединений / А. Н. Герасимович, Д. А. Герасимович, М. А. Мишкина и др. // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2002. – № 6. – С. 27–35.

8. Г о д у н о в С. К. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1971. – 416 с.

9. Г о д у н о в С. К., Р я б е н ь к и й В. С. Разностные схемы. – М.: Наука, 1973. – 400 с.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 18.12.2003

УДК 621.311.1.001.24

МЕТОД КОРРЕКЦИИ РАСЧЕТНОЙ ДИАКОПТИЧЕСКОЙ Z-МАТРИЦЫ СЛОЖНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Канд. техн. наук БАДАЛЯН Н. П.

Государственный инженерный университет Армении

В настоящее время для расчета установившихся режимов сложных электроэнергетических систем (ЭЭС) перспективным направлением являются методы диакоптики [1...10].

При построении математической модели установившегося режима ЭЭС, основанного на методе диакоптики, сеть исследуемой ЭЭС можно представить как совокупность радиально связанных оптимальных подсистем [4]. Путем удаления определенного количества ветвей строится так называемая расчетная диакоптическая Z-матрица, которая может быть представлена в виде совокупности радиально связанных N подсистем:

$$\begin{array}{|c|c|c|c|c|}
\hline
\underline{Z}_{i_1 j_1} & & & & \Delta\underline{Z}_{i_1 l} \\
\hline
 & \underline{Z}_{i_2 j_2} & & & \Delta\underline{Z}_{i_2 l} \\
\hline
 & & \cdots & & \cdots \\
\hline
 & & & \underline{Z}_{i_N j_N} & \Delta\underline{Z}_{i_N l} \\
\hline
\multicolumn{4}{c|}{} & \Delta\underline{Z}_{\text{л}} + \underline{Z}_{\text{л}} \\
\hline
\end{array}. \qquad (1)$$

Предполагается, что общее число узлов рассматриваемой ЭЭС составляет $(M + 1)$, а количество узлов отдельных подсистем $M_1, M_2, ..., M_N$, т. е. число независимых узлов определяется формулой

$$M_1 + M_2 + \cdots + M_N = M.$$

Матрица узловых собственных и взаимных сопротивлений первой подсистемы $\underline{Z}_{i_1 j_1}$ составляется относительно единственного базисного узла;

матрица второй подсистемы $\underline{Z}_{i_2 j_2}$ формируется относительно граничного узла первой подсистемы. Последняя матрица узловых сопротивлений $\underline{Z}_{i_N j_N}$ подсистемы N составляется относительно граничного узла предпоследней подсистемы. После построения квазидиагональной матрицы $\underline{Z}_{ij}\left(\underline{Z}_{i_1 j_1}, \underline{Z}_{i_2 j_2}, \ldots, \underline{Z}_{i_N j_N}\right)$ формируется вспомогательная подматрица $\Delta\underline{Z}_{il}\left(\Delta\underline{Z}_{i_1 l}, \Delta\underline{Z}_{i_2 l}, \ldots, \Delta\underline{Z}_{i_N l}\right)$, число столбцов которой равно количеству удаленных ветвей, а число строк подматриц $\Delta\underline{Z}_{i_1 l}$, $\Delta\underline{Z}_{i_2 l}$, ..., $\Delta\underline{Z}_{i_N l}$ характеризуется количеством узлов отдельных подсистем.

Каждый столбец подматрицы $\Delta\underline{Z}_{il}\left(\Delta\underline{Z}_{i_1 l}, \Delta\underline{Z}_{i_2 l}, \ldots, \Delta\underline{Z}_{i_N l}\right)$ определяется разностью двух столбцов матрицы $\underline{Z}_{ij}\left(\underline{Z}_{i_1 j_1}, \underline{Z}_{i_2 j_2}, \ldots, \underline{Z}_{i_N j_N}\right)$, номера которых совпадают с номерами тех узлов, между которыми находились удаленные ветви. Затем строится подматрица $\Delta\underline{Z}_{\text{л}}$, ее строки определяются разностью двух строк подматрицы $\Delta\underline{Z}_{il}\left(\Delta\underline{Z}_{i_1 l}, \Delta\underline{Z}_{i_2 l}, \ldots, \Delta\underline{Z}_{i_N l}\right)$, а номера совпадают с номерами тех узлов, между которыми находились удаленные ветви.

Перед тем как построить подматрицу $\Delta\underline{Z}_{\text{л}}$, необходимо к элементам по столбцам каждой последующей подматрицы прибавить последнюю строку каждой предыдущей подматрицы. К диагональным элементам подматрицы $\Delta\underline{Z}_{\text{л}}$ прибавить диагональные элементы матрицы $\underline{Z}_{\text{л}}$, которые являются комплексными сопротивлениями удаленных ветвей, чем и завершается построение Z-расчетной квазидиагональной матрицы исследуемой ЭЭС.

При структурном изменении исходной схемы рассматриваемой ЭЭС из-за подключения (отключения) отдельных ветвей между соответствующими узлами возникает задача коррекции Z-расчетной матрицы, чему и посвящается настоящая работа.

Структурное изменение может быть, как в первой подсистеме, в которой находится базисный узел, так и в других радиально связанных подсистемах.

Случай коммутации в первой подсистеме. Изменение структуры в первой подсистеме может произойти из-за подключения (отключения) отдельных ветвей между узлами, в результате чего изменяется ее матрица $\underline{Z}_{i_1 j_1}$.

В случае, когда одновременно подключаются две ветви между узлами *A*–*B* и *C*–*D*, новая матрица $\underline{Z}^{\text{н}}_{i_1 j_1}$ определяется по формуле

$$\underline{Z}^{\text{н}}_{i_1 j_1} = \underline{Z}^{\text{п}}_{i_1 j_1} + \Delta\underline{Z}^{\text{д}}_{i_1 j_1}, \tag{2}$$

где $\underline{Z}^{\text{п}}_{i_1 j_1}$ является первоначальной матрицей, т. е. матрицей, сформированной до подключения новых ветвей, а $\Delta\underline{Z}^{\text{д}}_{i_1 j_1}$ – дополнительной матрицей, которая возникает из-за подключения указанных новых ветвей.

Элементы дополнительной матрицы определяются на основании приведенной ниже формулы

$$\underline{Z}_{ij}^{L} = \frac{1}{\Delta}\Big\{\left(\underline{Z}_{iA} - \underline{Z}_{iB}\right)\left[\Delta_{CD}\left(-\underline{Z}_{Aj} + \underline{Z}_{Bj}\right) + \Delta_{ABCD}\left(-\underline{Z}_{Cj} + \underline{Z}_{Dj}\right)\right] +$$
$$+ \left(\underline{Z}_{iC} - \underline{Z}_{iD}\right)\left[\Delta_{ABCD}\left(-\underline{Z}_{Aj} + \underline{Z}_{Bj}\right) + \Delta_{AB}\left(-\underline{Z}_{Cj} + \underline{Z}_{Dj}\right)\right]\Big\}, \tag{3}$$

где

$$\Delta_{AB} = \underline{Z}^{AB} + \underline{Z}_{AA} + \underline{Z}_{BB} - 2\underline{Z}_{AB};$$
$$\Delta_{CD} = \underline{Z}^{CD} + \underline{Z}_{CC} + \underline{Z}_{DD} - 2\underline{Z}_{CD}; \tag{4}$$

$$\Delta_{ABCD} = \underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{AD} - \underline{Z}_{BD} - \underline{Z}_{AC}; \tag{5}$$

$$\Delta = \Delta_{AB}\Delta_{CD} - \Delta_{ABCD}^{2}, \tag{6}$$

$\underline{Z}^{AB}$, $\underline{Z}^{CD}$ – комплексные сопротивления ветвей, которые подключаются между узлами A–B и C–D; $\underline{Z}_{iA}$, $\underline{Z}_{iC}$, $\underline{Z}_{Aj}$, $\underline{Z}_{Cj}$ – то же между основными узлами и теми узлами, к которым подключаются начала ветвей A–B и C–D; $\underline{Z}_{iB}$, $\underline{Z}_{iD}$, $\underline{Z}_{Bj}$, $\underline{Z}_{Dj}$ – то же между основными узлами и теми узлами к которым подключаются концы ветвей A–B и C–D; $\underline{Z}_{AA}$, $\underline{Z}_{CC}$, $\underline{Z}_{AC}$, $\underline{Z}_{CA}$ – то же между узлами, к которым подключаются начала соответствующих ветвей; $\underline{Z}_{BB}$, $\underline{Z}_{DD}$, $\underline{Z}_{BD}$, $\underline{Z}_{DB}$ – то же между узлами, к которым подключаются концы указанных ветвей; $\underline{Z}_{AB}$, $\underline{Z}_{AD}$, $\underline{Z}_{BA}$, $\underline{Z}_{BC}$ и $\underline{Z}_{CB}$, $\underline{Z}_{CD}$, $\underline{Z}_{DA}$, $\underline{Z}_{DC}$ – то же между узлами, к которым подключаются соответственно начала и концы коммутируемых ветвей.

Если предположить, что одновременно подключаются не две, а одна ветвь между узлами, выражение (3) принимает упрощенный вид

$$\underline{Z}_{ij}^{L} = \frac{\left(\underline{Z}_{iA} - \underline{Z}_{iB}\right)\left(-\underline{Z}_{Aj} + \underline{Z}_{Bj}\right)}{\underline{Z}^{AB} + \underline{Z}_{AA} + \underline{Z}_{BB} - 2\underline{Z}_{AB}}, \tag{7}$$

где $\underline{Z}_{iA}$, $\underline{Z}_{iB}$, $\underline{Z}_{Aj}$, $\underline{Z}_{Bj}$ являются комплексными сопротивлениями ветвей между основными узлами и узлами A и B соответственно; $\underline{Z}_{AA}$, $\underline{Z}_{BB}$ – собственные сопротивления узлов A и B, а $\underline{Z}_{AB}$ – взаимное сопротивление между этими же узлами.

В результате изменяется квадратная матрица узловых сопротивлений первой подсистемы, которая построена относительно единственного базисного узла и которую обозначаем $\underline{Z}'_{i_1 j_1}$. Квадратные матрицы узловых сопротивлений отдельных подсистем, т. е. матрицы $\underline{Z}_{i_2 j_2}$, $\underline{Z}_{i_3 j_3}$, …, $\underline{Z}_{i_N j_N}$, остаются неизменными, а искомая скорректированная расчетная матрица принимает следующий вид:

$$\begin{array}{|c|c|c|c|c|}
\hline
\underline{Z}'_{i_1 j_1} & & & & \Delta\underline{Z}'_{i_1 l} \\
\hline
 & \underline{Z}_{i_2 j_2} & & & \Delta\underline{Z}_{i_2 l} \\
\hline
 & & \cdots & & \cdots \\
\hline
 & & & Z_{i_N j_N} & \Delta Z_{i_N l} \\
\hline
 & & & & \Delta\underline{Z}'_{\text{л}} + \underline{Z}_{\text{л}} \\
\hline
\end{array}. \tag{8}$$

Как можно заметить из (8), прямоугольная подматрица $\Delta \underline{Z}'_{i_1 l}$ также корректируется в связи с изменением $\underline{Z}_{i_1 j_1}$. Что касается других прямоугольных подматриц $\Delta \underline{Z}_{i_2 l}, \Delta \underline{Z}_{i_3 l}, \ldots, \Delta \underline{Z}_{i_N l}$, то когда $i_2 l,\ i_3 l,\ \ldots,\ i_N l$ больше номеров отключенных ветвей, они остаются неизменными, в противном случае они также изменяются. При этом прямоугольная подматрица $\Delta \underline{Z}_{i_N l}$ остается неизменной, а квадратная подматрица $\Delta \underline{Z}'_{\text{л}}$ формируется указанным выше способом.

Случай коммутации в произвольной *k*-й подсистеме. Если квадратная матрица узловых сопротивлений $\underline{Z}_{i_1 j_1}$ первой подсистемы построена относительно единственного и основного базисного (балансирующего) узла, то этого нельзя сказать о матрицах узловых сопротивлений остальных подсистем. Каждая последующая матрица узловых сопротивлений k-й подсистемы $\underline{Z}_{i_k j_k}$ $(k \neq 1)$ строится относительно граничного узла предыдущей $(k-1)$-й.

Для осуществления структурного изменения матрицы узловых сопротивлений k-й подсистемы необходимо ее сформировать относительно граничного узла, принадлежащего данной подсистеме. Для этого достаточно из элементов $\underline{Z}_{i_k j_k}$ исходной расчетной матрицы (1) вычесть величину комплексного продольного сопротивления, связывающего k-ю подсистему с $(k-1)$-й, т. е. $\underline{Z}_{k(k-1)} = \underline{Z}_{(k-1)k}$. После этого можно осуществлять структурное изменение рассматриваемой k-й подсистемы, которое может произойти из-за подключения (отключения) отдельных ветвей.

В случае, когда одновременно подключаются две ветви, необходимо пользоваться выражением

$$\underline{Z}^{\text{н}}_{i_k j_k} = \underline{Z}^{\text{п}}_{i_k j_k} + \Delta \underline{Z}^{\text{д}}_{i_k j_k}, \tag{9}$$

в котором элементы дополнительной матрицы $\Delta \underline{Z}^{\text{д}}_{i_k j_k}$ определяются по формулам (3)…(6). При подключении одной ветви необходимо использовать (7).

После завершения построения матрицы узловых сопротивлений $\underline{Z}_{i_k j_k}$ рассматриваемой k-й подсистемы ее необходимо привести к прежней исходной форме, т. е. сформировать относительно граничной точки $(k-1)$-й подсистемы.

Для этого необходимо к элементам полученной новой подматрицы $\underline{Z}_{i_k j_k}$ прибавить величину комплексного сопротивления продольной ветви, связывающей $(k-1)$-ю подсистему с k-й. Если обозначить ее $\underline{Z}'_{i_k j_k}$, то искомая скорректированная расчетная матрица приобретет следующий вид:

$$\left[\begin{array}{ccccc|c}
\underline{Z}'_{i_1 j_1} & & & & & \Delta \underline{Z}_{i_1 l} \\
 & \ldots & & & & \ldots \\
 & & \underline{Z}'_{i_k j_k} & & & \Delta \underline{Z}'_{i_k l} \\
 & & & \ldots & & \ldots \\
 & & & & \underline{Z}_{i_N j_N} & \Delta \underline{Z}_{i_N l} \\
\hline
 & & & & & \Delta \underline{Z}'_{\text{л}} + \underline{Z}_{\text{л}}
\end{array}\right]. \tag{10}$$

Из (10) видно, что соответственно изменяется и подматрица $\Delta\underline{Z}_{i_k l_k}$. Следует отметить, что если подматрицы типа $\Delta\underline{Z}_{il}$ расположены выше $\Delta\underline{Z}'_{i_k l}$, то они не изменяются, если ниже – изменяются, неизменной останется лишь подматрица $\Delta\underline{Z}_{i_N l}$ последней подсистемы. Подматрицу $\Delta\underline{Z}'_{л}$, которая также изменяется, необходимо построить аналогичным способом.

Предложенный метод коррекции расчетной диакоптической Z-матрицы обеспечивает высокую маневренность при расчете установившихся и оптимальных режимов ЭЭС.

Численные эксперименты показывают, что для коррекции расчетной диакоптической Z-матрицы требуется сравнительно небольшой объем вычислительной работы.

В качестве примера рассматривается схема замещения одной ЭЭС, состоящей из 10 узлов. Исходная информация относительно пассивной части данной ЭЭС приводится в виде табл. 1.

Таблица 1

Исходная информация относительно пассивной части 10-узловой схемы

ЛЭП	*R*	*X*	ЛЭП	*R*	*X*
0–1	13,5	21,8	4–5	17,3	11,2
0–3	9,2	28,3	4–6	8,4	18,1
1–2	11,2	18,8	4–9	5,9	11,2
1–6	7,4	13,8	5–6	16,5	23,4
2–3	7,5	13,2	6–7	12,1	25,4
2–5	13,3	23,4	7–8	4,8	29,5
3–4	5,7	11,2	7–9	17,2	23,4
4–5	17,2	29,5	8–9	16,9	29,5

После удаления: $\underline{Z}^{1-6}_{\text{ЛЭП}} = 7{,}4 + j13{,}8$; $\underline{Z}^{2-5}_{\text{ЛЭП}} = 13{,}3 + j23{,}4$ и $\underline{Z}^{4-9}_{\text{ЛЭП}} = 5{,}9 + j11{,}2$, исследуемая ЭЭС представляется как совокупность радиально связанных трех подсистем, для которых необходимо построить матрицы узловых проводимостей $\underline{Y}_{i_1 j_1}$, $\underline{Y}_{i_2 j_2}$, $\underline{Y}_{i_3 j_3}$ получаемых подсистем.

Матрица узловых проводимостей $\underline{Y}_{i_1 j_1}$ первой подсистемы строится относительно базисного узла

$$\underline{Y}_{i_1 j_1} = \begin{array}{c c} & \begin{array}{ccc} \quad 1 & \qquad\qquad 2 & \qquad\qquad 3 \end{array} \\ \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \end{array} & \begin{bmatrix} 0{,}043921 - j0{,}072415 & -0{,}023388 + j0{,}039258 & 0 \\ -0{,}023388 + j0{,}039258 & 0{,}053567 - j0{,}095539 & -0{,}030179 + j0{,}056281 \\ 0 & -0{,}030179 + j0{,}056281 & 0{,}0405659 - j0{,}088239 \end{bmatrix} \end{array}.$$

Матрица узловых проводимостей $\underline{Y}_{i_2 j_2}$ второй подсистемы строится относительно 4-го узла

$$\begin{array}{ccc} & 5 & 6 \\ \underline{Y}_{i_2 j_2} = \begin{array}{c} 5 \\ 6 \end{array} & \multicolumn{2}{c}{\begin{bmatrix} 0{,}034877-j0{,}05384 & -0{,}020127+j0{,}028543 \\ -0{,}020127+j0{,}028543 & 0{,}0405659-j0{,}085686 \end{bmatrix}} \end{array}.$$

Затем строится матрица узловых проводимостей $\underline{Y}_{i_3 j_3}$ относительно 7-го узла

$$\begin{array}{ccc} & 8 & 9 \\ \underline{Y}_{i_3 j_3} = \begin{array}{c} 8 \\ 9 \end{array} & \multicolumn{2}{c}{\begin{bmatrix} 0{,}063141-j0{,}085228 & -0{,}020284+j0{,}028086 \\ -0{,}020284+j0{,}028086 & 0{,}035034-j0{,}053384 \end{bmatrix}} \end{array}.$$

Определив численные значения элементов матриц узловых проводимостей отдельных подсистем, можно найти также численные значения элементов соответствующих узловых сопротивлений:

$$\begin{array}{cccc} & 1 & 2 & 3 \\ \underline{Z}_{i_1 j_1} = \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \end{array} & \multicolumn{3}{c}{\begin{bmatrix} 9{,}218551-j16{,}113444 & 5{,}649506+j11{,}205334 & 3{,}256856+j7{,}581562 \\ 5{,}649506+j11{,}205334 & 10{,}306465-j20{,}849755 & 5{,}925091+j14{,}099379 \\ 3{,}256856+j7{,}581562 & 5{,}925091+j14{,}099379 & 7{,}621356+j18{,}844726 \end{bmatrix}} \end{array};(11)$$

$$\begin{array}{ccc} & 5 & 6 \\ \underline{Z}_{i_2 j_2} = \begin{array}{c} 5 \\ 6 \end{array} & \multicolumn{2}{c}{\begin{bmatrix} 10{,}251554-j15{,}974840 & 3{,}469542+j5{,}179099 \\ 3{,}469542+j5{,}17909 & 6{,}748542-j9{,}254754 \end{bmatrix}} \end{array};$$

$$\begin{array}{ccc} & 8 & 9 \\ \underline{Z}_{i_3 j_3} = \begin{array}{c} 8 \\ 9 \end{array} & \multicolumn{2}{c}{\begin{bmatrix} 6{,}770968+j9{,}267742 & 3{,}445161+j5{,}187097 \\ 3{,}445161+j5{,}187097 & 10{,}351612+j16{,}012903 \end{bmatrix}} \end{array}.$$

Если элементы матрицы $\underline{Z}_{i_1 j_1}$ рассчитаны относительно единственного базисного узла с индексом «0», а матрицы $\underline{Z}_{i_2 j_2}$ – относительно 4-го узла, то элементы матрицы $\underline{Z}_{i_2 j_2}$ необходимо пересчитать относительно узла 3.

Для этого достаточно к элементам матрицы $\underline{Z}_{i_2 j_2}$ прибавить комплексное сопротивление $\underline{Z}_{\text{ЛЭП}}^{3-4} = 5{,}7 + j11{,}2$

$$\begin{array}{cccc} & 1 & 2 & 3 \\ \underline{Z}_{i_2 j_2} = \begin{array}{c} 4 \\ 5 \\ 6 \end{array} & \multicolumn{3}{c}{\begin{bmatrix} 5{,}700000-j11{,}200000 & 5{,}700000-j11{,}200000 & 5{,}700000-j11{,}200000 \\ 5{,}700000-j11{,}200000 & 15{,}951554-j27{,}174840 & 9{,}169542+j16{,}379099 \\ 5{,}700000-j11{,}200000 & 9{,}169542+j16{,}379099 & 12{,}448542+j20{,}454754 \end{bmatrix}} \end{array}.$$

Элементы матрицы $\underline{Z}_{i_3 j_3}$ подсчитаны относительно 7-го узла, и чтобы их привести относительно узла 6, необходимо к ним добавить комплексное сопротивление $\underline{Z}_{\text{ЛЭП}}^{6-7} = 12{,}1 + j25{,}4$

$$\begin{array}{cccc} & 1 & 2 & 3 \\ \underline{Z}_{i_2 j_2} = \begin{array}{c} 4 \\ 5 \\ 6 \end{array} & \multicolumn{3}{c}{\begin{bmatrix} 12{,}100000-j25{,}400000 & 12{,}100000-j25{,}400000 & 12{,}100000-j25{,}400000 \\ 12{,}100000-j25{,}400000 & 18{,}870968-j34{,}667742 & 15{,}54516+j38{,}587097 \\ 12{,}100000-j25{,}400000 & 15{,}54516+j38{,}587097 & 22{,}455161+j41{,}412903 \end{bmatrix}} \end{array}.$$

Таким образом, матрица $\underline{Z}_{i_1 j_1}$ построена относительно базисного узла с нулевым индексом, матрица $\underline{Z}_{i_2 j_2}$ относительно узла 3, а матрица $\underline{Z}_{i_3 j_3}$ – относительно узла 6.

Представим теперь подматрицы $\underline{Z}_{i_1 j_1}$, $\underline{Z}_{i_2 j_2}$ и $\underline{Z}_{i_3 j_3}$ в квазидиагональном виде:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	9,218551+ +j16,113444	5,649506+ +j11,205334	3,256856+ +j7,581562						
2	5,649506+ +j11,205334	10,306465+ +j20,849755	5,925091+ +j14,099379						
3	3,256856+ +j7,581562	5,925091+ +j14,099379	7,621356+ +j18,844726						
4				5,700000+ +j11,200000	5,700000+ +j11,200000	5,700000+ +j11,200000			
5				5,700000+ +j11,200000	15,951554+ +j27,174840	9,169542+ +j16,379099			
6				5,700000+ +j11,200000	9,169542+ +j16,379099	12,448542+ +j20,454754			
7							12,10000+ +j25,400000	12,10000+ +j25,400000	12,10000+ +j25,400000
8							12,10000+ +j25,400000	18,870968+ +j34,667742	15,545161+ +j30,587097
9							12,10000+ +j25,400000	15,545161+ +j30,587097	22,451612+ +j41,412903

Комплексные сопротивления удаленных ЛЭП удобнее представить в виде следующей диагональной матрицы:

$$
\underline{Z}_q = \begin{array}{c} \\ 1 \\ 2 \\ 4 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} \quad 6 \quad & \quad 5 \quad & \quad 9 \quad \end{array} \\ \begin{bmatrix} 7{,}4 + j13{,}8 & & \\ & 13{,}3 + j23{,}4 & \\ & & 12{,}1 + j25{,}4 \end{bmatrix} \end{array}.
$$

Затем на основании приведенного выше алгоритма строим расчетную матрицу Z с численными элементами, которая имеет следующий вид:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1	9,218551+ +j16,113444	5,649506+ +j11,205334	3,256856+ +j7,581562							5,961905+ +j8,536348	2,392915+ +j3,625325	0,000000+ +j0,0000000
2	5,649506+ +j11,205334	10,306465+ +j20,849755	5,925091+ +j14,099379							0,275329+ +j2,894254	3,194582+ +j6,591156	0,000000+ +j0,0000000
3	3,256856+ +j7,581562	5,925091+ +j14,099379	7,621356+ +j18,844726							–4,365389– –j11,266025	–1,697148– –j4,746450	0,000000+ +j0,0000000
4				5,700000+ +j11,200000	5,700000+ +j11,200000	5,700000+ +j11,200000				–5,700000– –j11,200000	–5,700000– –j11,200000	0,000000+ +j0,0000000
5				5,700000+ +j11,200000	15,951554+ +j27,174840	9,169542+ +j16,379099				–9,169542– –j16,379099	–15,951554– –j27,174840	–3,4695155– –j5,179197
6				5,700000+ +j11,200000	9,169542+ +j16,379099	12,448542+ +j20,454754				–12,448542– –j20,454754	–9,169542– –j16,379099	–6,742080– –j9,254938
7							12,10000+ +j25,400000	12,10000+ +j25,400000	12,10000+ +j25,400000	0,000000+ +j0,0000000	0,000000+ +j0,0000000	–12,10000– –j25,400000
8							12,10000+ +j25,400000	18,870968+ +j34,667742	15,545161+ +j30,587097	0,000000+ +j0,0000000	0,000000+ +j0,0000000	–15,545161– –j30,587097
9							12,10000+ +j25,400000	15,545161+ +j30,587097	22,451612+ +j41,412903	0,000000+ +j0,0000000	0,000000+ +j0,0000000	–22,451612– –j41,412903
										30,269374+ +j53,457315	13,259574+ +j24,750972	6,742080+ +j9,254938
										13,259574+ +j24,750972	35,343169+ +j62,012733	3,469515+ +j5,179197
										6,742080+ +j9,254938	3,469515+ +j5,179197	35,343169+ +j62,012733

Приведенный численный пример наглядно показывает процесс построения расчетной Z-матрицы, коррекция которой не вызывает никаких затруднений.

Предположим, что произошло структурное изменение в первой подсистеме в результате подключения новой ЛЭП между узлами 1 и 2. При этом необходимо пользоваться формулой (7), принимая $A = 1$; $B = 2$:

$$\underline{Z}_{ij}^{L} = \frac{\left(\underline{Z}_{i1} - \underline{Z}_{i2}\right)\left(\underline{Z}_{1j} - \underline{Z}_{2j}\right)}{\underline{Z}^{12} + \underline{Z}_{11} + \underline{Z}_{22} - 2\underline{Z}_{12}}.$$

Обозначив

$$\Delta = \underline{Z}^{12} + \underline{Z}_{11} + \underline{Z}_{22} - 2\underline{Z}_{12}, \tag{12}$$

получим

$$\underline{Z}_{ij}^{L} = \frac{1}{\Delta}\left(\underline{Z}_{i1} - \underline{Z}_{i2}\right)\left(\underline{Z}_{1j} - \underline{Z}_{2j}\right). \tag{13}$$

Так как $\underline{Z}_{12} = 11{,}2 + j18{,}8$, а численные значения комплексных сопротивлений $\underline{Z}_{11}$, $\underline{Z}_{22}$ и $\underline{Z}_{12}$ известны из матрицы (11), значит и численные значения комплексной величины (12) известны.

Представим выражение дополнительной матрицы (13) в развернутой форме

$$\underline{Z}_{ij}^{L} = \frac{1}{\Delta}\begin{array}{c|c|c|c|} & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & \left(\underline{Z}_{11} - \underline{Z}_{12}\right)\left(-\underline{Z}_{11} + \underline{Z}_{21}\right) & \left(\underline{Z}_{11} - \underline{Z}_{12}\right)\left(-\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{22}\right) & \left(\underline{Z}_{11} - \underline{Z}_{12}\right)\left(-\underline{Z}_{13} + \underline{Z}_{23}\right) \\ \hline 2 & \left(\underline{Z}_{12} - \underline{Z}_{22}\right)\left(-\underline{Z}_{11} + \underline{Z}_{21}\right) & \left(\underline{Z}_{12} - \underline{Z}_{22}\right)\left(-\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{22}\right) & \left(\underline{Z}_{12} - \underline{Z}_{22}\right)\left(-\underline{Z}_{13} + \underline{Z}_{23}\right) \\ \hline 3 & \left(\underline{Z}_{31} - \underline{Z}_{32}\right)\left(-\underline{Z}_{11} + \underline{Z}_{21}\right) & \left(\underline{Z}_{31} - \underline{Z}_{32}\right)\left(-\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{22}\right) & \left(\underline{Z}_{31} - \underline{Z}_{32}\right)\left(-\underline{Z}_{13} + \underline{Z}_{22}\right) \\ \hline \end{array}. \tag{14}$$

Элементы матрицы (14) определяются на основании численных значений матрицы (11). Алгебраическая сумма элементов матриц (11) и (14) дает численные значения элементов искомой матрицы, измененной по структуре первой подсистемы. Устанавливая численные значения $\underline{Z}_{i_1 j_1}$ первой подсистемы, теперь не трудно построить расчетную Z-матрицу, измененную по структуре исследуемой ЭЭС, как это было продемонстрировано выше.

ВЫВОДЫ

1. Предложен новый метод коррекции диакоптической Z-матрицы при подключении (отключении) продольных ветвей схемы замещения ЭЭС.
2. Метод обеспечивает высокую маневренность при построении диакоптической математической модели установившегося режима ЭЭС.

3. Метод позволяет легко скорректировать установившийся режим ЭЭС при изменении исходной информации относительно пассивной части рассматриваемой схемы сети.

4. Вычислительные эксперименты показывают работоспособность метода коррекции диакоптической Z-матрицы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хачатрян В. С. К методам расчета собственных и взаимных сопротивлений сложных энергосистем // Электричество. – 1964. – № 10. – С. 47–51.

2. Хачатрян В. С., Суханов О. А. Диакоптика и задача определения обобщенных параметров больших энергосистем // Электричество. – 1973. – № 4. – С. 1–10.

3. Гераскин О. Т. Обобщенные параметры электрических сетей. – М.: Энергоиздат, 1977. – С. 112.

4. Хачатрян В. С., Балабекян М. А. Автоматизация разбивки больших систем на радиально связанные оптимальные подсистемы // Электричество. – 1977. – № 9. – С. 15–20.

5. Хачатрян В. С. Определение установившихся режимов больших электроэнергетических систем с применением метода Ньютона–Рафсона // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1974. – № 4. – С. 36–43.

6. Гераскин О. Т., Селеннова Т. Г. Решение уравнений установившегося режима больших электроэнергетических систем в Y-диакоптической форме итерационным методом Ньютона–Рафсона на многопроцессорных ЭВМ // Изв. вузов СССР. – 1994. – № 9, 10. – С. 13–24.

7. Веников В. А., Суханов О. А. Кибернетические модели электрических систем. – М.: Энергоиздат, 1982. – С. 328.

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

9. Гераскин О. Т. Методы декомпозиции для расчета установившихся режимов больших электроэнергетических систем // Изв. РАН. Энергетика. – 1997. – № 6. – С. 11–20.

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

Представлена кафедрой
электроэнергетики

Поступила 28.03.2003