ISSN 0002-306X. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2006. Т. LIX, № 1.

УДК 621.311.1.001.24 ЭНЕРГЕТИКА

В.С. ХАЧАТРЯН К. В. ХАЧАТРЯН, С. Э. ГРИГОРЯН, А.Г. ГУЛЯН

РАСЧЕТ ДОПУСТИМОГО УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ P-Q, P-U ТИПАХ СТАНЦИОННЫХ УЗЛОВ

Предлагается метод расчета допустимого установившегося режима ЭЭС при P-Q и P-U типах станционных узлов.

Ключевые слова: система, матрица, станция, оптимизация, допустимый установившийся режим, модель, мощность, модуль, аргумент, узел.

Проблема расчета установившегося и допустимого установившегося режимов является началом решения множества режимных вопросов электроэнергетической системы (ЭЭС) [1-14]. В настоящее время оптимизация режимов ЭЭС осуществляется либо по P, либо по P-Q или P-U параметрам электрических станций. Однако большое теоретическое и практическое значение имеет проблема оптимизации режима ЭЭС одновременно по P-Q и по P-U параметрам электрических станций. В связи с этим приобретает также большое значение проблема расчета допустимого установившегося режима одновременно по P-Q и P-U типам станционных узлов, который рассматривается как дооптимальный режим при оптимизации режима ЭЭС.

С целью построения соответствующей математической модели принимается следующая система индексов: $m(n) = 0, 1, 2, \ldots, \Gamma_1$ где Γ_1 - число станционных узлов типа P-Q. Станционный узел с нулевым индексом выбирается в качестве базисного (балансирующего); $k(\ell) = \Gamma_1 + 1, \Gamma_1 + 2, \ldots, \Gamma_1 + \Gamma_2$, где Γ_2 - число станционных узлов типа P-U; $i(j) = \Gamma + 1, \Gamma + 2, \ldots, \Gamma + H$, где H – число нагрузочных узлов типа P-Q, причем $\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2$ и $\Gamma + H = M$.

Как можно заметить, рассматриваемая ЭЭС состоит из M+1 узлов и, следовательно, из M независимых узлов.

При этом математическую модель допустимого установившегося режима ЭЭС при Y форме задания состояния сети можно представить в виде

$$\Phi_p(U, \Psi_u) = \begin{cases} \Phi_{pm}(U, \Psi_u) = P_m - \varphi_{pm}(U_n, \Psi_{un}; U_\ell, \Psi_{u\ell}; U_j, \Psi_{uj}) = 0, \\ \Phi_{pk}(U, \Psi_u) = P_k - \varphi_{pk}(U_n, \Psi_{un}; U_\ell, \Psi_{u\ell}; U_j, \Psi_{uj}) = 0, \\ \Phi_{pi}(U, \Psi_u) = P_i - \varphi_{pi}(U_n, \Psi_{un}; U_\ell, \Psi_{u\ell}; U_j, \Psi_{uj}) = 0; \end{cases} \quad (1)$$

$$\Phi_q(U,\Psi_u)=\begin{cases}\Phi_{qm}(U,\Psi_u)=Q_m-\varphi_{qm}(U_n,\Psi_{un};U_\ell,\Psi_{u\ell};U_j,\Psi_{uj})=0,\\ \Phi_{qk}(U,\Psi_u)=Q_k-\varphi_{qk}(U_n,\Psi_{un};U_\ell,\Psi_{u\ell};U_j,\Psi_{uj})=0,\\ \Phi_{qi}(U,\Psi_u)=Q_i-\varphi_{qi}(U_n,\Psi_{un};U_\ell,\Psi_{u\ell};U_j,\Psi_{uj})=0;\end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}&U_{n,\min}\le U_n\le U_{n,\max},\\ &Q_{n,\min}\le Q_n\le Q_{n,\max};\end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}&U_{\ell,\min}\le U_\ell\le U_{\ell,\max},\\ &Q_{\ell,\min}\le Q_\ell\le Q_{\ell,\max}.\end{aligned} \tag{4}$$

Из приведенной математической модели (1)-(4) можно заметить, что ограничения типа неравенств (3) налагаются на станционные узлы типа P-Q, а ограничения типа (4) – на станционные узлы типа P-U.

В развернутой форме функции типа φ_p и φ_q, входящие в (1) и (2), определяются в виде

$$\begin{aligned}\varphi_{pm}(U,\Psi_u)=U_m\Bigg\{&\sum_{n=0}^{\Gamma_1}\left[g_{mn}\cos(\Psi_{Um}-\Psi_{Un})+b_{mn}\sin(\Psi_{Um}-\Psi_{Un})\right]U_n+\\ &+\sum_{\ell=\Gamma_1+1}^{\Gamma}\left[g_{m\ell}\cos(\Psi_{Um}-\Psi_{U\ell})+b_{m\ell}\sin(\Psi_{Um}-\Psi_{U\ell})\right]U_\ell+\\ &+\sum_{j=\Gamma+1}^{M}\left[g_{kj}\cos(\Psi_{Uk}-\Psi_{Uj})+b_{kj}\sin(\Psi_{Uk}-\Psi_{Uj})\right]U_j\Bigg\},\end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}\varphi_{pk}(U,\Psi_u)=U_k\Bigg\{&\sum_{n=0}^{\Gamma_1}\left[g_{kn}\cos(\Psi_{Uk}-\Psi_{Un})+b_{kn}\sin(\Psi_{Uk}-\Psi_{Un})\right]U_n+\\ &+\sum_{\ell=\Gamma_1+1}^{\Gamma}\left[g_{k\ell}\cos(\Psi_{Uk}-\Psi_{U\ell})+b_{k\ell}\sin(\Psi_{Uk}-\Psi_{U\ell})\right]U_\ell+\\ &+\sum_{j=\Gamma+1}^{M}\left[g_{kj}\cos(\Psi_{Uk}-\Psi_{Uj})+b_{kj}\sin(\Psi_{Uk}-\Psi_{Uj})\right]U_j\Bigg\},\end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}\varphi_{pi}(U,\Psi_u)=U_i\Bigg\{&\sum_{n=0}^{\Gamma_1}\left[g_{in}\cos(\Psi_{Ui}-\Psi_{Un})+b_{in}\sin(\Psi_{Ui}-\Psi_{Un})\right]U_n+\\ &+\sum_{\ell=\Gamma_1+1}^{\Gamma}\left[g_{i\ell}\cos(\Psi_{Ui}-\Psi_{U\ell})+b_{i\ell}\sin(\Psi_{Ui}-\Psi_{U\ell})\right]U_\ell+\\ &+\sum_{j=\Gamma+1}^{M}\left[g_{ij}\cos(\Psi_{Ui}-\Psi_{Uj})+b_{ij}\sin(\Psi_{Ui}-\Psi_{Uj})\right]U_j\Bigg\},\end{aligned} \tag{7}$$

$$\varphi_{qm}(U,\Psi_u)=U_m\left\{\sum_{n=0}^{\Gamma_1}\left[g_{mn}\sin(\Psi_{Um}-\Psi_{Un})-b_{mn}\cos(\Psi_{Um}-\Psi_{Un})\right]U_n+\right.$$

$$+\sum_{\ell=\Gamma_1+1}^{\Gamma}\left[g_{m\ell}\sin(\Psi_{Um}-\Psi_{U\ell})-b_{m\ell}\cos(\Psi_{Um}-\Psi_{U\ell})\right]U_\ell+ \tag{8}$$

$$\left.+\sum_{j=\Gamma+1}^{M}\left[g_{mj}\sin(\Psi_{Um}-\Psi_{Uj})-b_{mj}\cos(\Psi_{Um}-\Psi_{Uj})\right]U_j\right\},$$

$$\varphi_{qk}(U,\Psi_u)=U_k\left\{\sum_{n=0}^{\Gamma_1}\left[g_{kn}\sin(\Psi_{Uk}-\Psi_{Un})-b_{kn}\cos(\Psi_{Uk}-\Psi_{Un})\right]U_n+\right.$$

$$+\sum_{\ell=\Gamma_1+1}^{\Gamma}\left[g_{k\ell}\sin(\Psi_{Uk}-\Psi_{U\ell})-b_{k\ell}\cos(\Psi_{Uk}-\Psi_{U\ell})\right]U_\ell+ \tag{9}$$

$$\left.+\sum_{j=\Gamma+1}^{M}\left[g_{kj}\sin(\Psi_{Uk}-\Psi_{Uj})-b_{kj}\cos(\Psi_{Uk}-\Psi_{Uj})\right]U_j\right\},$$

$$\varphi_{qi}(U,\Psi_u)=U_i\left\{\sum_{n=0}^{\Gamma_1}\left[g_{in}\sin(\Psi_{Ui}-\Psi_{Un})-b_{in}\cos(\Psi_{Ui}-\Psi_{Un})\right]U_n+\right.$$

$$+\sum_{\ell=\Gamma_1+1}^{\Gamma}\left[g_{i\ell}\sin(\Psi_{Ui}-\Psi_{U\ell})-b_{i\ell}\cos(\Psi_{Ui}-\Psi_{U\ell})\right]U_\ell+ \tag{10}$$

$$\left.+\sum_{j=\Gamma+1}^{M}\left[g_{ij}\sin(\Psi_{Ui}-\Psi_{Uj})-b_{ij}\cos(\Psi_{Ui}-\Psi_{Uj})\right]U_j\right\}.$$

Предположим, все независимые узлы являются узлами типа P-Q, при этом необходимо определить аргументы и модули комплексных напряжений тех же узлов. Для определения вышеотмеченных неизвестных на основании метода Ньютона-Рафсона можно написать следующее рекуррентное выражение:

$$\begin{bmatrix}\Psi_{um}\\ U_m\\ \hline \Psi_{uk}\\ U_k\\ \hline \Psi_{ui}\\ U_i\end{bmatrix}^{И+1}=\begin{bmatrix}\Psi_{um}\\ U_m\\ \hline \Psi_{uk}\\ U_k\\ \hline \Psi_{ui}\\ U_i\end{bmatrix}^{И}-\begin{bmatrix}\Delta\Psi_{um}\\ \Delta U_m\\ \hline \Delta\Psi_{uk}\\ \Delta U_k\\ \hline \Delta\Psi_{ui}\\ \Delta U_i\end{bmatrix}, \tag{11}$$

где И – номер итерации.

Приращения $\Delta\Psi_{um}, \Delta\Psi_{uk}, \Delta\Psi_{ui}$, а также $\Delta U_m, \Delta U_k$ и ΔU_i определяются на основании следующего матричного уравнения:

$$
\begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta Q_m \\ \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{un}} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{u\ell}} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_\ell} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{uj}} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_j} \\
\frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{un}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{u\ell}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_\ell} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{uj}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_j} \\
\frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{un}} & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{u\ell}} & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_\ell} & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{uj}} & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_j} \\
\frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial \Psi_{un}} & \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial \Psi_{u\ell}} & \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial U_\ell} & \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial \Psi_{uj}} & \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial U_j} \\
\frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial \Psi_{un}} & \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial \Psi_{u\ell}} & \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial U_\ell} & \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial \Psi_{uj}} & \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial U_j} \\
\frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial \Psi_{un}} & \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial \Psi_{u\ell}} & \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial U_\ell} & \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial \Psi_{uj}} & \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial U_j}
\end{bmatrix}
\cdot
\begin{bmatrix} \Delta \Psi_{um} \\ \Delta U_m \\ \Delta \Psi_{uk} \\ \Delta U_k \\ \Delta \Psi_{ui} \\ \Delta U_i \end{bmatrix}, \qquad (12)
$$

где

$$
\begin{cases}
\Delta P_m = P_m - \varphi_{pm}\left(U_n, \Psi_{un}; U_\ell, \Psi_{u\ell}; U_j, \Psi_{uj}\right) = \Phi_{pm}, \\
\Delta P_k = P_k - \varphi_{pk}\left(U_n, \Psi_{un}; U_\ell, \Psi_{u\ell}; U_j, \Psi_{uj}\right) = \Phi_{pk}, \\
\Delta P_i = P_i - \varphi_{pi}\left(U_n, \Psi_{un}; U_\ell, \Psi_{u\ell}; U_j, \Psi_{uj}\right) = \Phi_{pi};
\end{cases} \qquad (13)
$$

$$
\begin{cases}
\Delta Q_m = Q_m - \varphi_{qm}\left(U_n, \Psi_{un}; U_\ell, \Psi_{u\ell}; U_j, \Psi_{uj}\right) = \Phi_{pm}, \\
\Delta Q_k = Q_k - \varphi_{qk}\left(U_n, \Psi_{un}; U_\ell, \Psi_{u\ell}; U_j, \Psi_{uj}\right) = \Phi_{pk}, \\
\Delta Q_i = Q_i - \varphi_{qi}\left(U_n, \Psi_{un}; U_\ell, \Psi_{u\ell}; U_j, \Psi_{uj}\right) = \Phi_{pi}.
\end{cases} \qquad (14)
$$

Частные производные, входящие в матрицу Якоби выражения (12), определяются нижеприведенными формулами:

- при одинаковых индексах:

$$
\frac{\partial \Phi_{p\lambda}}{\partial \Psi_{u\lambda}} = Q_\lambda + b_{\lambda\lambda} U_\lambda^2, \quad \frac{\partial \Phi_{q\lambda}}{\partial \Psi_{u\lambda}} = -P_\lambda + g_{\lambda\lambda} U_\lambda^2,
$$
$$
\frac{\partial \Phi_{p\lambda}}{\partial U_\lambda} = -\frac{P_\lambda}{U_\lambda} - g_{\lambda\lambda} U_\lambda^2, \qquad \frac{\partial \Phi_{q\lambda}}{\partial U_\lambda} = -\frac{Q_\lambda}{U_\lambda} + b_{\lambda\lambda} U_\lambda^2; \qquad (15)
$$

- при разных индексах:

$$
\begin{aligned}
&\frac{\partial \Phi_{p\lambda}}{\partial \Psi_{u\mu}} = -\left[g_{\lambda\mu}\sin\left(\Psi_{u\lambda}-\Psi_{u\mu}\right)-b_{\lambda\mu}\cos\left(\Psi_{u\lambda}-\Psi_{u\mu}\right)\right]U_{\lambda}U_{\mu}\,,\\
&\frac{\partial \Phi_{q\lambda}}{\partial \Psi_{u\mu}} = -\left[g_{\lambda\mu}\cos\left(\Psi_{u\lambda}-\Psi_{u\mu}\right)-b_{\lambda\mu}\sin\left(\Psi_{u\lambda}-\Psi_{u\mu}\right)\right]U_{\lambda}U_{\mu}\,,\\
&\frac{\partial \Phi_{p\lambda}}{\partial U_{\mu}} = -\left[g_{\lambda\mu}\cos\left(\Psi_{u\lambda}-\Psi_{u\mu}\right)-b_{\lambda\mu}\sin\left(\Psi_{u\lambda}-\Psi_{u\mu}\right)\right]U_{\lambda}\,,\\
&\frac{\partial \Phi_{q\lambda}}{\partial U_{\mu}} = -\left[g_{\lambda\mu}\sin\left(\Psi_{u\lambda}-\Psi_{u\mu}\right)-b_{\lambda\mu}\cos\left(\Psi_{u\lambda}-\Psi_{u\mu}\right)\right]U_{\lambda}\,,
\end{aligned}
\tag{16}
$$

где

$$
\lambda = \left(m,\, k,\, i\right),\;\; \mu = \left(n,\, \ell,\, j\right). \tag{17}
$$

После обращения квадратной неособенной матрицы Якоби выражения (12) имеем

$$
\begin{bmatrix} \Delta\Psi_{um} \\ \Delta U_m \\ \Delta\Psi_{uk} \\ \Delta U_k \\ \Delta\Psi_{ui} \\ \Delta U_i \end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
\alpha_{mn} & \beta_{mn} & \alpha_{m\ell} & \beta_{m\ell} & \alpha_{mj} & \beta_{mj} \\
\delta_{mn} & \gamma_{mn} & \delta_{m\ell} & \gamma_{m\ell} & \delta_{mj} & \gamma_{mj} \\
\alpha_{kn} & \beta_{kn} & \alpha_{k\ell} & \beta_{k\ell} & \alpha_{kj} & \beta_{kj} \\
\delta_{kn} & \gamma_{kn} & \delta_{k\ell} & \gamma_{k\ell} & \delta_{kj} & \gamma_{kj} \\
\alpha_{in} & \beta_{in} & \alpha_{i\ell} & \beta_{i\ell} & \alpha_{ij} & \beta_{ij} \\
\delta_{in} & \gamma_{in} & \delta_{i\ell} & \gamma_{i\ell} & \delta_{ij} & \gamma_{ij}
\end{bmatrix}
\cdot
\begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta Q_m \\ \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix}. \tag{18}
$$

Здесь $\alpha, \beta, \delta, \gamma$ являются подматрицами обращенной матрицы.

Матричное уравнение (18) получено для случая, когда все независимые станционные узлы являются типа P-Q. Однако, согласно постановке задачи, станционные узлы с индексами $k(\ell)$ являются узлами типа P-U, в силу чего можем написать

$$
\left[\Delta U_k\right] = 0\,. \tag{19}
$$

В результате матричное выражение (18) принимает вид

$$
\begin{bmatrix} \Delta\Psi_{um} \\ \Delta U_m \\ \Delta\Psi_{uk} \\ 0 \\ \Delta\Psi_{ui} \\ \Delta U_i \end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
\alpha_{mn} & \beta_{mn} & \alpha_{m\ell} & \beta_{m\ell} & \alpha_{mj} & \beta_{mj} \\
\delta_{mn} & \gamma_{mn} & \delta_{m\ell} & \gamma_{m\ell} & \delta_{mj} & \gamma_{mj} \\
\alpha_{kn} & \beta_{kn} & \alpha_{k\ell} & \beta_{k\ell} & \alpha_{kj} & \beta_{kj} \\
\delta_{kn} & \gamma_{kn} & \delta_{k\ell} & \gamma_{k\ell} & \delta_{kj} & \gamma_{kj} \\
\alpha_{in} & \beta_{in} & \alpha_{i\ell} & \beta_{i\ell} & \alpha_{ij} & \beta_{ij} \\
\delta_{in} & \gamma_{in} & \delta_{i\ell} & \gamma_{i\ell} & \delta_{ij} & \gamma_{ij}
\end{bmatrix}
\cdot
\begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta Q_m \\ \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix}. \tag{20}
$$

Представим матричное уравнение (20) в виде совокупности следующих трех подматричных уравнений:

$$\begin{bmatrix} \Delta\Psi_{um} \\ \hdashline \Delta\Psi_{uk} \\ \hline \Delta\Psi_{ui} \\ \hdashline \Delta U_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{mn} & \beta_{mn} & \alpha_{m\ell} & \beta_{m\ell} & \alpha_{mj} & \beta_{mj} \\ \alpha_{kn} & \beta_{kn} & \alpha_{k\ell} & \beta_{k\ell} & \alpha_{kj} & \beta_{kj} \\ \alpha_{in} & \beta_{in} & \alpha_{i\ell} & \beta_{i\ell} & \alpha_{ij} & \beta_{ij} \\ \delta_{in} & \gamma_{in} & \delta_{i\ell} & \gamma_{i\ell} & \delta_{ij} & \gamma_{ij} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta Q_m \\ \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix}, \qquad (21)$$

$$\left[\Delta U_m\right] = \left[\delta_{mn} \;\vdots\; \gamma_{mn} \;\middle|\; \delta_{m\ell} \;\vdots\; \gamma_{m\ell} \;\middle|\; \delta_{mj} \;\vdots\; \gamma_{mj}\right] \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta Q_m \\ \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix}, \qquad (22)$$

$$\left[\ 0\ \right] = \left[\delta_{kn} \;\vdots\; \gamma_{kn} \;\middle|\; \delta_{k\ell} \;\vdots\; \gamma_{k\ell} \;\middle|\; \delta_{kj} \;\vdots\; \gamma_{kj}\right] \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta Q_m \\ \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix}. \qquad (23)$$

Матричное выражение (23) принимает вид

$$[0] = [\delta_{kn}] \cdot [\Delta P_m] + [\delta_{kn}] \cdot [\Delta Q_m] + [\delta_{k\ell}] \cdot [\Delta P_k] + [\gamma_{k\ell}] \cdot [\Delta Q_k] + [\delta_{kj}] \cdot [\Delta P_i] + [\gamma_{kj}] \cdot [\Delta Q_i]. \qquad (24)$$

Из (24) можно установить следующее:

$$[\Delta Q_k] = -[\gamma_{k\ell}] \cdot [\Delta k], \qquad (25)$$

где

$$[\Delta k] = -\{[\delta_{kn}] \cdot [\Delta P_m] + [\delta_{kn}] \cdot [\Delta Q_m] + [\delta_{k\ell}] \cdot [\Delta P_k] + [\delta_{kj}] \cdot [\Delta P_i] + [\gamma_{kj}] \cdot [\Delta Q_i]\}. \qquad (26)$$

Имея предварительные численные значения приращений ΔP_m, ΔQ_m, ΔP_k, ΔP_i и ΔQ_i, на основании (25) устанавливаем численные значения реактивных мощностей:

$$[\Delta Q_k] = [\Delta Q_{\Gamma_1+1}, \Delta Q_{\Gamma_1+2}, \ldots, \Delta Q_{\Gamma}]. \qquad (27)$$

Определим действительные значения реактивных мощностей для станционных узлов с индексом $k(\ell)$, пользуясь вторым выражением из (14):

$$Q_k = \Delta Q_k + \varphi_{qk}. \qquad (28)$$

Устанавливая численные значения реактивных мощностей станционных узлов типа P-U с индексом $k(\ell)$, проверяем условия их допустимости согласно требованию:

$$Q_{k,\min} \le Q_k \le Q_{k,\max}. \tag{29}$$

Затем устанавливаем численные значения модулей комплексных напряжений станционных узлов типа P-Q с индексами $m(n)$.

На основании вторых строчек выражений (11) и (18) можем написать

$$[U_m]^{И+1} = [U_m]^{И} - \boxed{\delta_{mn} \mid \gamma_{mn} \mid \delta_{m\ell} \mid \gamma_{m\ell} \mid \delta_{mj} \mid \gamma_{mj}} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \hline \Delta Q_m \\ \hline \Delta P_k \\ \hline \Delta Q_k \\ \hline \Delta P_i \\ \hline \Delta Q_i \end{bmatrix}. \tag{30}$$

Имея предварительные численные значения приращений ΔP_m, ΔQ_m, ΔP_k, ΔP_i и ΔQ_i, согласно (13) и (14), на основании (30) устанавливаем численные значения модулей напряжений станционных узлов типа P-Q, т.е. для узлов с индексами $m(n)$:

$$[U_m] = [U_1,\, U_2,\, \dots,\, U_{Г_1}]. \tag{31}$$

Устанавливая численные значения модулей комплексных напряжений станционных узлов типа P-Q, проверяем условие их допустимости, т.е. условие

$$U_{m,\min} \le U_m \le U_{m,\max}. \tag{32}$$

При проверке условий допустимости (29) и (32) могут быть случаи, когда:

1. Условия (29) и (32) полностью обеспечиваются, и на основании (21) устанавливаются численные значения $\Delta\Psi_{um}$, $\Delta\Psi_{uk}$, $\Delta\Psi_{ui}$ и ΔU_i. Затем, пользуясь нижеприведенным рекуррентным выражением, вычисляются действительные значения режимных параметров:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{um} \\ \hline \Psi_{uK} \\ \hline \Psi_{U\ell} \\ \hline U_i \end{bmatrix}^{И+1} = \begin{bmatrix} \Psi_{um} \\ \hline \Psi_{uK} \\ \hline \Psi_{U\ell} \\ \hline U_i \end{bmatrix}^{И} - \begin{bmatrix} \Delta\Psi_{um} \\ \hline \Delta\Psi_{uK} \\ \hline \Delta\Psi_{U\ell} \\ \hline \Delta U_i \end{bmatrix}. \tag{33}$$

В результате для станционных узлов типа P-Q определяем Ψ_{um}, U_m, а для станционных узлов типа P-U - Ψ_{uk}, Q_k. Разумеется, для нагрузочных узлов определяем аргументы и модули комплексных напряжений.

Этим завершается первая итерация. Вторая итерация осуществляется аналогичным образом. Если в последующих итерациях удовлетворяются условия (29) и (32), то итерационный процесс считается завершенным при обеспечении условий

$$\begin{aligned}&\left|P_m - \varphi_{pm}(U, \Psi)\right| \le \Delta P_m, \\ &\left|P_k - \varphi_{pk}(U, \Psi)\right| \le \Delta P_k, \\ &\left|P_i - \varphi_{pi}(U, \Psi)\right| \le \Delta P_i;\end{aligned} \tag{34}$$

$$\begin{aligned}&\left|Q_m - \varphi_{qm}(U, \Psi)\right| \le \Delta Q_m, \\ &\left|Q_k - \varphi_{qk}(U, \Psi)\right| \le \Delta Q_k, \\ &\left|Q_i - \varphi_{qi}(U, \Psi)\right| \le \Delta Q_i,\end{aligned} \tag{35}$$

где ΔP_m, ΔP_k, ΔP_i; ΔQ_m, ΔQ_k, ΔQ_i - заданные положительные величины, характеризующие точность установления значения искомых режимных параметров. Для ослабления условия сходимости принимается:

$$\begin{aligned}&\Delta P_m = \Delta P_k = \Delta P_i = \Delta P, \\ &\Delta Q_m = \Delta Q_k = \Delta Q_i = \Delta Q.\end{aligned} \tag{36}$$

2. Условие (29) не удовлетворяется, а условие (32) удовлетворяется. Это означает, что реактивные мощности станционных узлов типа P-U могут быть либо больше допустимых максимальных значений ($Q_{k,max}$), либо меньше допустимых минимальных значений ($Q_{k,min}$). При этом станционные узлы P-U заменяются на станционные узлы типа P-Q, причем в первом случае - на $P - Q_{m,max}$, а во втором - на $P - Q_{m,min}$. В результате все независимые станционные узлы становятся узлами типа P-Q, и итерационный процесс осуществляется на основании рекуррентного выражения (11), определяя неизвестные значения модулей и аргументов комплексных напряжений.

Этим завершается первая итерация, аналогичным образом осуществляется вторая.

Итерационный процесс считается завершенным, если обеспечиваются также условия сходимости (34) и (35).

3. Условие (29) удовлетворяется, а условие (32) - нет. Это означает, что условия ограничений типа неравенств, налагаемые на станционные узлы типа P-U, удовлетворяются, а условия ограничений типа неравенств, налагаемые на станционные узлы типа P-Q, не удовлетворяются.

При этом может быть, что для станционных узлов типа P-Q модули комплексных напряжений либо больше допустимых максимальных значений ($U_{m,max}$), либо меньше допустимых минимальных значений ($U_{m,min}$). Станционные узлы с индексами $m(n)$ типа P-Q можно заменить на станционные узлы типа P-U, причем в первом случае - на $P - U_{m,max}$, а во втором случае - на $P - U_{m,min}$.

В результате все независимые станционные узлы становятся узлами типа P-U. При этом можем написать

$$[\Delta U_m] = 0, \tag{37}$$

$$[U_k] = 0. \tag{38}$$

В силу этого матричное уравнение (18) принимает вид

$$\begin{bmatrix} \Delta\Psi_{um} \\ 0 \\ \hline \Delta\Psi_{uk} \\ 0 \\ \hline \Delta\Psi_{ui} \\ \Delta U_i \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cc|cc|cc} \alpha_{mn} & \beta_{mn} & \alpha_{m\ell} & \beta_{m\ell} & \alpha_{mj} & \beta_{mj} \\ \delta_{mn} & \gamma_{mn} & \delta_{m\ell} & \gamma_{m\ell} & \delta_{mj} & \gamma_{mj} \\ \hline \alpha_{kn} & \beta_{kn} & \alpha_{k\ell} & \beta_{k\ell} & \alpha_{kj} & \beta_{kj} \\ \delta_{kn} & \gamma_{kn} & \delta_{k\ell} & \gamma_{k\ell} & \delta_{kj} & \gamma_{kj} \\ \hline \alpha_{in} & \beta_{in} & \alpha_{i\ell} & \beta_{i\ell} & \alpha_{ij} & \beta_{ij} \\ \delta_{in} & \gamma_{in} & \delta_{i\ell} & \gamma_{i\ell} & \delta_{ij} & \gamma_{ij} \end{array}\right] \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta Q_m \\ \hline \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \hline \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix}. \tag{39}$$

Представим полученное матричное уравнение (39) в виде совокупности следующих двух подматричных уравнений, причем первое является (21), а второе будет

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{mn} & \gamma_{mn} \\ \delta_{kn} & \gamma_{kn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta P_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_{m\ell} & \gamma_{m\ell} \\ \delta_{k\ell} & \gamma_{k\ell} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta Q_m \\ \Delta Q_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_{mj} & \gamma_{mj} \\ \delta_{kj} & \gamma_{kj} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix}. \tag{40}$$

Из выражения (40) можно установить:

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_m \\ \Delta Q_k \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} \delta_{m\ell} & \gamma_{m\ell} \\ \delta_{k\ell} & \gamma_{k\ell} \end{bmatrix}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} \delta_{mn} & \gamma_{mn} \\ \delta_{kn} & \gamma_{kn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta P_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_{mj} & \gamma_{mj} \\ \delta_{kj} & \gamma_{kj} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} \right\}. \tag{41}$$

Имея предварительные численные значения приращений ΔP_m, ΔP_k; ΔP_i, ΔQ_i, на основании (13) и последнего выражения (14) матричное выражение (41) позволяет установить численные значения приращений ΔQ_m и ΔQ_k:

$$\Delta Q_m = \left(Q_1, Q_2, \ldots, Q_{\Gamma_1}\right), \tag{42}$$

$$\Delta Q_k = \left(Q_{\Gamma_1+1}, Q_{\Gamma_1+2}, \ldots, Q_{\Gamma}\right). \tag{43}$$

Затем определяем действительные значения реактивных мощностей тех же узлов, пользуясь первым и вторым выражениями (14):

$$Q_m = \Delta Q_m + \varphi_{qm}, \tag{44}$$

$$Q_k = \Delta Q_k + \varphi_{qk}. \tag{45}$$

Устанавливая численные значения реактивных мощностей независимых станционных узлов, проверяем условия их допустимости:

$$Q_{m,min} \le Q_m \le Q_{m,max}, \tag{46}$$

$$Q_{k,min} \le Q_k \le Q_{k,max}. \tag{47}$$

Если условия (46) и (47) обеспечиваются, то это означает, что ограничения типа неравенств, налагаемые на станционные узлы типа P-U, обеспечиваются, и можно установить другие неизвестные режимные параметры на основании рекуррентного выражения (33). Этим завершается первая итерация, после чего необходимо перейти к осуществлению второй итерации. Если во второй и последующих итерациях удовлетворяются условия (46) и (47), то необходимо завершить расчет допустимого установившегося режима. Решение задачи завершается при обеспечении условий сходимости (34), (35).

4. Условия (29) и (32) не обеспечиваются. Это означает, что ограничения типа неравенств, налагаемые как на станционные узлы типа P-Q, так и на станционные узлы типа P-U, не обеспечиваются.

При этом для станционных узлов типа P-Q модули комплексных напряжений могут получаться больше допустимых максимальных значений ($U_{m,max}$) или меньше допустимых минимальных значений ($U_{m,min}$). С другой стороны, для станционных узлов типа P-U реактивные мощности могут получаться больше допустимых ($Q_{k,max}$) или меньше допустимых ($Q_{k,min}$) значений.

В этом случае станционные узлы типа P-Q необходимо заменить на станционные узлы типа P-U, а станционные узлы типа P-U - на узлы типа P-Q.

В первом случае будем иметь $(P - U_{max})$ или $(P - U_{min})$, а во втором - $(P - Q_{max})$ или $(P - Q_{min})$.

Нетрудно заметить, что если поменять индексы $m(n)$ на $k(\ell)$ или обратно, то получим первый случай, т.е. станционные узлы с индексами $m(n)$ являются узлами типа P-U, а станционные узлы с индексами $k(\ell)$ - узлами типа P-Q.

Таким образом, задача расчета допустимого установившегося режима ЭЭС решается итерационным методом при замене станционных узлов типа P-Q на станционные узлы типа P-U, и наоборот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Хачатрян В.С., Этмекчян Э.А.** Развитие гибридного метода расчета установившегося режима электрической системы // Электричество.-1991.-N 1.- С. 6-13.
2. **Хачатрян В.С., Ибрахим А.И., Хачатрян К.В.** Метод определения допустимого установившегося режима электроэнергетической системы. // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-1998.-Т. 51, N 3.-С. 295-300.
3. **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, N 1.-С. 43-50.
4. **Хачатрян К.В., Нашат А.А., Мкртчян Г.С.** Расчет допустимого установившегося режима Z эквивалентированной электроэнергетической системы // Моделирование, оптимизация, управление: Сборник научных трудов.-2000.- Вып. 3.- С. 103-108.
5. **Хачатрян К.В., Бороян А.В.** Новый метод коррекции установившегося режима электроэнергетической системы // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2002.-Т. 55, N 2.-С. 222-230.
6. **Хачатрян К.В., Бороян А.В.** Коррекция установившегося режима электроэнергетической

системы при P-U и P-Q типе станционных узлов // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2003.-Т. 56, N 1.-С. 86-93.

7. **Хачатрян В.С., Бадалян Н.П., Гулян А.Г.** Выбор состава уравнений установившегося режима электроэнергетической системы при P-U и P-Q типе станционных узлов // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2003.- Т. 56, N 2.-С. 272-281.
8. **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, N 3.-С. 417-425.
9. **Мнацаканян М.А.** Расчет допустимого установившегося режима ЭЭС методом декомпозиции // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2004.-Т. 57, N 1.-С. 83-93.
10. **Григорян С.Э.** Новый метод расчета допустимого установившегося режима ЭЭС // Вестник МАНЕБ. - СПб, 2004.-N 3.-С. 69-73.
11. **Хачатрян К.В., Гладунчик Е.А., Мнацаканян М.А., Тохунц А.Р.** Минимизация потерь активной мощности в сетях электроэнергетической системы // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2004.-Т. 57, N 3.-С. 434-444.
12. **Хачатрян В.С., Мнацаканян М.А.** Определение допустимых относительных приростов потерь активной мощности ЭЭС методом декомпозиции // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.- 2005.-Т. 58, N 1.- С. 260-268.
13. **Хачатрян К.В.** Метод коррекции установившегося режима электроэнергетической системы // Электричество.-2005.-N 5.-С. 8-13.
14. **Бадалян Н.П.** Реализация математической модели установившегося режима электроэнергетической системы // Электричество.- 2005.-N 6.- С. 33-40.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 10.08.2005.

Վ.Ս. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Կ.Վ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Ս.Է. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Ա.Գ. ՂՈՒԼՅԱՆ

ԷԼԵԿՏՐԱԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԹՈՒՅԼԱՏՐԵԼԻ ԿԱՅՈՒՆԱՑՎԱԾ ՌԵԺԻՄԻ ՀԱՇՎՈՒՄԸ P-Q, P-U ՏԵՍՔԻ ԿԱՅԱՆԱՅԻՆ ՀԱՆԳՈՒՅՑՆԵՐԻ ԴԵՊՔՈՒՄ

Առաջարկվում է ԷԷՀ-ի թույլատրելի կայունացված ռեժիմի հաշվում էլեկտրական ցանցի Y տեսքի տրման դեպքում, երբ կայանային հանգույցները միաժամանակ P-Q և P-U տեսքերի են:

Առանցքային բառեր. համակարգ, մատրից, կայան, թույլատրելի կայունացված ռեժիմ, մոդել, հզորություն, մոդուլ, արգումենտ, հանգույց:

V.S. KHACHATRYAN, K.V. KHACHATRYAN, S.E. GRIGORYAN, A.G.GHULYAN

DESIGN OF PERMISSIBLE STEADY-STATE CONDITION OF ELECTRICAL POWER SYSTEM FOR P-Q, P-U TYPES OF STATION UNITS

The method for design of permissible steady-state electrical power system for P-Q, and P-U types of station units is proposed.

Keywords: system, matrix, station, optimization, permissible, steady-state condition, model, power, module, argument, unit.