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

УДК 621.311 ЭНЕРГЕТИКА

М.А. МНАЦАКАНЯН

РАСЧЕТ ДОПУСТИМОГО УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МЕТОДОМ ДИАКОПТИКИ

Предлагается новый метод расчета допустимого установившегося режима электроэнергетической системы с применением идеи диакоптики. С обеспечением допустимости установившегося режима отдельных подсистем обеспечивается допустимость установившегося режима для ЭЭС в целом.

Ключевые слова: подсистема, модель, узел, матрица, режим, система, параметр, функция, мощность, сеть, станция, нагрузка, аргумент.

При решении задач расчета оптимального режима электроэнергетической системы (ЭЭС) важное значение имеет вопрос определения дооптимального допустимого установившегося режима.

В настоящее время существует ряд методов расчета допустимого установившегося режима ЭЭС [1-4]. Если работа [1] посвящена расчету допустимого установившегося режима при Z-форме задания состояния сети, то [2] - при Y - форме. В [3] рассматривается упрощенный метод расчета допустимого установившегося режима, основанный на Z эквивалентированной ЭЭС. В отличие от вышеотмеченных работ, в [4] предлагается метод расчета допустимого установившегося режима ЭЭС при Y-Z форме задания состояния сети.

В данной работе впервые предлагается метод расчета допустимого установившегося режима, основанный на идее диакоптики.

В настоящее время самым перспективным направлением для решения любых режимных вопросов большой ЭЭС является идея декомпозиции, которая представляется как совокупность радиально связанных отдельных подсистем.

Постановка задачи. Рассматривается схема замещения большой ЭЭС, состоящая из $M+1$ узлов и N электрически связанных подсистем. Отдельные подсистемы, состоящие соответственно из M_1, M_2, …, M_N независимых узлов $\left(M_1+M_2+\dots+M_N=M\right)$, связаны между собой $L_{12}+1$, $L_{23}+1$, …, $L_{(N-1)N}+1$ ветвями.

Для всех электрически связанных подсистем выбирается единственный базисный (по напряжению) и балансирующий (по мощностям) станционный узел, в результате чего рассматриваемая схема замещения исследуемой ЭЭС будет состоять из M независимых узлов.

Выбирается следующая система индексов:

для станционных узлов типа P-U:

$$m, n = \left(m_1, n_1; m_2, n_2; \ldots; m_N, n_N\right); \tag{1}$$

для нагрузочных узлов типа P-Q:

$$k, \ell = \left(k_1, \ell_1; k_2, \ell_2; \ldots; k_N, \ell_N\right); \tag{2}$$

для произвольных узлов, в состав которых могут входить как станционные, так и нагрузочные узлы:

$$i, j = \left(i_1, j_1; i_1, j_1; \ldots; i_N, j_N\right). \tag{3}$$

Подындексы $1, 2, \ldots, N$ характеризуют номера подсистем схемы замещения.

В связи с выбранной системой индексов узловые режимные параметры большой схемы замещения можно представить как совокупность режимных параметров отдельных подсистем:

$$P_{i(j)} = \left(P_{i_1(j_1)}; P_{i_2(j_2)}; \ldots; P_{i_N(j_N)}\right), \tag{4}$$

$$Q_{i(j)} = \left(Q_{i_1(j_1)}; Q_{i_2(j_2)}; \ldots; Q_{i_N(j_N)}\right), \tag{5}$$

$$U_{i(j)} = \left(U_{i_1(j_1)}; U_{i_2(j_2)}; \ldots; U_{i_N(j_N)}\right), \tag{6}$$

$$\Psi_{ui(j)} = \left(\Psi_{ui_1(j_1)}; \Psi_{ui_2(j_2)}; \ldots; \Psi_{ui_N(j_N)}\right). \tag{7}$$

После удаления межсистемных связывающих ветвей $L = L_{12} + L_{23} + \cdots + L_{(N-1)N}$ отдельные подсистемы представляются как совокупность единственно связывающих ветвей подсистем.

<u>Решение задачи.</u> Если для исходной схемы замещения ЭЭС уравнение состояния в матричной форме необходимо представить в виде

$$\dot{U}_i = \dot{U}_Б + Z_{ij}\dot{I}_j, \tag{8}$$

то для радиально связанных подсистем как совокупность матричных уравнений отдельных подсистем:

$$\begin{cases} \dot{U}_{i_1} = \dot{U}_{Бi_1} + Z_{i_1 j_1}\dot{I}_{j_1}, \\ \dot{U}_{i_2} = \dot{U}_{Бi_2} + Z_{i_2 j_2}\dot{I}_{j_2}, \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \dot{U}_{i_N} = \dot{U}_{Бi_N} + Z_{i_N j_N}\dot{I}_{j_N}, \end{cases} \tag{9}$$

где величины $\dot{U}_{Бi_1}, \dot{U}_{Бi_2}, \ldots, \dot{U}_{Бi_N}$ учитывают структуру удаленных ветвей, связывающих радиально связанные отдельные подсистемы, и определяются с помощью следующих выражений:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Бi_1} &= \dot{U}_Б + Z_{i_1 M_1}\Delta\dot{I}_{1,N} + \Delta Z_{i_1 S_1}\dot{I}_\gamma, \\ \dot{U}_{Бi_2} &= \dot{U}_{M_1} + Z_{i_2 M_2}\Delta\dot{I}_{2,N} + \Delta Z_{i_2 S_2}\dot{I}_\gamma, \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \dot{U}_{Бi_N} &= \dot{U}_{M_1,N-1} + Z_{i_N M_N}\Delta\dot{I}_{N,N} + \Delta Z_{i_N S_N}\dot{I}_\gamma. \end{aligned} \tag{10}$$

Можно заметить, что в выражение $\dot{U}_{Бi_1}$ входит напряжение единственного базисного узла $\dot{U}_{Б}$.

Умножая отдельные строки (9) соответственно на $\hat{I}_{i_1}$, $\hat{I}_{i_2}$, …, $\hat{I}_{i_N}$, т.е. на комплексно-сопряженные токи, и разлагая их на действительные и мнимые составляющие, можно установить уравнения активных и реактивных мощностей отдельных подсистем:

$$\begin{cases} P_{i_1} = P_{Бi_1} + \sum\limits_{j_1}^{M_1} \left(R_{i_1 j_1} A_{i_1 j_1} + X_{i_1 j_1} B_{i_1 j_1} \right), \\ Q_{i_1} = Q_{Бi_1} + \sum\limits_{j_1}^{M_1} \left(X_{i_1 j_1} A_{i_1 j_1} - R_{i_1 j_1} B_{i_1 j_1} \right); \end{cases} \tag{11}$$

$$\begin{cases} P_{i_2} = P_{Бi_2} + \sum\limits_{j_2}^{M_1} \left(R_{i_2 j_2} A_{i_2 j_2} + X_{i_2 j_2} B_{i_2 j_2} \right), \\ Q_{i_2} = Q_{Бi_2} + \sum\limits_{j_2}^{M_1} \left(X_{i_2 j_2} A_{i_2 j_2} - R_{i_2 j_2} B_{i_2 j_2} \right); \end{cases} \tag{12}$$

. . . .

$$\begin{cases} P_{i_N} = P_{Бi_N} + \sum\limits_{j_N}^{M_1} \left(R_{i_N j_N} A_{i_N j_N} + X_{i_N j_N} B_{i_N j_N} \right), \\ Q_{i_N} = Q_{Бi_N} + \sum\limits_{j_N}^{M_1} \left(X_{i_N j_N} A_{i_N j_N} - R_{i_N j_N} B_{i_N j_N} \right), \end{cases} \tag{13}$$

где

$$\begin{aligned} A_{i_1 j_1} &= \frac{1}{U_{i_1} U_{j_1}} \Big[\left(P_{i_1} P_{j_1} + Q_{i_1} Q_{j_1} \right) \cos\left(\Psi_{ui_1} - \Psi_{uj_1} \right) + \\ &\quad + \left(Q_{i_1} P_{j_1} - P_{i_1} Q_{j_1} \right) \sin\left(\Psi_{ui_1} - \Psi_{uj_1} \right) \Big], \\ B_{i_1 j_1} &= \frac{1}{U_{i_1} U_{j_1}} \Big[\left(P_{i_1} P_{j_1} + Q_{i_1} Q_{j_1} \right) \sin\left(\Psi_{ui_1} - \Psi_{uj_1} \right) - \\ &\quad - \left(Q_{i_1} P_{j_1} - P_{i_1} Q_{j_1} \right) \cos\left(\Psi_{ui_1} - \Psi_{uj_1} \right) \Big]; \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned} A_{i_2 j_2} &= \frac{1}{U_{i_2} U_{j_2}} \Big[\left(P_{i_2} P_{j_2} + Q_{i_2} Q_{j_2} \right) \cos\left(\Psi_{ui_2} - \Psi_{uj_2} \right) + \\ &\quad + \left(Q_{i_2} P_{j_2} - P_{i_2} Q_{j_2} \right) \sin\left(\Psi_{ui_2} - \Psi_{uj_2} \right) \Big], \\ B_{i_2 j_2} &= \frac{1}{U_{i_2} U_{j_2}} \Big[\left(P_{i_2} P_{j_2} + Q_{i_2} Q_{j_2} \right) \sin\left(\Psi_{ui_2} - \Psi_{uj_2} \right) - \\ &\quad - \left(Q_{i_2} P_{j_2} - P_{i_2} Q_{j_2} \right) \cos\left(\Psi_{ui_2} - \Psi_{uj_2} \right) \Big]; \end{aligned} \tag{15}$$

. . . .

$$\begin{aligned} A_{i_N j_N} &= \frac{1}{U_{i_N} U_{j_N}} \Big[\big(P_{i_N} P_{j_N} + Q_{i_N} Q_{j_N} \big) \cos\big(\Psi_{ui_N} - \Psi_{uj_N} \big) + \\ &\quad + \big(Q_{i_N} P_{j_N} - P_{i_N} Q_{j_N} \big) \sin\big(\Psi_{ui_N} - \Psi_{uj_N} \big) \Big], \\ B_{i_N j_N} &= \frac{1}{U_{i_N} U_{j_N}} \Big[\big(P_{i_N} P_{j_N} + Q_{i_N} Q_{j_N} \big) \sin\big(\Psi_{ui_N} - \Psi_{uj_N} \big) - \\ &\quad - \big(Q_{i_N} P_{j_N} - P_{i_N} Q_{j_N} \big) \cos\big(\Psi_{ui_N} - \Psi_{uj_N} \big) \Big]. \end{aligned} \tag{16}$$

С другой стороны,

$$\begin{aligned} P_{Б1} &= \frac{U_{Бi}}{U_{i_1}} \big(P_{i_1} \cos \Psi_{ui_1} + Q_{i_1} \sin \Psi_{ui_1} \big), \\ Q_{Б1} &= -\frac{U_{Бi}}{U_{i_1}} \big(P_{i_1} \sin \Psi_{ui_1} - Q_{i_1} \cos \Psi_{ui_1} \big); \end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned} P_{Б2} &= \frac{U_{Бi}}{U_{i_2}} \big(P_{i_2} \cos \Psi_{ui_2} + Q_{i_2} \sin \Psi_{ui_2} \big), \\ Q_{Б2} &= -\frac{U_{Бi}}{U_{i_2}} \big(P_{i_2} \sin \Psi_{ui_2} - Q_{i_2} \cos \Psi_{ui_2} \big); \end{aligned} \tag{18}$$

. . . .

$$\begin{aligned} P_{БN} &= \frac{U_{Бi}}{U_{i_N}} \big(P_{i_N} \cos \Psi_{ui_N} + Q_{i_N} \sin \Psi_{ui_N} \big), \\ Q_{БN} &= -\frac{U_{Бi}}{U_{i_N}} \big(P_{i_N} \sin \Psi_{ui_N} - Q_{i_N} \cos \Psi_{ui_N} \big). \end{aligned} \tag{19}$$

С учетом выбранной системы индексов вышеприведенные системы уравнений (11)-(13) в неявновыраженных формах можно представить в следующем виде:

$$\Phi_{m_1}\big(P, Q, U, \Psi_u\big) = \begin{cases} \Phi_{pm_1}\big(P, Q, U, \Psi_u\big), \\ \Phi_{qm_1}\big(P, Q, U, \Psi_u\big); \end{cases} \tag{20}$$

$$\Phi_{k_1}\big(P, Q, U, \Psi_u\big) = \begin{cases} \Phi_{pk_1}\big(P, Q, U, \Psi_u\big), \\ \Phi_{qk_1}\big(P, Q, U, \Psi_u\big); \end{cases} \tag{21}$$

$$\Phi_{m_2}\big(P, Q, U, \Psi_u\big) = \begin{cases} \Phi_{pm_2}\big(P, Q, U, \Psi_u\big), \\ \Phi_{qm_2}\big(P, Q, U, \Psi_u\big); \end{cases} \tag{22}$$

$$\Phi_{k_2}(P, Q, U, \Psi_u) = \begin{cases} \Phi_{pk_2}(P, Q, U, \Psi_u), \\ \Phi_{qk_2}(P, Q, U, \Psi_u); \end{cases} \tag{23}$$

. . . .

$$\Phi_{m_N}(P, Q, U, \Psi_u) = \begin{cases} \Phi_{pm_N}(P, Q, U, \Psi_u), \\ \Phi_{qm_N}(P, Q, U, \Psi_u); \end{cases} \tag{24}$$

$$\Phi_{k_N}(P, Q, U, \Psi_u) = \begin{cases} \Phi_{pk_N}(P, Q, U, \Psi_u), \\ \Phi_{qk_N}(P, Q, U, \Psi_u). \end{cases} \tag{25}$$

В результате диакоптическую математическую модель допустимого установившегося режима ЭЭС можно представить в виде

$$\begin{cases} \Phi_{m_1}(P, Q, U, \Psi_u) = 0, \\ \Phi_{k_1}(P, Q, U, \Psi_u) = 0, \\ U_{m_1,\min} \le U_{m_1} \le U_{m_1,\max}, \\ Q_{m_1,\min} \le Q_{m_1} \le Q_{m_1,\max}; \end{cases} \tag{26}$$

$$\begin{cases} \Phi_{m_2}(P, Q, U, \Psi_u) = 0, \\ \Phi_{k_2}(P, Q, U, \Psi_u) = 0, \\ U_{m_2,\min} \le U_{m_2} \le U_{m_2,\max}, \\ Q_{m_2,\min} \le Q_{m_2} \le Q_{m_2,\max}; \end{cases} \tag{27}$$

. . . .

$$\begin{cases} \Phi_{m_N}(P, Q, U, \Psi_u) = 0, \\ \Phi_{k_N}(P, Q, U, \Psi_u) = 0, \\ U_{m_N,\min} \le U_{m_N} \le U_{m_N,\max}, \\ Q_{m_N,\min} \le Q_{m_N} \le Q_{m_N,\max}. \end{cases} \tag{28}$$

Из приведенной математической модели (26)-(28) можно заметить, что ограничения налагаются на реактивные мощности и модули напряжений станционных узлов как сверху (max), так и снизу (min).

Предположим, что независимые станционные узлы являются узлами типа P-Q, тогда искомыми режимными параметрами будут модули и аргументы комплексных напряжений. Рассмотрим математическую подмодель допустимого установившегося режима первой подсистемы, относительно искомых режимных параметров которых на основании метода Ньютона-Рафсона можно написать следующее рекуррентное выражение:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{um_1} \\ \hdashline \Psi_{uk_1} \\ \hdashline U_{m_1} \\ \hdashline U_{k_1} \end{bmatrix}^{И+1} = \begin{bmatrix} \Psi_{um_1} \\ \hdashline \Psi_{uk_1} \\ \hdashline U_{m_1} \\ \hdashline U_{k_1} \end{bmatrix}^{И} - \begin{bmatrix} \Delta\Psi_{um_1} \\ \hdashline \Delta\Psi_{uk_1} \\ \hdashline \Delta U_{m_1} \\ \hdashline \Delta U_{k_1} \end{bmatrix}, \tag{29}$$

где И - номер итерации.

Столбцевая матрица приращений выражения (29) определяется на основании матричного выражения

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{m_1} \\ \hdashline \Delta P_{k_1} \\ \hdashline \Delta Q_{m_1} \\ \hdashline \Delta Q_{k_1} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c:c|c:c} \frac{\partial\Phi_{pm_1}}{\partial\Psi_{un_1}} & \frac{\partial\Phi_{pm_1}}{\partial\Psi_{u\ell_1}} & \frac{\partial\Phi_{pm_1}}{\partial U_{n_1}} & \frac{\partial\Phi_{pm_1}}{\partial U_{\ell_1}} \\ \hdashline \frac{\partial\Phi_{pk_1}}{\partial\Psi_{un_1}} & \frac{\partial\Phi_{pk_1}}{\partial\Psi_{u\ell_1}} & \frac{\partial\Phi_{pk_1}}{\partial U_{n_1}} & \frac{\partial\Phi_{pk_1}}{\partial U_{\ell_1}} \\ \hline \frac{\partial\Phi_{qm_1}}{\partial\Psi_{un_1}} & \frac{\partial\Phi_{qm_1}}{\partial\Psi_{u\ell_1}} & \frac{\partial\Phi_{qm_1}}{\partial U_{n_1}} & \frac{\partial\Phi_{qm_1}}{\partial U_{\ell_1}} \\ \hdashline \frac{\partial\Phi_{qk_1}}{\partial\Psi_{un_1}} & \frac{\partial\Phi_{qk_1}}{\partial\Psi_{u\ell_1}} & \frac{\partial\Phi_{qk_1}}{\partial U_{n_1}} & \frac{\partial\Phi_{qk_1}}{\partial U_{\ell_1}} \end{array}\right] \cdot \begin{bmatrix} \Delta\Psi_{um_1} \\ \hdashline \Delta\Psi_{uk_1} \\ \hdashline \Delta U_{m_1} \\ \hdashline \Delta U_{k_1} \end{bmatrix}, \tag{30}$$

где ΔP_{m_1}, ΔQ_{m_1}, ΔP_{k_1}, ΔQ_{k_1} - приращения соответствующих режимных параметров независимых станционных узлов первой подсистемы.

Частные производные, входящие в матрицу Якоби, определяются с помощью аналитических выражений Φ_{pm_1} и Φ_{pk_1}, приведенных в (20).

Из матричного уравнения (30) искомый столбец приращений режимных параметров определяется в виде

$$\begin{bmatrix} \Delta\Psi_{um_1} \\ \hdashline \Delta\Psi_{uk_1} \\ \hdashline \Delta U_{m_1} \\ \hdashline \Delta U_{k_1} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c:c|c:c} \frac{\partial\Phi_{pm_1}}{\partial\Psi_{un_1}} & \frac{\partial\Phi_{pm_1}}{\partial\Psi_{u\ell_1}} & \frac{\partial\Phi_{pm_1}}{\partial U_{n_1}} & \frac{\partial\Phi_{pm_1}}{\partial U_{\ell_1}} \\ \hdashline \frac{\partial\Phi_{pk_1}}{\partial\Psi_{un_1}} & \frac{\partial\Phi_{pk_1}}{\partial\Psi_{u\ell_1}} & \frac{\partial\Phi_{pk_1}}{\partial U_{n_1}} & \frac{\partial\Phi_{pk_1}}{\partial U_{\ell_1}} \\ \hline \frac{\partial\Phi_{qm_1}}{\partial\Psi_{un_1}} & \frac{\partial\Phi_{qm_1}}{\partial\Psi_{u\ell_1}} & \frac{\partial\Phi_{qm_1}}{\partial U_{n_1}} & \frac{\partial\Phi_{qm_1}}{\partial U_{\ell_1}} \\ \hdashline \frac{\partial\Phi_{qk_1}}{\partial\Psi_{un_1}} & \frac{\partial\Phi_{qk_1}}{\partial\Psi_{u\ell_1}} & \frac{\partial\Phi_{qk_1}}{\partial U_{n_1}} & \frac{\partial\Phi_{qk_1}}{\partial U_{\ell_1}} \end{array}\right]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_{m_1} \\ \hdashline \Delta P_{k_1} \\ \hdashline \Delta Q_{m_1} \\ \hdashline \Delta Q_{k_1} \end{bmatrix}. \tag{31}$$

После обращения неособенной квадратной матрицы выражения (31) получим

$$
\begin{bmatrix} \Delta\Psi_{um_1} \\ \Delta\Psi_{uk_1} \\ \Delta U_{m_1} \\ \Delta U_{k_1} \end{bmatrix} =
\left[\begin{array}{cc|cc}
a_{m_1n_1} & a_{m_1\ell_1} & b_{m_1n_1} & b_{m_1\ell_1} \\
a_{k_1n_1} & a_{k_1\ell_1} & b_{k_1n_1} & b_{k_1\ell_1} \\ \hline
c_{m_1n_1} & c_{m_1\ell_1} & d_{m_1n_1} & d_{m_1\ell_1} \\
c_{k_1n_1} & c_{k_1\ell_1} & d_{k_1n_1} & d_{k_1\ell_1}
\end{array}\right] \cdot
\begin{bmatrix} \Delta P_{m_1} \\ \Delta P_{k_1} \\ \Delta Q_{m_1} \\ \Delta Q_{k_1} \end{bmatrix}, \tag{32}
$$

где a, b, c и d - элементы обращенной матрицы.

Представим матричное уравнение (32) в виде

$$
\begin{bmatrix} \Delta\Psi_{um_1} \\ \Delta\Psi_{uk_1} \\ \Delta U_{k_1} \\ \Delta U_{m_1} \end{bmatrix} =
\left[\begin{array}{cc|cc}
a_{m_1n_1} & a_{m_1\ell_1} & b_{m_1n_1} & b_{m_1\ell_1} \\
a_{k_1n_1} & a_{k_1\ell_1} & b_{k_1n_1} & b_{k_1\ell_1} \\ \hline
c_{k_1\ell_1} & c_{k_1n_1} & d_{k_1\ell_1} & d_{k_1n_1} \\
c_{m_1\ell_1} & c_{m_1n_1} & d_{m_1\ell_1} & d_{m_1n_1}
\end{array}\right] \cdot
\begin{bmatrix} \Delta P_{m_1} \\ \Delta P_{k_1} \\ \Delta Q_{k_1} \\ \Delta Q_{m_1} \end{bmatrix}. \tag{33}
$$

Предположим, что независимые станционные узлы являются узлами P-U, т.е. зафиксированы модули комплексных напряжений:

$$
\Delta U_{m_1} = 0\,. \tag{34}
$$

Тогда матричное уравнение (33) принимает вид

$$
\begin{bmatrix} \Delta\Psi_{um_1} \\ \Delta\Psi_{uk_1} \\ \Delta U_{k_1} \\ 0 \end{bmatrix} =
\left[\begin{array}{cc|cc}
a_{m_1n_1} & a_{m_1\ell_1} & b_{m_1n_1} & b_{m_1\ell_1} \\
a_{k_1n_1} & a_{k_1\ell_1} & b_{k_1n_1} & b_{k_1\ell_1} \\ \hline
c_{k_1\ell_1} & c_{k_1n_1} & d_{k_1\ell_1} & d_{k_1n_1} \\
c_{m_1\ell_1} & c_{m_1n_1} & d_{m_1\ell_1} & d_{m_1n_1}
\end{array}\right] \cdot
\begin{bmatrix} \Delta P_{m_1} \\ \Delta P_{k_1} \\ \Delta Q_{k_1} \\ \Delta Q_{m_1} \end{bmatrix}. \tag{35}
$$

На основании (35) можно написать следующие подматричные выражения:

$$
\begin{bmatrix} \Delta\Psi_{um_1} \\ \Delta\Psi_{uk_1} \\ \Delta U_{k_1} \end{bmatrix} =
\left[\begin{array}{cc|cc}
a_{m_1n_1} & a_{m_1\ell_1} & b_{m_1n_1} & b_{m_1\ell_1} \\
a_{k_1n_1} & a_{k_1\ell_1} & b_{k_1n_1} & b_{k_1\ell_1} \\ \hline
c_{k_1\ell_1} & c_{k_1n_1} & d_{k_1\ell_1} & d_{k_1n_1}
\end{array}\right] \cdot
\begin{bmatrix} \Delta P_{m_1} \\ \Delta P_{k_1} \\ \Delta Q_{k_1} \\ \Delta Q_{m_1} \end{bmatrix}, \tag{36}
$$

$$
0 = \left[\begin{array}{cc|cc} c_{m_1n_1} & c_{m_1\ell_1} & d_{m_1\ell_1} & d_{m_1n_1} \end{array}\right] \cdot
\begin{bmatrix} \Delta P_{m_1} \\ \Delta P_{k_1} \\ \Delta Q_{k_1} \\ \Delta Q_{m_1} \end{bmatrix}. \tag{37}
$$

Представляя матричное выражение (37) в строчной форме:

$$
0 = \left[c_{m_1n_1}\right] \cdot \left[\Delta P_{m_1}\right] + \left[c_{m_1\ell_1}\right] \cdot \left[\Delta P_{k_1}\right] + \left[d_{m_1\ell_1}\right] \cdot \left[\Delta Q_{k_1}\right] + \left[d_{m_1n_1}\right] \cdot \left[\Delta Q_{m_1}\right], \tag{38}
$$

можно установить следующее выражение для вектора реактивных мощностей независимых станционных узлов:

$$\left[\Delta Q_{m_1}\right] = -\left[d_{m_1 n_1}\right]^{-1} \cdot \left[Д_{n_1 \ell_1}\right], \tag{39}$$

где

$$\left[Д_{n_1 \ell_1}\right] = \left[c_{m_1 n_1}\right] \cdot \left[\Delta P_{m_1}\right] + \left[c_{m_1 \ell_1}\right] \cdot \left[\Delta P_{k_1}\right] + \left[d_{m_1 \ell_1}\right] \cdot \left[\Delta Q_{k_1}\right]. \tag{40}$$

Матричное выражение (39) позволяет установить численные значения реактивных мощностей независимых станционных узлов первой подсистемы, пользуясь выражением Φ_{k_1}, приведенным в математической модели (26).

После получения значений реактивных мощностей проверяется условие

$$Q_{m_1,\min} \le Q_{m_1} \le Q_{m_1,\max}, \tag{41}$$

при котором могут возникнуть следующие случаи.

1. Условие (41) полностью обеспечивается, что позволяет продолжить расчет установившегося режима. На основании (36) вычисляются численные значения приращений $\Delta\Psi_{um_1}$, $\Delta\Psi_{uk_1}$ и ΔU_{k_1}, затем определяется

$$\begin{bmatrix} \Psi_{um_1} \\ \hline \Psi_{uk_1} \\ \hline U_{k_1} \end{bmatrix}^{И+1} = \begin{bmatrix} \Psi_{um_1} \\ \hline \Psi_{uk_1} \\ \hline U_{k_1} \end{bmatrix}^{И} - \begin{bmatrix} \Delta\Psi_{um_1} \\ \hline \Delta\Psi_{uk_1} \\ \hline \Delta U_{k_1} \end{bmatrix}, \tag{42}$$

чем и завершается первая итерация.

2. Условие (41) обеспечивается частично. При этом возможно, что реактивные мощности независимых станционных узлов с индексом m_1 могут быть больше или меньше предела. Тогда станционный узел типа $P_{m_1} - U_{m_1}$ представляется в первом случае как $P_{m_1} - Q_{m_1\max}$, а во втором случае - $P_{m_1} - Q_{m_1\min}$. Разумеется, что при этом искомыми переменными являются модули и аргументы комплексных напряжений соответствующих узлов. Проверяется условие

$$U_{m_1,\min} \le U_{m_1} \le U_{m_1,\max}. \tag{43}$$

При нарушении условия (43) из станционных узлов типа $P_{m_1} - U_{m_1}$ переходим к станционным узлам типа $P_{m_1} - Q_{m_1}$ и т.д.

Осуществляя первую итерацию по первой подсистеме, определяем численные значения комплексных напряжений всех узлов и, следовательно, узла M_1, т.е. $\dot{U}_{m_1}$. Имея численные значения $\dot{U}_{m_1}$, устанавливаем по (10) численные значения $\dot{U}_{Бi_2}$ и формируем математическую модель допустимого установившегося режима второй подсистемы, т.е. (27). Осуществляя реализацию математической модели допустимого установившегося режима второй подсистемы, устанавливаем численные значения комплексных напряжений всех узлов и, следовательно, узла M_2 и формируем математическую модель третьей подсистемы и т.д. Осуществляя реализацию математической модели допустимого установившегося режима предпоследней подсистемы, устанавливаем численное значение $\dot{U}_{Бi_N}$ последней подсистемы и формируем математическую модель допустимого установившегося режима N-й подсистемы, т.е. (28).

На основании метода Ньютона-Рафсона устанавливаем следующее рекуррентное выражение:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{um_N} \\ \hdashline \Psi_{uk_N} \\ \hdashline U_{k_N} \end{bmatrix}^{И+1} = \begin{bmatrix} \Psi_{um_N} \\ \hdashline \Psi_{uk_N} \\ \hdashline U_{k_N} \end{bmatrix}^{И} - \begin{bmatrix} \Delta\Psi_{um_n} \\ \hdashline \Delta\Psi_{uk_N} \\ \hdashline \Delta U_{k_N} \end{bmatrix}, \tag{44}$$

где

$$\begin{bmatrix} \Delta\Psi_{um_N} \\ \hdashline \Delta\Psi_{uk_N} \\ \hdashline \Delta U_{k_N} \\ \hdashline \Delta U_{m_N} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c:c|c:c} a_{m_N n_N} & a_{m_N \ell_N} & b_{m_N n_N} & b_{m_N \ell_N} \\ \hdashline a_{k_1 n_N} & a_{k_N \ell_N} & b_{k_N n_N} & b_{k_N \ell_N} \\ \hline c_{k_N \ell_N} & c_{k_N n_N} & d_{k_N \ell_N} & d_{k_N n_N} \\ \hdashline c_{m_N \ell_N} & c_{m_N n_N} & d_{m_N \ell_N} & d_{m_N n_N} \end{array}\right] \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_{m_N} \\ \hdashline \Delta P_{k_N} \\ \hdashline \Delta Q_{k_N} \\ \hdashline \Delta Q_{m_N} \end{bmatrix}. \tag{45}$$

Предположим, что все станционные узлы N-й подсистемы являются узлами типа P-U, тогда:

$$\begin{bmatrix} \Delta\Psi_{um_N} \\ \hdashline \Delta\Psi_{uk_N} \\ \hdashline \Delta U_{k_N} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c:c|c:c} a_{m_N n_N} & a_{m_N \ell_N} & b_{m_N n_N} & b_{m_N \ell_N} \\ \hdashline a_{k_N n_N} & a_{k_N \ell_N} & b_{k_N n_N} & b_{k_N \ell_N} \\ \hline c_{k_N \ell_N} & c_{k_N n_N} & d_{k_N \ell_N} & d_{k_N n_N} \end{array}\right] \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_{m_N} \\ \hdashline \Delta P_{k_N} \\ \hdashline \Delta Q_{k_N} \\ \hdashline \Delta Q_{m_N} \end{bmatrix} \tag{46}$$

и

$$\left[\Delta Q_{m_n}\right] = -\left[d_{m_N n_N}\right]^{-1} \cdot \left[Д_{n_N \ell_N}\right], \tag{47}$$

где

$$\left[Д_{n_N \ell_N}\right] = \left[c_{m_N n_N}\right] \cdot \left[\Delta P_{m_N}\right] + \left[c_{m_N \ell_N}\right] \cdot \left[\Delta P_{k_N}\right] + \left[d_{m_N \ell_N}\right] \cdot \left[\Delta Q_{k_N}\right]. \tag{48}$$

Устанавливая на основании (47) численные значения реактивных мощностей независимых станционных узлов N-й подсистемы, проверяем условие

$$Q_{m_N,\min} \le Q_{m_N} \le Q_{m_N,\max}. \tag{49}$$

Если данное условие обеспечивается, то остальные режимные параметры определяются на основании рекуррентного выражения

$$\begin{bmatrix} \Psi_{um_N} \\ \hdashline \Psi_{uk_N} \\ \hdashline U_{k_N} \end{bmatrix}^{И+1} = \begin{bmatrix} \Psi_{um_N} \\ \hdashline \Psi_{uk_N} \\ \hdashline U_{k_N} \end{bmatrix}^{И} - \begin{bmatrix} \Delta\Psi_{um_N} \\ \hdashline \Delta\Psi_{uk_N} \\ \hdashline \Delta U_{k_N} \end{bmatrix}. \tag{50}$$

Если условие (49) не обеспечивается, то переходим к узлам типа P-Q до установления численных значений необходимых режимных параметров.

Завершая первые итерационные процессы по отдельным подсистемам, получаем полную картину режимных параметров для ЭЭС в целом, что является особенностью предложенного нового метода.

Итерационный процесс по расчету допустимого установившегося режима для ЭЭС считается завершенным, если при соблюдении условий

$$U_{m_i,\min} \le U_{m_i} \le U_{m_i,\max}, \tag{51}$$

$$Q_{m_i,\min} \le Q_{m_i} \le Q_{m_i,\max} \tag{52}$$

обеспечиваются также условия сходимости:

$$\left| P_i - \left[P_{Бi} - \Phi_{pi}(P, Q, U, \Psi_u)\right] \right| \le \Delta P_i, \tag{53}$$

$$\left| Q_i - \left[Q_{Бi} - \Phi_{qi}(P, Q, U, \Psi_u)\right] \right| \le \Delta Q_i, \tag{54}$$

где $i = 1, 2, 3, \ldots, N$.

Для некоторого упрощения итерационного процесса принимается, что

$$\Delta P_{i_1} = \Delta P_{i_2} = \Delta P_{i_3} = \cdots = \Delta P_{i_2} = \Delta P, \tag{55}$$

$$\Delta Q_{i_1} = \Delta Q_{i_2} = \Delta Q_{i_3} = \cdots = \Delta Q_{i_2} = \Delta Q, \tag{56}$$

где ΔP и ΔQ - выбранные нами положительные величины, характеризующие точность получения численных значений искомых режимных параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Хачатрян В.С., Аль-Исса Ибрахим, Хачатрян К.В.** Метод определения допустимого установившегося режима ЭЭС // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-1998.-Т. 51, № 3.- С.295-300.
2. **Каримян А.С.** Расчет допустимого установившегося режима электроэнергетической системы при Y-форме задания состояния сети // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-1999.-Т. 52, № 1.- С.43-50.
3. **Хачатрян К.В., Нашат А.А., Мкртчян Г.С.** Расчет допустимого установившегося режима Z эквивалентированной электроэнергетической системы // Моделирование, оптимизация, управление: Сб. науч. тр.- Ереван.-2000.- Вып. 3.- С.103-108.
4. **Сафарян В.С., Григорян С.Э.** Расчет допустимого установившегося режима электроэнергетической системы при Y-Z форме задания состояния сети // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2003.-Т. 56, № 3.- С. 417-425.
5. **Хачатрян В.С., Бадалян Н.П.** Расчет установившегося режима большой электроэнергетической системы методом диакоптики // Электричество.-2003.-№ 6.- С.13-17.
6. **Хачатрян В.С., Этмекчян Э.А., Бадалян Н.П.** Решение гибридных уравнений установившегося режима электроэнергетической системы методом диакоптики // Электричество .- 1999.- № 4.-С.7-12.
7. **Хачатрян В.С., Бадалян Н.П., Мнацаканян М.А.** Коррекция Y-Z диакоптической матрицы при изменении структуры исходной электроэнергетической системы // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2003.- Т. 56, № 3.- С. 411-416.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 10.10.2003.

Մ.Ա. ՄՆԱՑԱԿԱՆՅԱՆ

ԷԼԵԿՏՐԱԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԹՈՒՅԼԱՏՐԵԼԻ ԿԱՅՈՒՆԱՑՎԱԾ ՌԵԺԻՄԻ ՀԱՇՎԱՐԿԸ ԴԻԱԿՈՊՏԻԿԱԿԱՆ ՄԵԹՈԴՈՎ

Առաջարկվում է էլեկտրաէներգետիկական համակարգի թույլատրելի կայունացված ռեժիմի հաշվարկի դիակոպտիկական նոր մեթոդ: Լրիվ էլեկտրաէներգետիկական համակարգի համար ապահովվում է թույլատրելի կայունացված ռեժիմ՝ առանձին ենթահամակարգերի կայունացված ռեժիմների թույլատրելիության ապահովմամբ:

M.A. MNATSAKANYAN

CALCULATION FOR PERMISSIBLE STEADY-STATE CONDITIONS IN ELECTRIC POWER SYSTEMS BY THE DIACOPTIC METHOD

A new method of calculation for permissible steady-state conditions in the electric power system using a diacoptic idea is proposed. By providing permissibility in steady-state conditions of separate subsystems the permissibility in steady-state condition as a whole is provided for electric power plants.