

В.С. ХАЧАТРЯН, Е.А. ГЛАДУНЧИК, М.А. МНАЦАКАНЯН,
А.Р. ТОХУНЦ

МИНИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СЕТЯХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Рассматриваются вопросы минимизации потерь активной мощности в сетях электроэнергетической системы прямым методом оптимизации.

Ключевые слова: матрица, система, функция, формула, потеря, сеть, узел, режим, модель, уравнение.

В связи с созданием современных сложных и больших электроэнергетических систем (ЭЭС) кибернетического типа важное экономическое значение принимают вопросы минимизации потерь активной мощности в электрических сетях [1-6].

Разработка метода минимизации потерь активной мощности в электрических сетях имеет большой теоретический и практический интерес, чему и посвящается настоящая работа.

Принимается следующая система индексов:

- для станционных узлов: $m(n)=0, 1, 2, \dots, \Gamma$, где Γ - число независимых станционных узлов. Станционный узел с индексом "0" выбирается базисным (Б) по напряжениям и балансирующим по мощностям;
- для нагрузочных узлов: $k(\ell)=\Gamma+1, \Gamma+2, \dots, \Gamma+N$, где N - число нагрузочных узлов;
- для произвольных узлов, в состав которых входят как станционные, так и нагрузочные узлы: $i(j)=0, 1, 2, \dots, \Gamma, \Gamma+1, \Gamma+2, \Gamma+N$.

Введем обозначения $\Gamma+N=M$, где M - число независимых узлов рассматриваемой электроэнергетической системы.

Матричное уравнение состояния ЭЭС при Z-форме задания состояния сети имеет вид

$$\dot{U} = \dot{U}_B + Z\dot{I}, \quad (1)$$

где $\dot{U}$, $\dot{I}$ - многомерные векторы комплексных напряжений и токов независимых узлов или столбцовые матрицы; $\dot{U}_B$ - комплексное напряжение базисного (балансирующего) узла; Z - неособенная квадратная матрица комплексных сопротивлений независимых узлов или матрица узловых сопротивлений.

Матричное уравнение состояния (1) в алгебраической форме представляется в виде

$$\dot{U}_i = \dot{U}_B + \sum_{j=1}^M Z_{ij} \dot{I}_j. \quad (2)$$

Для перехода из формы " $\dot{U} - \dot{I}$ " к форме " $\dot{S}$ " необходимо обе части уравнения (2) умножить на комплексно-сопряженное значение тока $\hat{I}_i$. В результате получим

$$\dot{S}_i = \dot{U}_B \hat{I}_i + \sum_{j=1}^M Z_{ij} \hat{I}_i \dot{I}_j. \quad (3)$$

Принимая, что $\dot{U}_B = U_B$, можем написать

$$P_i = \operatorname{Re} \left(U_B \hat{I}_i + \sum_{j=1}^M Z_{ij} \hat{I}_i \dot{I}_j \right), \quad (4)$$

$$Q_i = \operatorname{Im} \left(U_B \hat{I}_i + \sum_{j=1}^M Z_{ij} \hat{I}_i \dot{I}_j \right) \quad (5)$$

или

$$P_i = U_B I'_i + \sum_{j=1}^M [(I'_i I'_j + I''_i I''_j) R_{ij} - (I'_i I''_j - I''_i I'_j) X_{ij}], \quad (6)$$

$$Q_i = -U_B I''_i + \sum_{j=1}^M [(I'_i I'_j + I''_i I''_j) X_{ij} + (I'_i I''_j - I''_i I'_j) R_{ij}], \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} I'_j &= \operatorname{Re}(\dot{I}_j), & I''_j &= \operatorname{Im}(\dot{I}_j), \\ R_{ij} &= \operatorname{Re}(Z), & X_{ij} &= \operatorname{Im}(Z). \end{aligned} \quad (8)$$

Если обозначить потери активной мощности через Π_a , то она определится как алгебраическая сумма активных мощностей всех независимых узлов и базисного (балансирующего) узла. В результате функция потерь активной мощности принимает следующий вид:

$$\Pi_a = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M (I'_i I'_j + I''_i I''_j) R_{ij}. \quad (9)$$

Как известно,

$$I'_{i(j)} = \frac{1}{U_{i(j)}} (P_{i(j)} \cos \Psi_{ui(j)} + jQ_i \sin \Psi_{ui(j)}),$$

$$I''_{i(j)} = \frac{1}{U_{i(j)}} (P_{i(j)} \sin \Psi_{ui(j)} - jQ_i \cos \Psi_{ui(j)}).$$
(10)

Подставив выражение (10) в (6) и (7), получим

$$P_i = \frac{U_B}{U_i} (P_i \cos \Psi_{ui} + Q_i \sin \Psi_{ui}) + \sum_{j=1}^M (R_{ij} A_{ij} + X_{ij} B_{ij}),$$
(11)

$$Q_i = -\frac{U_B}{U_i} (P_i \sin \Psi_{ui} - Q_i \cos \Psi_{ui}) + \sum_{j=1}^M (X_{ij} A_{ij} - R_{ij} B_{ij}),$$
(12)

где

$$A_{ij} = \frac{1}{U_i U_j} [(P_i P_j + Q_i Q_j) \cos(\Psi_{ui} - \Psi_{uj}) + (Q_i P_j + P_i Q_j) \sin(\Psi_{ui} - \Psi_{uj})],$$
(13)

$$B_{ij} = \frac{1}{U_i U_j} [(P_i P_j + Q_i Q_j) \sin(\Psi_{ui} - \Psi_{uj}) - (Q_i P_j - P_i Q_j) \cos(\Psi_{ui} - \Psi_{uj})].$$
(14)

При этом функция потерь активной мощности принимает вид

$$\Pi_a = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \left\{ \frac{R_{ij}}{U_i U_j} [(P_i P_j + Q_i Q_j) \cos(\Psi_{ui} - \Psi_{uj}) + (Q_i P_j - P_i Q_j) \sin(\Psi_{ui} - \Psi_{uj})] \right\}. \quad (15)$$

Представим функции (11) и (12) в следующем виде:

$$\Phi_{pi} = P_i - \left[\frac{U_B}{U_i} (P_i \cos \Psi_{ui} + Q_i \sin \Psi_{ui}) + \sum_{j=1}^M (R_{ij} A_{ij} + X_{ij} B_{ij}) \right] = 0,$$

$$\Phi_{qi} = Q_i - \left[-\frac{U_B}{U_i} (P_i \sin \Psi_{ui} - Q_i \cos \Psi_{ui}) + \sum_{j=1}^M (X_{ij} A_{ij} - R_{ij} B_{ij}) \right] = 0.$$
(16)

Если ввести следующие обозначения:

$$a_{ij} = \frac{R_{ij}}{U_i U_j} \cos(\Psi_{ui} - \Psi_{uj}),$$

$$b_{ij} = \frac{R_{ij}}{U_i U_j} \sin(\Psi_{ui} - \Psi_{uj}),$$
(17)

то функция Π_a примет вид

$$\Pi_a = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \{[(P_i P_j + Q_i Q_j) a_{ij} + (Q_i P_j - P_i Q_j) b_{ij}]\}. \quad (18)$$

Таким образом, как функции потерь Π_a , так и функции (16) зависят от режимных параметров. В результате задачу можно сформулировать следующим образом.

Требуется найти

$$\min \Pi_a = \min \Pi_a(P_i, Q_i, U_i, \Psi_{ui}) \quad (19)$$

при условии

$$\Phi_{pi}(P_i, Q_i, U_i, \Psi_{ui}) = 0,$$

$$\Phi_{qi}(P_i, Q_i, U_i, \Psi_{ui}) = 0. \quad (20)$$

Необходимое условие минимума функции (19) по активным мощностям имеет вид

$$\frac{\partial \Pi_a}{\partial P_m} = \left(\frac{\partial \Pi_a}{\partial P_m} \right) + \sum_{i=1}^M \frac{\partial \Pi_a}{\partial U_i} \frac{\partial U_i}{\partial P_m} + \sum_{i=1}^M \frac{\partial \Pi_a}{\partial \Psi_{ui}} \frac{\partial \Psi_{ui}}{\partial P_m} = 0 \quad (21)$$

или

$$\frac{\partial \Pi_a}{\partial P_m} + \sum_{i=1}^M \frac{\partial \Pi_a}{\partial U_i} \frac{\partial U_i}{\partial P_m} + \sum_{i=1}^M \frac{\partial \Pi_a}{\partial \Psi_{ui}} \frac{\partial \Psi_{ui}}{\partial P_m} = 0. \quad (22)$$

Частные производные, входящие в (22), определяются на основании следующих выражений:

$$\frac{\partial \Pi_a}{\partial P_m} = 2 \sum_{j=1}^M (a_{mj} P_j - b_{mj} Q_j), \quad (23)$$

$$\frac{\partial \Pi_a}{\partial U_i} = -\frac{2}{U_j} \sum_{j=1}^M [(P_i P_j + Q_i Q_j) a_{ij} + (Q_i P_j - P_i Q_j) b_{ij}], \quad (24)$$

$$\frac{\partial \Pi_a}{\partial \Psi_{ui}} = -2 \sum_{j=1}^M [(P_i P_j + Q_i Q_j) b_{ij} + (Q_i P_j - P_i Q_j) a_{ij}]. \quad (25)$$

Частные производные $\partial U_j / \partial P_m$, $\partial \Psi_{uj} / \partial Q_m$ определяются на основании уравнений связи (20):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial P_m} + \sum_{j=1}^M \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial U_j} \frac{\partial U_j}{\partial P_m} + \sum_{j=1}^M \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial \Psi_{uj}} \frac{\partial \Psi_{uj}}{\partial P_m} &= 0, \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial P_m} + \sum_{j=1}^M \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial U_j} \frac{\partial U_j}{\partial P_m} + \sum_{j=1}^M \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial \Psi_{uj}} \frac{\partial \Psi_{uj}}{\partial P_m} &= 0. \end{aligned} \quad (26)$$

В матричной форме систему уравнений (26) можно представить в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial U_j} \frac{\partial U_j}{\partial P_m} + \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial \Psi_{uj}} \frac{\partial \Psi_{uj}}{\partial P_m} &= - \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial P_m}, \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial U_j} \frac{\partial U_j}{\partial P_m} + \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial \Psi_{uj}} \frac{\partial \Psi_{uj}}{\partial P_m} &= - \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial P_m}. \end{aligned} \quad (27)$$

Система (27) в виде матричного уравнения имеет вид

$$\left[\begin{array}{c|c} \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial U_j} & \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial \Psi_{uj}} \\ \hline \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial U_j} & \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial \Psi_{uj}} \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{c} \frac{\partial U_j}{\partial P_m} \\ \frac{\partial \Psi_{uj}}{\partial P_m} \end{array} \right] = - \left[\begin{array}{c} \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial P_m} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial P_m} \end{array} \right]. \quad (28)$$

Пользуясь матричным уравнением (28), можно установить столбцовую матрицу искомых частных производных:

$$\left[\begin{array}{c} \frac{\partial U_j}{\partial P_m} \\ \frac{\partial \Psi_{uj}}{\partial P_m} \end{array} \right] = - \left[\begin{array}{c|c} \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial U_j} & \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial \Psi_{uj}} \\ \hline \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial U_j} & \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial \Psi_{uj}} \end{array} \right]^{-1} \cdot \left[\begin{array}{c} \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial P_m} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial P_m} \end{array} \right]. \quad (29)$$

Частные производные, входящие в матричное выражение (29), определяются в виде:

- при одинаковых индексах, т.е. когда $j=i$:

$$\frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial U_i} = \frac{U_B}{U_i^2} (P_i \cos \Psi_{ui} + Q_i \sin \Psi_{ui}) + \frac{1}{U_i} \sum_{j=1}^M (R_{ij} A_{ij} + X_{ij} B_{ij}), \quad (30)$$

$$\frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial U_i} = \frac{U_B}{U_i^2} (P_i \sin \Psi_{ui} - Q_i \cos \Psi_{ui}) + \frac{1}{U_i} \sum_{j=1}^M (X_{ij} A_{ij} - R_{ij} B_{ij}),$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial \Psi_{ui}} &= \frac{U_B}{U_i} (P_i \sin \Psi_{ui} - Q_i \cos \Psi_{ui}) + \\ &+ \sum_{j=1}^M [(P_i P_j + Q_i Q_j)(b_{ij} - c_{ij}) - (Q_i P_j - P_i Q_j)(a_{ij} - d_{ij})], \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial \Psi_{ui}} &= \frac{U_B}{U_i} (P_i \cos \Psi_{ui} + Q_i \sin \Psi_{ui}) + \\ &+ \sum_{j=1}^M [(P_i P_j + Q_i Q_j)(a_{ij} + d_{ij}) - (Q_i P_j - P_i Q_j)(b_{ij} + c_{ij})], \end{aligned} \quad (32)$$

где

$$c_{ij} = \frac{X_{ij}}{U_i U_j} \cos(\Psi_{ui} - \Psi_{uj}), \quad d_{ij} = \frac{X_{ij}}{U_i U_j} \sin(\Psi_{ui} - \Psi_{uj}); \quad (33)$$

- при разных индексах, т.е. когда $j \neq i$:

$$\frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial U_j} = \frac{1}{U_j} (R_{ij} A_{ij} + X_{ij} B_{ij}), \quad (34)$$

$$\frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial U_j} = \frac{1}{U_j} (X_{ij} A_{ij} - R_{ij} B_{ij}),$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial \Psi_{uj}} &= -[(P_i P_j + Q_i Q_j)(b_{ij} - c_{ij}) - (Q_i P_j - P_i Q_j)(a_{ij} - d_{ij})], \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial \Psi_{uj}} &= -[(P_i P_j + Q_i Q_j)(a_{ij} + d_{ij}) - (Q_i P_j - P_i Q_j)(b_{ij} + c_{ij})]. \end{aligned} \quad (35)$$

Затем определяем частные производные $\partial \Phi_{pi} / \partial P_m$, $\partial \Phi_{qi} / \partial P_m$, входящие в правую часть матричного выражения (29). При этом удобнее функции Φ_{pi} и Φ_{qi} представить в следующем виде:

$$\Phi_{pi} = P_i - \left[\frac{U_B}{U_i} (P_i \cos \Psi_{ui} + Q_i \sin \Psi_{ui}) \right] + \sum_{j=1}^M \{ [(P_i P_j + Q_i Q_j) a_{ij} + (Q_i P_j - P_i Q_j) b_{ij}] + \\ + [(P_i P_j + Q_i Q_j) d_{ij} + (Q_i P_j - P_i Q_j) c_{ij}] \} = 0, \quad (36)$$

$$\Phi_{qi} = Q_i - \left[-\frac{U_B}{U_i} (P_i \sin \Psi_{ui} - Q_i \cos \Psi_{ui}) \right] + \sum_{j=1}^M \{ [(P_i P_j + Q_i Q_j) c_{ij} + (Q_i P_j - P_i Q_j) d_{ij}] + \\ + [(P_i P_j + Q_i Q_j) b_{ij} + (Q_i P_j - P_i Q_j) a_{ij}] \} = 0 \quad (37)$$

или

$$\Phi_{pi} = P_i - \left[\frac{U_B}{U_i} (P_i \cos \Psi_{ui} + Q_i \sin \Psi_{ui}) \right] + (P_i^2 + Q_i^2) a_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^M \{ [(P_i P_j + Q_i Q_j) a_{ij} + \\ + (Q_i P_j - P_i Q_j) b_{ij}] + [(P_i P_j + Q_i Q_j) d_{ij} + (Q_i P_j - P_i Q_j) c_{ij}] \} = 0, \quad (38)$$

$$\Phi_{qi} = Q_i - \left[-\frac{U_B}{U_i} (P_i \sin \Psi_{ui} - Q_i \cos \Psi_{ui}) \right] + (P_i^2 + Q_i^2) c_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^M \{ [(P_i P_j + Q_i Q_j) c_{ij} + \\ + (Q_i P_j - P_i Q_j) d_{ij}] + [(P_i P_j + Q_i Q_j) b_{ij} + (Q_i P_j - P_i Q_j) a_{ij}] \} = 0. \quad (39)$$

Определим следующие типы частных производных:

$$\frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial P_i} = -\frac{U_B}{U_i} \cos \Psi_{ui} + 2P_i a_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^M [(P_j a_{ij} - Q_j b_{ij}) + (P_j d_{ij} - Q_j c_{ij})], \quad (40)$$

$$\frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial P_i} = \frac{U_B}{U_i} \sin \Psi_{ui} + 2P_i c_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^M [(P_j c_{ij} - Q_j d_{ij}) + (P_j b_{ij} - Q_j a_{ij})] \quad (41)$$

или

$$\frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial P_i} = -\frac{U_B}{U_i} \cos \Psi_{ui} + \frac{2P_i}{U_i^2} R_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^M [P_j (a_{ij} + d_{ij}) - Q_j (b_{ij} + c_{ij})], \quad (42)$$

$$\frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial P_i} = \frac{U_B}{U_i} \sin \Psi_{ui} + \frac{2P_i}{U_i^2} R_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^M [P_j (c_{ij} - b_{ij}) + Q_j (a_{ij} - d_{ij})]. \quad (43)$$

Заменяя индекс "i" на "m", получим выражения искомым производных:

$$\frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial P_m} = -\frac{U_B}{U_m} \cos \Psi_{um} + \frac{2P_m}{U_m^2} R_{mm} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m}}^M [P_j (a_{mj} + d_{mj}) - Q_j (b_{mj} + c_{mj})], \quad (44)$$

$$\frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial P_m} = \frac{U_B}{U_m} \sin \Psi_{um} + \frac{2P_m}{U_m^2} R_{mm} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m}}^M [P_j (c_{mj} - b_{mj}) + Q_j (a_{mj} - d_{mj})]. \quad (45)$$

Теперь рассмотрим выражение (22), представляя его в следующем виде:

$$\frac{\partial \Pi_a}{\partial P_m} = - \left(\sum_{i=1}^M \frac{\partial \Pi_a}{\partial U_i} \frac{\partial U_i}{\partial P_m} + \sum_{i=1}^M \frac{\partial \Pi_a}{\partial \Psi_{ui}} \frac{\partial \Psi_{ui}}{\partial P_m} \right). \quad (46)$$

При этом

$$\frac{\partial \Pi_a}{\partial P_m} = a_m,$$

где

$$a_m = - \left(\sum_{i=1}^M \frac{\partial \Pi_a}{\partial U_i} \frac{\partial U_i}{\partial P_m} + \sum_{i=1}^M \frac{\partial \Pi_a}{\partial \Psi_{ui}} \frac{\partial \Psi_{ui}}{\partial P_m} \right). \quad (47)$$

С другой стороны,

$$2 \sum_{j=1}^M (a_{mj} P_j - b_{mj} Q_j) = a_m$$

или

$$2 \sum_{n=1}^{\Gamma} (a_{mn} P_n - b_{mn} Q_n) + 2 \sum_{k=\Gamma+1}^M (a_{mk} Q_k + b_{mk} P_k) = a_m.$$

Затем

$$2 \sum_{n=1}^{\Gamma} a_{mn} P_n = a_m + 2 \sum_{n=1}^{\Gamma} b_{mn} Q_n - 2 \sum_{k=\Gamma+1}^{\Gamma} (a_{mk} Q_k + b_{mk} P_k) = a_m. \quad (48)$$

Полученное выражение (48) представим в следующем виде:

$$\sum_{n=1}^{\Gamma} a_{mn} P_n = b_m, \quad (49)$$

где

$$b_{mn} = \frac{1}{2}a_m + \sum_{n=1}^{\Gamma} b_{mn}Q_n - \sum_{k=\Gamma+1}^M (a_{mk}Q_k + b_{mk}P_k). \quad (50)$$

Первое слагаемое в (50) является переменной, и его численное значение устанавливается по ходу расчета установившегося режима. Второе слагаемое является известной величиной, поскольку станционные узлы являются узлами типа P-Q. Третье слагаемое относится к нагрузочным узлам и, следовательно, также является известным.

Таким образом, численное значение величины b_m устанавливается по ходу расчета установившегося режима рассматриваемой ЭЭС.

Представим выражение (49) в следующей развернутой форме:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{a}_{11}\mathbf{P}_1 + \mathbf{a}_{12}\mathbf{P}_2 + \cdots + \mathbf{a}_{1\Gamma}\mathbf{P}_\Gamma = \mathbf{b}_1 , \\ \mathbf{a}_{21}\mathbf{P}_1 + \mathbf{a}_{22}\mathbf{P}_2 + \cdots + \mathbf{a}_{2\Gamma}\mathbf{P}_\Gamma = \mathbf{b}_2 , \\ \\ \mathbf{a}_{\Gamma 1}\mathbf{P}_1 + \mathbf{a}_{\Gamma 2}\mathbf{P}_2 + \cdots + \mathbf{a}_{\Gamma \Gamma}\mathbf{P}_\Gamma = \mathbf{b}_\Gamma . \end{array} \right. \quad (51)$$

Относительно искомым активных мощностей независимых станционных узлов получим систему линейных алгебраических уравнений.

Представим систему линейных алгебраических уравнений (51) в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{a}_{11} & \mathbf{a}_{12} & \vdots & \mathbf{a}_{1\Gamma} \\ \mathbf{a}_{21} & \mathbf{a}_{22} & \vdots & \mathbf{a}_{2\Gamma} \\ \dots & \dots & \vdots & \dots \\ \mathbf{a}_{\Gamma 1} & \mathbf{a}_{\Gamma 2} & \vdots & \mathbf{a}_{\Gamma\Gamma} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 \\ \mathbf{P}_2 \\ \dots \\ \mathbf{P}_\Gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{b}_2 \\ \dots \\ \mathbf{b}_\Gamma \end{bmatrix}. \quad (52)$$

Обращая матрицу постоянных, получим

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 \\ \mathbf{P}_2 \\ \dots \\ \mathbf{P}_\Gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{11} & \mathbf{a}_{12} & \vdots & \mathbf{a}_{1\Gamma} \\ \mathbf{a}_{21} & \mathbf{a}_{22} & \vdots & \mathbf{a}_{2\Gamma} \\ \dots & \dots & \vdots & \dots \\ \mathbf{a}_{\Gamma 1} & \mathbf{a}_{\Gamma 2} & \vdots & \mathbf{a}_{\Gamma\Gamma} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{b}_2 \\ \dots \\ \mathbf{b}_\Gamma \end{bmatrix}. \quad (53)$$

Как видно из вышеприведенных выражений, для их формирования требуются численные значения режимных параметров установившегося режима исследуемой ЭЭС.

В связи с этим требуется осуществить расчет установившегося режима, т.е. решить систему нелинейных алгебраических уравнений (16). Соответствующее рекуррентное выражение, вытекающее из метода Ньютона-Рафсона, имеет вид

$$\begin{bmatrix} U_j \\ \vdots \\ \Psi_{uj} \end{bmatrix}^I = \begin{bmatrix} U_j \\ \vdots \\ \Psi_{uj} \end{bmatrix}^{I-1} - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial U_j} & \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial \Psi_{uj}} \\ \hline \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial U_j} & \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial \Psi_{uj}} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{pi} \\ \vdots \\ \Phi_{qi} \end{bmatrix}. \quad (54)$$

Частные производные, входящие в квадратную матрицу Якоби, определяются выражениями (30)-(35).

На основании предложенного метода минимизации потерь активной мощности в сетях ЭЭС предложен соответствующий вычислительный алгоритм, сущность которого заключается в следующем:

1. Осуществляется расчет установившегося режима при заданных активных и реактивных мощностях станционных узлов и напряжении базисного (балансирующего) узла. В результате для каждого узла имеем четыре режимных параметра - активную, реактивную мощности, модули и аргументы комплексных напряжений.
2. Устанавливаются численные значения a_{ij} , b_{ij} , c_{ij} и d_{ij} , а также частные производные $\partial P_a / \partial U_j$ и $\partial P_a / \partial \Psi_{uj}$.
3. На основе численных значений матрицы Якоби в (29) и численных значений $\partial \Phi_{pi} / \partial P_m$, $\partial \Phi_{pi} / \partial P_n$ устанавливаются численные значения величины b_m согласно (50).
4. Формируется система линейных алгебраических уравнений (51) и устанавливаются предварительные численные значения оптимальных активных мощностей независимых станционных узлов.
5. Имея численные значения активных мощностей независимых станционных узлов, в результате первой итерации при постоянном значении реактивных мощностей необходимо проверить следующее условие сходимости:

$$|P_m^{I+1} - P_m^I| \leq \Delta P_m = \Delta P, \quad (55)$$

где ΔP - положительная величина, характеризующая точность данного решения.

Если это условие не удовлетворяется, то решение задачи необходимо повторить, начиная с первого пункта. Следует отметить, что новая итерация осуществляется при использовании активных мощностей независимых станционных узлов, численные значения которых получены из условия их оптимальности.

Таким образом, решение задачи минимизации потерь активной мощности в сетях ЭЭС считается завершенным, если обеспечивается условие (55), т.е. условие сходимости.

В результате решения задачи минимизации потерь активной мощности в сетях устанавливаются численные оптимальные значения активных мощностей станционных узлов и значения параметров установившегося режима исследуемой ЭЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Хачатрян В. С.** Метод расчета потерь мощности в сетях энергосистемы // Изв. АН СССР. Сер. ТН.-1962.- №1.-С. 13-24.
2. **Хачатрян В.С.** Минимизация потерь активной мощности в электрических сетях // Изв. АН СССР. Сер. ТН.-1962.- №5.-С. 33-42.
3. **Хачатрян В.С.** К вопросу об определении потерь мощности в высоковольтных сетях энергосистемы // Изв. АН СССР. Сер. ТН.-1963.- №5.- С. 31-40.
4. **Хачатрян В.С.** К вопросу об определении производных от потерь активной и реактивной мощности по активным мощностям станционных узлов // Изв. АН СССР. Энергетика и Транспорт.-1970.- №2.-С. 101-108.
5. **Хачатрян В.С.** Метод и алгоритм оптимизации режимов больших энергосистем // Изв. АН СССР. Энергетика и Транспорт.-1976.- №5.-С. 24-34.
6. **Хачатрян В.С., Ибрахим А.И.** Оптимизация режима электроэнергетической системы по реактивным мощностям прямым методом оптимизации при Z форме задания состояния сети // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-1997.-Т. 50, №2.-С.89-95.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 10.05.2004.

**Վ.Ս. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Ե.Ա. ԳԼԱԴՈՒՆՉԻԿ, Մ.Ա. ՄՆԱՏԱԿԱՆՅԱՆ,
Ա.Ռ. ԹՈՒՆՈՒՆՑ
ԱԿՏԻՎ ՀԶՈՐՈՒԹՅԱՆ ԿՈՐՄՏԻ ՆՎԱԶԱՐԿՈՒՄԸ
ԷԼԵԿՏՐԱԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՑԱՆՑՈՒՄ**

Դիտարկվում է էլեկտրաէներգետիկական համակարգի էլեկտրական ցանցում ակտիվ հզորության կորստի նվազարկման խնդրի լուծումը լավարկման ուղղակի մեթոդով:

**V. S. KHACHATRYAN, E.A. GLADUNCHIK, M.A. MNATSAKANYAN,
A. R. TOKHUNTS
MINIMIZATION OF ACTIVE POWER LOSSES IN POWER SUPPLY MAINS**

Minimization problems of active power losses in powder supply mains by a direct optimization method are considered.