ISSN 0002-306X. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2003. Т. LVI, №2.

УДК 621.311.1.001.24 ЭНЕРГЕТИКА

В.С. ХАЧАТРЯН, Н.П. БАДАЛЯН, А.Г. ГУЛЯН

ВЫБОР СОСТАВА УРАВНЕНИЙ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ P-U И P-Q ТИПАХ СТАНЦИОННЫХ УЗЛОВ

Предлагается метод расчета установившейся ЭЭС, когда станционные узлы могут быть одновременно типа P-U и P-Q. Рассматривается случай, когда пассивная часть системы задается в Y-Z форме. Полученные системы уравнений позволяют решить поставленную задачу при любой сложности ЭЭС.

Ключевые слова: модель, система, матрица, режим, узел, мощность, нагрузка, параметр.

В настоящее время при решении разнообразных практических задач [1, 2] весьма перспективными становятся гибридные модели установившегося режима электроэнергетической системы (ЭЭС).

Гибридные математические модели обеспечивают:

а) высокую эффективность для ЭЭС, в которой R>X;

б) решение задачи для существующих утяжеленных режимов;

в) сходимость решения соответствующей системы нелинейных алгебраических уравнений при выборе любых начальных значений зависимых режимных параметров;

г) решение поставленной задачи для ЭЭС, состоящей из ветвей с продольными конденсаторами.

В связи с этим большое значение приобретает вопрос обеспечения решения задачи расчета установившегося режима ЭЭС для случая, когда независимые станционные узлы одновременно могут быть как типа P-Q, так и типа P-U.

Настоящая работа посвящена решению данной задачи с точки зрения выбора состава нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима ЭЭС.

Для изложения материала принимается следующая система индексов: m(n)=0,1,2,…,Г', где Г '– число станционных узлов типа P-Q, узел с индексом “0” выбирается в качестве базисного, который является узлом типа $U - \Psi_U$;

k(ℓ)=Г'+1, Г'+2,…, Г'+Г'', где Г' – число станционных узлов типа P-U; Г= Г'+Г''– общее число независимых станционных узлов; i,(j) = Г+1, Г+2,…, Г+Н, где Н – число нагрузочных узлов.

На основании вышеприведенной системы индексов уравнение состояния ЭЭС можно представить в следующем виде [1]:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_m \\ \dot{I}_k \\ \dot{U}_{i0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{m,n} & Y_{m,\ell} & \dot{A}_{m,j} \\ Y_{k,n} & Y_{k,\ell} & \dot{A}_{k,j} \\ \dot{B}_{i,n} & \dot{B}_{i,\ell} & Z_{i,j} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{U}_{n0} \\ \dot{U}_{\ell 0} \\ \dot{I}_j \end{bmatrix}. \qquad (1)$$

Матричное уравнение (1) в алгебраической форме имеет вид

$$\dot{I}_m = \sum_{n=1}^{\Gamma'} Y_{m,n}\dot{U}_{n0} + \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} Y_{m,\ell}\dot{U}_{\ell 0} + \sum_{j=\Gamma+1}^{M} \dot{A}_{m,j}\dot{I}_j\,, \tag{2}$$

$$\dot{I}_k = \sum_{n=1}^{\Gamma'} Y_{k,n}\dot{U}_{n0} + \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} Y_{k,\ell}\dot{U}_{\ell 0} + \sum_{j=\Gamma+1}^{M} \dot{A}_{k,j}\dot{I}_j\,, \tag{3}$$

$$\dot{U}_{i0} = \sum_{n=1}^{\Gamma'} \dot{B}_{i,n}\dot{U}_{n0} + \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} \dot{B}_{i,\ell}\dot{U}_{\ell 0} + \sum_{j=\Gamma+1}^{M} Z_{i,j}\dot{I}_j\,, \tag{4}$$

или

$$\dot{I}_m = \dot{I}_{Бm} + \sum_{n=1}^{\Gamma'} Y_{m,n}\dot{U}_{n} + \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} Y_{m,\ell}\dot{U}_{\ell} + \sum_{j=\Gamma+1}^{M} \dot{A}_{m,j}\dot{I}_j\,, \tag{5}$$

$$\dot{I}_k = \dot{I}_{Бk} + \sum_{n=1}^{\Gamma'} Y_{k,n}\dot{U}_{n} + \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} Y_{k,\ell}\dot{U}_{\ell} + \sum_{j=\Gamma+1}^{M} \dot{A}_{k,j}\dot{I}_j\,, \tag{6}$$

$$\dot{U}_{i} = \dot{U}_{Бi} + \sum_{n=1}^{\Gamma'} \dot{B}_{i,n}\dot{U}_{n} + \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} \dot{B}_{i,\ell}\dot{U}_{\ell} + \sum_{j=\Gamma+1}^{M} Z_{i,j}\dot{I}_j\,, \tag{7}$$

где

$$\begin{aligned}
\dot{I}_{Бm} &= -\sum_{n=1}^{\Gamma'} Y_{m,n}\dot{U}_0 - \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} Y_{m,\ell}\dot{U}_0\,,\\
\dot{I}_{Бk} &= -\sum_{n=1}^{\Gamma'} Y_{k,n}\dot{U}_0 - \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} Y_{k,\ell}\dot{U}_0\,,\\
\dot{U}_{Бi} &= \left(1 - \sum_{n=1}^{\Gamma'} \dot{B}_{i,n} - \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} \dot{B}_{i,\ell}\right)\dot{U}_0\,.
\end{aligned} \tag{8}$$

Выражение (8) можно написать в следующей компактной форме:

$$\begin{aligned}
\dot{I}_{Бm} &= -\sum_{t=1}^{\Gamma} Y_{m,t} U_0\,,\\
\dot{I}_{Бk} &= -\sum_{t=1}^{\Gamma} Y_{k,t} U_0\,,\\
\dot{U}_{Бi} &= \left(1 - \sum_{t=1}^{\Gamma} \dot{B}_{i,t}\right) U_0\,.
\end{aligned} \tag{9}$$

Умножая уравнение (5) на $\hat{U}_m$, (6) – на $\hat{U}_k$ а (7) – на $\hat{I}_k$, для узловых активных и реактивных мощностей получим

$$\begin{aligned}
P_m = P_{Бm} &+ U_m \sum_{n=1}^{\Gamma'} \left[g_{m,n}\cos(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) + b_{m,n}\sin(\Psi_{Um} - \Psi_{Un})\right] U_n + \\
&+ U_m \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} \left[g_{m,\ell}\cos(\Psi_{Um} - \Psi_{U\ell}) + b_{m,\ell}\sin(\Psi_{Um} - \Psi_{U\ell})\right] U_\ell\,;
\end{aligned} \tag{10}$$

$$Q_m = Q_{Бm} + U_m \sum_{n=1}^{Г'} \left[g_{m,n} \sin\left(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}\right) - b_{m,n} \cos\left(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}\right) \right] U_n + \\ + U_m \sum_{\ell=Г'+1}^{Г} \left[g_{m,\ell} \sin\left(\Psi_{Um} - \Psi_{U\ell}\right) - b_{m,\ell} \cos\left(\Psi_{Um} - \Psi_{U\ell}\right) \right] U_\ell ; \tag{11}$$

$$P_k = P_{Бk} + U_k \sum_{n=1}^{Г'} \left[g_{k,n} \cos\left(\Psi_{Uk} - \Psi_{Un}\right) + b_{k,n} \sin\left(\Psi_{Uk} - \Psi_{Un}\right) \right] U_n + \\ + U_k \sum_{\ell=Г'+1}^{Г} \left[g_{k,\ell} \cos\left(\Psi_{Uk} - \Psi_{U\ell}\right) + b_{k,\ell} \sin\left(\Psi_{Uk} - \Psi_{U\ell}\right) \right] U_\ell ; \tag{12}$$

$$Q_k = Q_{Бk} + U_k \sum_{n=1}^{Г'} \left[g_{k,n} \sin\left(\Psi_{Uk} - \Psi_{Un}\right) - b_{k,n} \cos\left(\Psi_{Uk} - \Psi_{Un}\right) \right] U_n + \\ + U_k \sum_{\ell=Г'+1}^{Г} \left[g_{k,\ell} \sin\left(\Psi_{Uk} - \Psi_{U\ell}\right) - b_{k,\ell} \cos\left(\Psi_{Uk} - \Psi_{U\ell}\right) \right] U_\ell ; \tag{13}$$

$$P_i = P_{Бi} + \sum_{j=Г+1}^{M} \left[R_{i,j} \left(I'_i I'_j + I''_i I''_j \right) + R_{i,j} \left(I''_i I'_j - I'_i I''_j \right) \right]; \tag{14}$$

$$Q_i = Q_{Бi} + \sum_{j=Г+1}^{M} \left[X_{i,j} \left(I'_i I'_j + I''_i I''_j \right) - R_{i,j} \left(I''_i I'_j - I'_i I''_j \right) \right] . \tag{15}$$

Здесь

$$\begin{aligned} P_{Бm} &= p_{Бm} + \sum_{j=Г+1}^{M} \left(L_{mj} \cos \Psi_{Uj} + N_{mj} \sin \Psi_{Uj} \right) U_m , \\ Q_{Бm} &= q_{Бm} + \sum_{j=Г+1}^{M} \left(L_{mj} \sin \Psi_{Uj} - N_{mj} \cos \Psi_{Uj} \right) U_m , \\ P_{Бk} &= p_{Бk} + \sum_{j=Г+1}^{M} \left(L_{kj} \cos \Psi_{Uj} + N_{kj} \sin \Psi_{Uj} \right) U_k , \\ Q_{Бk} &= q_{Бk} + \sum_{j=Г+1}^{M} \left(L_{kj} \sin \Psi_{Uj} - N_{kj} \cos \Psi_{Uj} \right) U_k , \end{aligned} \tag{16}$$

где

$$
\begin{aligned}
&p_{Бm} = -\sum_{t=1}^{Г}\left(g_{m,t}\cos\Psi_{Um} + b_{m,t}\sin\Psi_{Um}\right)U_0 U_m\,,\\
&q_{Бm} = -\sum_{t=1}^{Г}\left(g_{m,t}\sin\Psi_{Um} - b_{m,t}\cos\Psi_{Um}\right)U_0 U_m\,,\\
&p_{Бk} = -\sum_{t=1}^{Г}\left(g_{k,t}\cos\Psi_{Uk} + b_{m,t}\sin\Psi_{Uk}\right)U_0 U_k\,,\\
&q_{Бk} = -\sum_{t=1}^{Г}\left(g_{k,t}\sin\Psi_{Uk} - b_{k,t}\cos\Psi_{Uk}\right)U_0 U_k\,.
\end{aligned}
\tag{17}
$$

С другой стороны, величины $P_{Бi}$, $Q_{Бi}$, входящие в выражения (14), (15) соответственно, определяются в виде

$$
\begin{aligned}
&P_{Бi} = p_{Бi} + \sum_{t=1}^{Г}\left(T'_{it}\cos\Psi_{Ut} + T''_{it}\sin\Psi_{Ut}\right)U_0\,,\\
&Q_{Бi} = q_{Бm} + \sum_{t=1}^{Г}\left(T'_{it}\sin\Psi_{Ut} - T''_{it}\cos\Psi_{Ut}\right)U_0\,.
\end{aligned}
\tag{18}
$$

Величины $p_{Бi}$ и $q_{Бi}$, входящие в (18), определяются в виде

$$
\begin{aligned}
&p_{Бi} = I'_i U_0 - \sum_{t=1}^{Г}\left(B'_{i,t}I'_i + B''_{i,t}I''_i\right)U_0\,,\\
&q_{Бi} = -I''_i U_0 + \sum_{t=1}^{Г}\left(B'_{i,t}I''_i + B''_{i,t}I'_i\right)U_0\,.
\end{aligned}
\tag{19}
$$

С другой стороны, L_{mj}, N_{mj}, L_{kj} и N_{kj}, фигурирующие в выражениях (16), определяются в виде

$$
\begin{aligned}
&L_{mj} = A'_{m,j}I'_j - A''_{m,j}I''_j\,,\\
&N_{mj} = A'_{m,j}I''_j - A''_{m,j}I'_j\,,
\end{aligned}
\tag{20}
$$

$$
\begin{aligned}
&L_{kj} = A'_{k,j}I'_j - A''_{k,j}I''_j\,,\\
&N_{kj} = A'_{k,j}I''_j - A''_{k,j}I'_j\,,
\end{aligned}
\tag{21}
$$

и

$$
\begin{aligned}
&T'_{it} = B'_{i,t}I'_i + B''_{i,t}I''_i\,,\\
&T''_{it} = B'_{i,t}I''_i + B''_{i,t}I'_i\,.
\end{aligned}
\tag{22}
$$

Представим (10)-(15) в следующем виде:

$$
\begin{cases}
\Phi_{pm} = P_m - \left[P_{Бm} + \varphi_{pm}\left(U_n, \Psi_{Un}; U_\ell, \Psi_{U\ell}\right)\right] = 0,\\
\Phi_{qm} = Q_m - \left[Q_{Бm} + \varphi_{qm}\left(U_n, \Psi_{Un}; U_\ell, \Psi_{U\ell}\right)\right] = 0;
\end{cases}
\tag{23}
$$

$$\begin{cases}\Phi_{pk} = P_k - \left[P_{Бk} + \varphi_{pk}\left(U_n, \Psi_{Un}; U_\ell, \Psi_{U\ell}\right)\right] = 0, \\ \Phi_{qk} = Q_k - \left[Q_{Бk} + \varphi_{qk}\left(U_n, \Psi_{Un}; U_\ell, \Psi_{U\ell}\right)\right] = 0;\end{cases} \qquad (24)$$

$$\begin{cases}\Phi_{pi} = P_i - \left[P_{Ái} + \varphi_{pi}\left(I'_j, I''_j\right)\right] = 0, \\ \Phi_{qi} = Q_i - \left[Q_{Ái} + \varphi_{qi}\left(I'_j, I''_j\right)\right] = 0.\end{cases} \qquad (25)$$

На основании (10)-(15) и (23)-(25) нетрудно установить выражения функций φ_{pm}, φ_{qm}, φ_{pk}, φ_{qk}, φ_{pi} и φ_{qi}, входящих в последние системы уравнений.

Для станционных узлов типа P-Q, которые обозначены индексом m(n), искомыми режимными параметрами являются модули (U_m, U_n) и аргументы (Ψ_{Um}, Ψ_{Un}) комплексных напряжений. Для станционных узлов типа P-U, которые обозначены индексом $k(\ell)$, искомыми режимными параметрами являются реактивные мощности (Q_k, Q_ℓ) и аргументы комплексных напряжений (Ψ_{Uk}, $\Psi_{U\ell}$). Для нагрузочных узлов с индексами i(j), поскольку заданы активные и реактивные мощности, искомыми режимными параметрами являются составляющие $\left(I'_i,\ I''_i\right)$ комплексных токов.

Анализ выражения реактивной мощности (13) показывает, что если известны модули и аргументы комплексных мощностей станционных узлов типа P-Q и аргументы комплексных напряжений станционных узлов типа P-U, то можно установить ее численное значение.

Окончательно можно определить численные значения реактивных мощностей станционных узлов типа P-U. В силу этого из системы уравнений (24) можно исключить уравнение реактивной мощности Φ_{qk} станционного узла типа P-U. В результате получается следующий состав уравнений для определения искомых режимных параметров установившегося режима ЭЭС:

$$\begin{aligned}&\Phi_{pm}\left(U_n,\ \Psi_{Un}; U_\ell,\ \Psi_{U\ell}\right) = 0, \\ &\Phi_{qm}\left(U_n,\ \Psi_{Un}; U_\ell,\ \Psi_{U\ell}\right) = 0, \\ &\Phi_{pk}\left(U_n,\ \Psi_{Un}; U_\ell,\ \Psi_{U\ell}\right) = 0,\end{aligned} \qquad (26)$$

$$\begin{aligned}&\Phi_{pi}\left(I'_j,\ I''_j\right) = 0, \\ &\Phi_{qi}\left(I'_j,\ I''_j\right) = 0.\end{aligned} \qquad (27)$$

Учитывая, что модуль напряжения U_ℓ задан как напряжение станционного узла типа P-U, системы уравнений (26) можно представить в виде

$$\begin{aligned}&\Phi_{pm}\left(U_n,\ \Psi_{Un}; \Psi_{U\ell}\right) = 0, \\ &\Phi_{qm}\left(U_n,\ \Psi_{Un}; \Psi_{U\ell}\right) = 0, \\ &\Phi_{pk}\left(U_n,\ \Psi_{Un}; \Psi_{U\ell}\right) = 0.\end{aligned} \qquad (28)$$

В системе искомыми режимными параметрами являются модули и аргументы комплексных напряжений станционных узлов типа P-Q и аргументы комплексных напряжений станционных узлов типа P-U

В системе уравнений (27) искомыми режимными параметрами являются составляющие комплексных типов нагрузочных узлов.

Как системы уравнений (28), так и системы уравнений (27) решаются методом первого порядка или Ньютона-Рафсона.

Рекуррентное выражение Ньютона-Рафсона применительно к системе уравнений (28) имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} U_n \\ --- \\ \Psi_{Un} \\ --- \\ \Psi_{U\ell} \end{bmatrix}^{И+1} = \begin{bmatrix} U_n \\ --- \\ \Psi_{Un} \\ --- \\ \Psi_{U\ell} \end{bmatrix}^{И} - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{Un}} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{U\ell}} \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{Un}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{U\ell}} \\ \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{Un}} & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{U\ell}} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{pm} \\ --- \\ \Phi_{qm} \\ --- \\ \Phi_{pk} \end{bmatrix}. \qquad (29)$$

Частные производные, входящие в матрицу Якоби, определяются нижеприведенными выражениями:

- при одинаковых индексах, т.е. когда n=m (ℓ =k):

$$\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_m} = -\left\{ \frac{\partial P_{Ám}}{\partial U_m} + \sum_{n=1}^{\Gamma'} \left[g_{m,n} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) + b_{m,n} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) \right] U_n + \right.$$
$$\left. + \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} \left[g_{m,\ell} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{U\ell}) + b_{m,\ell} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{U\ell}) \right] U_\ell \right\}; \qquad (30)$$

$$\frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_m} = -\left\{ \frac{\partial Q_{Бm}}{\partial U_m} + \sum_{n=1}^{\Gamma'} \left[g_{m,n} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) - b_{m,n} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) \right] U_n + \right.$$
$$\left. + \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} \left[g_{m,\ell} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{U\ell}) - b_{m,\ell} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{U\ell}) \right] U_\ell \right\}; \qquad (31)$$

$$\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{Um}} = -\left\{ \frac{\partial P_{Бm}}{\partial \Psi_{Um}} - U_m \sum_{n=1}^{\Gamma'} \left[g_{m,n} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) - b_{m,n} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) \right] U_n - \right.$$
$$\left. - U_m \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} \left[g_{m,\ell} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{U\ell}) - b_{m,\ell} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{U\ell}) \right] U_\ell \right\}; \qquad (32)$$

$$\frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{Um}} = -\left\{ \frac{\partial Q_{Бm}}{\partial \Psi_{Um}} + U_m \sum_{n=1}^{\Gamma'} \left[g_{m,n} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) + b_{m,n} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) \right] U_n + \right.$$
$$\left. + U_m \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} \left[g_{m,\ell} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{U\ell}) + b_{m,\ell} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{U\ell}) \right] U_\ell \right\}; \qquad (33)$$

$$\frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_k} = -\left\{ \frac{\partial P_{\text{Б}k}}{\partial U_k} + \sum_{n=1}^{\Gamma'} \left[g_{k,n} \cos\left(\Psi_{Uk} - \Psi_{Un}\right) + b_{k,n} \sin\left(\Psi_{Uk} - \Psi_{Un}\right)\right] U_n + \right.$$
$$\left. + \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} \left[g_{k,\ell} \cos\left(\Psi_{Uk} - \Psi_{U\ell}\right) + b_{k,\ell} \sin\left(\Psi_{Uk} - \Psi_{U\ell}\right)\right] U_\ell \right\}; \quad (34)$$

$$\frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial U_k} = -\left\{ \frac{\partial Q_{\text{Б}k}}{\partial U_k} + \sum_{n=1}^{\Gamma'} \left[g_{k,n} \sin\left(\Psi_{Uk} - \Psi_{Un}\right) - b_{k,n} \cos\left(\Psi_{Uk} - \Psi_{Un}\right)\right] U_n + \right.$$
$$\left. + \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} \left[g_{k,\ell} \sin\left(\Psi_{Uk} - \Psi_{U\ell}\right) - b_{k,\ell} \cos\left(\Psi_{Um} - \Psi_{U\ell}\right)\right] U_\ell \right\}; \quad (35)$$

- при разных индексах, т.е. когда n(m ($\ell \neq k$):

$$\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_n} = -\left\{ \frac{\partial P_{\text{Б}m}}{\partial U_n} + U_m \left[g_{m,n} \cos\left(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}\right) + b_{m,n} \sin\left(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}\right)\right]\right\}; \quad (36)$$

$$\frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_n} = -\left\{ \frac{\partial Q_{\text{Б}m}}{\partial U_n} + U_m \left[g_{m,n} \sin\left(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}\right) - b_{m,n} \cos\left(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}\right)\right]\right\}; \quad (37)$$

$$\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{Un}} = -\left\{ \frac{\partial P_{\text{Б}m}}{\partial \Psi_{Un}} - U_m \left[g_{m,n} \sin\left(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}\right) - b_{m,n} \cos\left(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}\right)\right] U_n \right\}; \quad (38)$$

$$\frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{Un}} = -\left\{ \frac{\partial Q_{\text{Б}m}}{\partial \Psi_{Un}} + U_m \left[g_{m,n} \cos\left(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}\right) + b_{m,n} \sin\left(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}\right)\right] U_n \right\}; \quad (39)$$

$$\frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_\ell} = -\left\{ \frac{\partial P_{\text{Б}k}}{\partial U_\ell} + U_k \left[g_{k,\ell} \cos\left(\Psi_{Uk} - \Psi_{U\ell}\right) + b_{k,\ell} \sin\left(\Psi_{Uk} - \Psi_{U\ell}\right)\right]\right\}; \quad (40)$$

$$\frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{U\ell}} = -\left\{ \frac{\partial P_{\text{Б}k}}{\partial \Psi_{U\ell}} - U_k \left[g_{k,\ell} \sin\left(\Psi_{Uk} - \Psi_{U\ell}\right) - b_{k,\ell} \cos\left(\Psi_{Uk} - \Psi_{U\ell}\right)\right] U_\ell \right\}. \quad (41)$$

С другой стороны,

$$\frac{\partial P_{\text{Б}m}}{\partial U_m} = -\sum_{t=1}^{\Gamma} \left(g_{m,t} \cos\Psi_{Um} + b_{m,t} \sin\Psi_{Um} \right) U_0 + \sum_{j=\tilde{A}+1}^{M} \left(L_{m,j} \cos\Psi_{Uj} + N_{m,j} \sin\Psi_{Uj} \right) U_m; \quad (42)$$

$$\frac{\partial Q_{\text{Б}m}}{\partial U_m} = -\sum_{t=1}^{\Gamma} \left(g_{m,t} \sin\Psi_{Um} - b_{m,t} \cos\Psi_{Um} \right) U_0 + \sum_{j=\Gamma+1}^{M} \left(L_{m,j} \sin\Psi_{Uj} - N_{m,j} \cos\Psi_{Uj} \right) U_m; \quad (43)$$

$$\frac{\partial P_{Бm}}{\partial \Psi_{Um}}=-\sum_{t=1}^{Г}\left(g_{m,t}\sin\Psi_{Um}-b_{m,t}\cos\Psi_{Um}\right)U_0U_m-\sum_{j=Г+1}^{M}\left(L_{m,j}\sin\Psi_{Uj}-N_{m,j}\cos\Psi_{Uj}\right)U_m;\quad(44)$$

$$\frac{\partial Q_{Бm}}{\partial \Psi_{Um}}=-\sum_{t=1}^{Г}\left(g_{m,t}\cos\Psi_{Um}+b_{m,t}\sin\Psi_{Um}\right)U_0U_m-\sum_{j=Г+1}^{M}\left(L_{m,j}\cos\Psi_{Uj}-N_{m,j}\sin\Psi_{Uj}\right)U_m;\quad(45)$$

$$\frac{\partial P_{Бk}}{\partial U_k}=-\sum_{t=1}^{Г}\left(g_{k,t}\cos\Psi_{Uk}+b_{k,t}\sin\Psi_{Uk}\right)U_0+\sum_{j=Г+1}^{M}\left(L_{k,j}\cos\Psi_{Uj}+N_{k,j}\sin\Psi_{Uj}\right);\quad(46)$$

$$\frac{\partial P_{Бk}}{\partial \Psi_{Uk}}=\sum_{t=1}^{Г}\left(g_{k,t}\sin\Psi_{Uk}-b_{k,t}\cos\Psi_{Uk}\right)U_0U_m-\sum_{j=Г+1}^{M}\left(L_{k,j}\sin\Psi_{Uj}-N_{k,j}\cos\Psi_{Uj}\right)U_k.\quad(47)$$

Затем определяем

$$\frac{\partial P_{Бm}}{\partial U_n}=0;\ \frac{\partial Q_{Бm}}{\partial U_n}=0;\ \frac{\partial P_{Бm}}{\partial \Psi_{Un}}=0;\ \frac{\partial Q_{Бm}}{\partial \Psi_{Un}}=0;\ \frac{\partial P_{Бk}}{\partial U_\ell}=0;\ \frac{\partial Q_{Бk}}{\partial \Psi_{U\ell}}=0.\quad(48)$$

В результате выражения частных производных при различных индексах принимают более упрощенный вид:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_n}&=-U_m\left[g_{m,n}\cos(\Psi_{Um}-\Psi_{Un})+b_{m,n}\sin(\Psi_{Um}-\Psi_{Un})\right],\\
\frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_n}&=-U_m\left[g_{m,n}\sin(\Psi_{Um}-\Psi_{Un})-b_{m,n}\cos(\Psi_{Um}-\Psi_{Un})\right],\\
\frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{Un}}&=U_m\left[g_{m,n}\sin(\Psi_{Um}-\Psi_{Un})-b_{m,n}\cos(\Psi_{Um}-\Psi_{Un})\right],
\end{aligned}\quad(49)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{Un}}&=-U_m\left[g_{m,n}\cos(\Psi_{Um}-\Psi_{Un})+b_{m,n}\sin(\Psi_{Um}-\Psi_{Un})\right]U_n,\\
\frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_\ell}&=-U_k\left[g_{k,\ell}\cos(\Psi_{Uk}-\Psi_{U\ell})+b_{k,\ell}\sin(\Psi_{Uk}-\Psi_{U\ell})\right],\\
\frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{U\ell}}&=U_k\left[g_{k,\ell}\sin(\Psi_{Uk}-\Psi_{U\ell})+b_{k,\ell}\cos(\Psi_{Uk}-\Psi_{U\ell})\right].
\end{aligned}\quad(50)$$

Рекуррентное выражение Ньютона-Рафсона применительно к системе уравнений (27) имеет такой же вид, что и (23) в [2]. Однако выражение частных производных, входящих в матрицу Якоби настоящей статьи, совершенно отличается от (36) и (39), приведенных в [2]:

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

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial I'_i} &= -\left[\frac{\partial P_{Бi}}{\partial I'_i} + \sum_{j=Г+1}^{M}\left(R_{i,j} I'_j - X_{i,j} I''_j\right)\right], \\
\frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial I''_i} &= -\left[\frac{\partial P_{Бi}}{\partial I''_i} + \sum_{j=Г+1}^{M}\left(R_{i,j} I''_j + X_{i,j} I'_j\right)\right], \\
\frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial I'_i} &= -\left[\frac{\partial Q_{Бi}}{\partial I'_i} + \sum_{j=Г+1}^{M}\left(X_{i,j} I'_j + R_{i,j} I''_j\right)\right], \\
\frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial I''_i} &= -\left[\frac{\partial Q_{Бi}}{\partial I''_i} + \sum_{j=Г+1}^{M}\left(X_{i,j} I''_j - R_{i,j} I''_j\right)\right];
\end{aligned} \tag{51}$$

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

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial I'_j} &= -\left(R_{i,j} I'_i + X_{i,j} I''_i\right), \qquad & \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial I''_j} &= -\left(R_{i,j} I''_i - X_{i,j} I'_i\right), \\
\frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial I'_j} &= -\left(X_{i,j} I'_i - R_{i,j} I''_i\right), \qquad & \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial I''_j} &= -\left(X_{i,j} I''_i + R_{i,j} I'_i\right).
\end{aligned} \tag{52}$$

Частные производные $\partial P_{Бi}/\partial I'_i$, $\partial P_{Бi}/\partial I''_i$, $\partial Q_{Бi}/\partial I'_i$ и $\partial Q_{Бi}/\partial I''_i$ определяются нижеприведенными выражениями:

$$\frac{\partial P_Б}{\partial I'_i} = \left(1 - \sum_{t=1}^{Г} B'_{i,t}\right) U_0 + \sum_{t=1}^{Г}\left(B'_{i,t} \cos \Psi_{Ut} - B''_{i,t} \sin \Psi_{Ut}\right) U_0,$$

$$\frac{\partial P_{Бi}}{\partial I''_i} = -\sum_{t=1}^{Г} B''_{i,t} U_0 + \sum_{t=1}^{Г}\left(B''_{i,t} \cos \Psi_{Ut} + B'_{i,t} \sin \Psi_{Ut}\right) U_0,$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial Q_{Бi}}{\partial I'_i} &= -\sum_{t=1}^{Г} B''_{i,t} U_0 + \sum_{t=1}^{Г}\left(B'_{i,t} \sin \Psi_{Ut} + B''_{i,t} \cos \Psi_{Ut}\right) U_0, \\
\frac{\partial Q_{Бi}}{\partial I''_i} &= \left(1 - \sum_{t=1}^{Г} B'_{i,t}\right) U_0 + \sum_{t=1}^{Г}\left(B''_{i,t} \sin \Psi_{Ut} - B'_{i,t} \cos \Psi_{Ut}\right) U_0.
\end{aligned} \tag{53}$$

Имея аналитические выражения частных производных, входящих в матрицу Якоби, а также других величин и устанавливая их численные значения, можно перейти к организации итерационного процесса для расчета установившегося режима конкретных ЭЭС.

Основная суть вычислительного алгоритма заключается в том, что при итерационном решении численных задач соответствующим образом осуществляется обмен информацией между подсистемами Y(Z) и Z(Y). Итерационный процесс считается завершенным, если искомые режимные параметры принимают численные значения требуемой или необходимой точности.

В качестве критерия сходимости решения систем нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима выбираются величины небалансов активных и реактивных мощностей соответствующих узлов:

$$\begin{aligned} &\left|P_{\lambda} - \left(P_{Б\lambda}\varphi_{p\lambda}\right)\right| \le \Delta P_{\lambda}\,, \\ &\left|Q_{\lambda} - \left(Q_{Б\lambda}\varphi_{p\lambda}\right)\right| \le \Delta Q_{\lambda}\,, \end{aligned} \qquad (54)$$

где λm, k, i, ΔP_{λ} и ΔQ_{λ} характеризуют точность получения численных значений искомых режимных параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Хачатрян В. С., Этмекчян Э. А.** Развитие гибридного метода расчета установившегося режима электрической системы // Электричество.-1991.-№1.- С. 6-13.
2. **Хачатрян В. С., Бадалян Н. П., Хачатрян К. В., Гулян А.Г.** Решение систем гибридных уравнений установившегося режима ЭЭС при смешанном типе станционных узлов //Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2001.-Т 54, №2.- С.210-217.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 9.08.2002.

Վ.Ս. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Ն.Պ. ԲԱԴԱԼՅԱՆ, Ա.Գ. ՂՈՒԼՅԱՆ

ԷԼԵԿՏՐԱԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԿԱՅՈՒՆԱՑՎԱԾ ՌԵԺԻՄԻ ՀԱՎԱՍԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ԿԱԶՄԻ ԸՆՏՐՈՒԹՅՈՒՆԸ P-U ԵՎ P-Q ԿԱՅԱՆԱՅԻՆ ՀԱՆԳՈՒՅՑՆԵՐԻ ԴԵՊՔՈՒՄ

Առաջարկվում է ԷԷՀ-ի կայունացված ռեժիմի հաշվարկի նոր մեթոդ խառը տիպի կայանային հանգույցների համար, երբ վերջիններս միաժամանակ P-U և P-Q տիպի են: Դիտարկվում է այն դեպքը, երբ համակարգի պասիվ մասը տրվում է Y-Z տեսքով: Ստացված հավասարումների համակարգը հնարավորություն է տալիս խնդիրը լուծել ԷԷՀ-ի ցանկացած բարդության դեպքում:

V.S. KHACHATRYAN, N.P. BADALYAN, A.G. GHULYAN

EQUATION COMPOSITION SELECTION OF ELECTRIC POWER STATION STEADY-STATE MODE FOR P-U, P-Q TYPES OF STATIONAL UNITS

A calculation method of electric power station (EPS) steady-state mode when stational units can be simultaneously of the P-U and P-Q types is proposed. A case is considered when the system's passive part is given in the Y-Z form. The equation systems obtained permit to solve the given problem at any complexity of EPS.