

Z-Y-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОРРЕКЦИИ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Канд. техн. наук ХАЧАТРЯН К. В.

Государственный инженерный университет Армении

Проблема оперативной коррекции режима электроэнергетической системы (ЭЭС) весьма важна при исследовании режимных вопросов в ЭЭС [1–6]. В отличие от существующих работ, в которых при построении математической модели для коррекции установившегося режима используется Y-Z-форма состояния сети, в настоящей работе впервые применяется гибридная Z-Y-форма задания состояния сети.

Исходной для построения математической модели коррекции установившегося режима является Z-форма уравнений состояния сети, которая представляется известным выражением

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

где $\dot{\mathbf{U}}$ – многомерный вектор комплексных напряжений независимых узлов или столбцовая матрица узловых комплексных напряжений; $\dot{\mathbf{I}}$ – многомерный вектор комплексных токов независимых узлов или столбцовая матрица узловых комплексных токов; $\dot{\mathbf{Z}}$ – неособенная квадратная матрица комплексных сопротивлений независимых узлов или обращенная форма Y-матрицы узловых комплексных проводимостей; $\dot{\mathbf{U}}_B$ – напряжение базисного стационарного узла.

Для дальнейшего изложения материала принимается следующая система индексов:

- для стационарных узлов: $m(n) = 0, 1, 2, \dots, \Gamma$, где Γ – число независимых стационарных узлов, стационарный узел с индексом «0» выбирается в качестве базисного (балансирующего); $k(l) = \Gamma + 1, \Gamma + 2, \dots, \Gamma + N$ – для нагрузочных узлов, где N – число нагрузочных узлов; $\dot{\mathbf{U}}_0 = \dot{\mathbf{U}}_B$. Следует отметить адекватность индексов m и n , k и n .

С учетом выбранной системы индексов матричное уравнение (1) представится в виде

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_m \\ \dot{\mathbf{U}}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_B \\ \dot{\mathbf{U}}_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{Z}}_{mn} & \dot{\mathbf{Z}}_{mk} \\ \dot{\mathbf{Z}}_{ln} & \dot{\mathbf{Z}}_{lk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_n \\ \dot{\mathbf{I}}_k \end{bmatrix}. \quad (2)$$

После некоторых преобразований (2) можно представить следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_m \\ \dot{\mathbf{I}}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 - \dot{\mathbf{Z}}_{mk}\dot{\mathbf{Z}}_{kl}^{-1})\dot{\mathbf{U}}_B \\ -\dot{\mathbf{Z}}_{kl}^{-1}\dot{\mathbf{U}}_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{Z}}_{mn} - \dot{\mathbf{Z}}_{mk}\dot{\mathbf{Z}}_{kl}^{-1}\dot{\mathbf{Z}}_{ln} & \dot{\mathbf{Z}}_{mk}\dot{\mathbf{Z}}_{kl}^{-1} \\ \dot{\mathbf{Z}}_{kl}^{-1}\dot{\mathbf{Z}}_{ln} & \dot{\mathbf{Z}}_{kl}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_n \\ \dot{\mathbf{U}}_l \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Если ввести следующие обозначения:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{U}}_{\text{Б}m} &= (1 - \dot{\mathbf{Z}}_{mk} \dot{\mathbf{Z}}_{kl}^{-1}) \dot{\mathbf{U}}_{\text{Б}} = (1 - \dot{\mathbf{Z}}_{mk} \dot{\mathbf{Y}}_{k,l}) \dot{\mathbf{U}}_{\text{Б}}; \\ \dot{\mathbf{I}}_{\text{Б}k} &= -\dot{\mathbf{Z}}_{kl}^{-1} \dot{\mathbf{U}}_{\text{Б}} = -\dot{\mathbf{Y}}_{k,l} \dot{\mathbf{U}}_{\text{Б}}; \\ \dot{\mathbf{Z}}_{m,n} &= \dot{\mathbf{Z}}_{mn} - \dot{\mathbf{Z}}_{mk} \dot{\mathbf{Z}}_{kl}^{-1} \dot{\mathbf{Z}}_{ln} = \dot{\mathbf{Z}}_{mn} - \dot{\mathbf{Z}}_{mk} \dot{\mathbf{Y}}_{k,l} \dot{\mathbf{Z}}_{ln}; \\ \dot{\mathbf{C}}_{m,l} &= \dot{\mathbf{Z}}_{mk} \dot{\mathbf{Z}}_{kl}^{-1} = \dot{\mathbf{Z}}_{mk} \dot{\mathbf{Y}}_{k,l}; \\ \dot{\mathbf{D}}_{k,n} &= -\dot{\mathbf{Z}}_{kl}^{-1} \dot{\mathbf{Z}}_{ln} = -\dot{\mathbf{Y}}_{k,l} \dot{\mathbf{Z}}_{ln}; \\ \dot{\mathbf{Z}}_{kl}^{-1} &= \dot{\mathbf{Z}}_{k,l}^{-1} = \dot{\mathbf{Y}}_{k,l},\end{aligned}$$

то матричное уравнение (3) примет вид:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_m \\ \dot{\mathbf{I}}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_{\text{Б}m} \\ \dot{\mathbf{I}}_{\text{Б}k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{Z}}_{m,n} & \dot{\mathbf{C}}_{m,l} \\ \dot{\mathbf{D}}_{k,n} & \dot{\mathbf{Y}}_{k,l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_n \\ \dot{\mathbf{U}}_l \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где квадратная матрица комплексных величин является гибридной или смешанной, поскольку формируется на основании $\mathbf{Y}$ - и $\mathbf{Z}$ -матриц.

Блочнo-матричное уравнение (4) представим в виде совокупности двух матричных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{U}}_m = \dot{\mathbf{U}}_{\text{Б}m} + \dot{\mathbf{Z}}_{m,n} \dot{\mathbf{I}}_n + \dot{\mathbf{C}}_{m,l} \dot{\mathbf{U}}_l; \\ \dot{\mathbf{I}}_k = \dot{\mathbf{I}}_{\text{Б}k} + \dot{\mathbf{D}}_{k,n} \dot{\mathbf{I}}_n + \dot{\mathbf{Y}}_{k,l} \dot{\mathbf{U}}_l. \end{cases} \quad (5)$$

В развернутом виде систему (5) можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{U}}_m = \dot{\mathbf{U}}_{\text{Б}m} + \sum_{n=1}^{\Gamma} \dot{\mathbf{Z}}_{m,n} \dot{\mathbf{I}}_n + \sum_{l=\Gamma+1}^{\Gamma+H} \dot{\mathbf{C}}_{m,l} \dot{\mathbf{U}}_l; \\ \dot{\mathbf{I}}_k = \dot{\mathbf{I}}_{\text{Б}k} + \sum_{n=1}^{\Gamma} \dot{\mathbf{D}}_{k,n} \dot{\mathbf{I}}_n + \sum_{l=\Gamma+1}^{\Gamma+H} \dot{\mathbf{Y}}_{k,l} \dot{\mathbf{U}}_l. \end{cases} \quad (6)$$

Представим систему (6) в виде двух подсистем:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{U}}_{m\text{Б}} = \dot{\mathbf{U}}_{\text{Б}m} + \sum_{l=\Gamma+1}^{\Gamma+H} \dot{\mathbf{Z}}_{m,n} \dot{\mathbf{I}}_n; \\ \dot{\mathbf{I}}_k = \dot{\mathbf{I}}_{\text{Б}k} + \sum_{l=\Gamma+1}^{\Gamma+H} \dot{\mathbf{Y}}_{k,l} \dot{\mathbf{U}}_l, \end{cases} \quad (7)$$

где

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{U}}_{m\text{Б}} = \dot{\mathbf{U}}_{\text{Б}m} + \sum_{l=\Gamma+1}^{\Gamma+H} \dot{\mathbf{C}}_{m,l} \dot{\mathbf{U}}_l; \\ \dot{\mathbf{I}}_{k\text{Б}} = \dot{\mathbf{I}}_{\text{Б}k} + \sum_{n=1}^{\Gamma} \dot{\mathbf{D}}_{k,n} \dot{\mathbf{I}}_n. \end{cases}$$

Если умножить первое уравнение из системы (7) на комплексно-сопряженный ток I_m^* , а второе – на комплексно-сопряженное напряжение U_k^* , то получим выражения узловых активных и реактивных мощностей:

$$P_m = P_{mБ} + \sum_{n=1}^{\Gamma} [R_{m,n}(I'_m I'_n + I''_m I''_n) + X_{m,n}(I''_m I'_n - I'_m I''_n)]; \quad (8)$$

$$Q_m = Q_{mБ} + \sum_{n=1}^{\Gamma} [R_{m,n}(I''_m I'_n - I'_m I''_n) - X_{m,n}(I''_m I'_n + I'_m I''_n)]; \quad (9)$$

$$P_k = P_{kБ} + \sum_{l=\Gamma+1}^{\Gamma+H} [g_{k,l}(U'_k U'_l + U''_k U''_l) + b_{k,l}(U''_k U'_l - U'_k U''_l)]; \quad (10)$$

$$Q_k = Q_{kБ} + \sum_{l=\Gamma+1}^{\Gamma+H} [g_{k,l}(U''_k U'_l - U'_k U''_l) - b_{k,l}(U'_k U'_l + U''_k U''_l)]. \quad (11)$$

Переменные $P_{mБ}$, $Q_{mБ}$, $P_{kБ}$ и $Q_{kБ}$, входящие в уравнения (8)–(11), приводятся в [8] для радиально связанных подсистем.

Представим систему нелинейных алгебраических уравнений (8)–(11) в виде:

$$\begin{cases} F_{pm}(I'_m, I''_m) = P_m - [P_{Бm} + f_{pm}(I'_m, I''_m)] = 0; \\ F_{qm}(I'_m, I''_m) = Q_m - [Q_{Бm} + f_{qm}(I'_m, I''_m)] = 0; \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} F_{pk}(U'_k, U''_k) = P_k - [P_{Бk} + f_{pk}(U'_k, U''_k)] = 0; \\ F_{qk}(U'_k, U''_k) = Q_k - [Q_{Бk} + f_{qk}(U'_k, U''_k)] = 0, \end{cases} \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} f_{pm} &= \sum_{n=1}^{\Gamma} [R_{m,n}(I'_m I'_n + I''_m I''_n) + X_{m,n}(I''_m I'_n - I'_m I''_n)]; \\ f_{qm} &= \sum_{n=1}^{\Gamma} [R_{m,n}(I''_m I'_n - I'_m I''_n) - X_{m,n}(I''_m I'_n + I'_m I''_n)]; \\ f_{pk} &= \sum_{l=\Gamma+1}^{\Gamma+H} [g_{k,l}(U'_k U'_l + U''_k U''_l) + b_{k,l}(U''_k U'_l - U'_k U''_l)]; \\ f_{qk} &= \sum_{l=\Gamma+1}^{\Gamma+H} [g_{k,l}(U''_k U'_l - U'_k U''_l) - b_{k,l}(U'_k U'_l + U''_k U''_l)]. \end{aligned}$$

Системы нелинейных алгебраических уравнений (12) и (13) представим в следующем компактном виде:

$$\begin{cases} F_{pm}(I'_m, I''_m) = 0; \\ F_{qm}(I'_m, I''_m) = 0; \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} F_{pk}(U'_k, U''_k) = 0; \\ F_{qk}(U'_k, U''_k) = 0. \end{cases} \quad (15)$$

Можно заметить, что систему нелинейных алгебраических уравнений (14) необходимо решить относительно составляющих комплексных токов независимых стационарных узлов, и тогда соответствующее рекуррентное выражение, вытекающее из метода Ньютона – Рафсона, имеет вид

$$\begin{bmatrix} I'_m \\ I''_m \end{bmatrix}^{И+1} = \begin{bmatrix} I'_m \\ I''_m \end{bmatrix}^{И} + \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{pm}}{\partial I'_n} & \frac{\partial F_{pm}}{\partial I''_n} \\ \frac{\partial F_{qm}}{\partial I'_n} & \frac{\partial F_{qm}}{\partial I''_n} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F_{pm} \\ F_{qm} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

где И – номер итерации.

Систему нелинейных алгебраических уравнений (15) необходимо решить относительно составляющих комплексных напряжений нагрузочных узлов, при которых соответствующее рекуррентное выражение, вытекающее из метода Ньютона – Рафсона, будет записано следующим образом:

$$\begin{bmatrix} U'_k \\ U''_k \end{bmatrix}^{И+1} = \begin{bmatrix} U'_k \\ U''_k \end{bmatrix}^{И} + \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{pk}}{\partial U'_l} & \frac{\partial F_{pk}}{\partial U''_l} \\ \frac{\partial F_{qk}}{\partial U'_l} & \frac{\partial F_{qk}}{\partial U''_l} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F_{pk} \\ F_{qk} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Частные производные, входящие в рекуррентные выражения (16) и (17), приведены в [8].

Для построения математической модели коррекции установившегося режима пользуемся понятиями вектора состояния, управления и возмущения, которые соответственно обозначаются буквами X , U , W .

Обозначим:

$$[X] = \left[\begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} P_0 \\ Q_0 \end{array} \right\} \text{ -- для базисного (балансирующего) стационарного узла типа } U - \Psi_u; \\ \left. \begin{array}{l} I' \\ I'' \end{array} \right\} \text{ -- для стационарных узлов типа } P - Q; \\ \left. \begin{array}{l} U' \\ U'' \end{array} \right\} \text{ -- для нагрузочных узлов типа } P - Q; \end{array} \right]$$

$$[U] = \left[\begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} U_0 \\ \Psi_{u_0} \end{array} \right\} \text{ -- для базисного (балансирующего) стационарного узла типа } U - \Psi_u; \\ \left. \begin{array}{l} P \\ Q \end{array} \right\} \text{ -- для стационарных узлов типа } P - Q; \end{array} \right]$$

$$[\mathbf{W}] = \begin{Bmatrix} P \\ Q \end{Bmatrix} \left. \vphantom{\begin{Bmatrix} P \\ Q \end{Bmatrix}} \right\} \text{ -- для нагрузочных узлов типа } P-Q.$$

При этом системы нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима (12) и (13) можно представить в виде:

$$\mathbf{F}_{z(y)}(\mathbf{X}, \mathbf{U}, \mathbf{W}) = 0; \quad (18)$$

$$\mathbf{F}_{y(z)}(\mathbf{X}, \mathbf{U}, \mathbf{W}) = 0. \quad (19)$$

Когда вектор состояния $\mathbf{X}$ получает приращения, соответствующие приращения получают также вектор управления $\mathbf{U}$ и вектор возмущения $\mathbf{W}$, при котором векторные уравнения (18) и (19) принимают вид:

$$\mathbf{F}_{z(y)}(\mathbf{X}^P + \Delta\mathbf{X}; \mathbf{U}^0 + \Delta\mathbf{U}; \mathbf{W}^0 + \Delta\mathbf{W}) = 0; \quad (20)$$

$$\mathbf{F}_{y(z)}(\mathbf{X}^P + \Delta\mathbf{X}; \mathbf{U}^0 + \Delta\mathbf{U}; \mathbf{W}^0 + \Delta\mathbf{W}) = 0, \quad (21)$$

где $\mathbf{X}^P$ -- вектор состояния в точке решения; $\mathbf{U}^0, \mathbf{W}^0$ -- заданные векторы управления и возмущения.

Если разложить функции (20) и (21) в ряд Тейлора и пренебречь членами, имеющими частные производные выше первого порядка, получим:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{z(y)}(\mathbf{X}^P + \Delta\mathbf{X}; \mathbf{U}^0 + \Delta\mathbf{U}; \mathbf{W}^0 + \Delta\mathbf{W}) &= \mathbf{F}_{z(y)}(\mathbf{X}^P, \mathbf{U}^0, \mathbf{W}^0) + \frac{\partial \mathbf{F}_{z(y)}}{\partial \mathbf{X}} \Delta\mathbf{X} + \\ &+ \frac{\partial \mathbf{F}_{z(y)}}{\partial \mathbf{U}} \Delta\mathbf{U} + \frac{\partial \mathbf{F}_{z(y)}}{\partial \mathbf{W}} \Delta\mathbf{W}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{y(z)}(\mathbf{X}^P + \Delta\mathbf{X}; \mathbf{U}^0 + \Delta\mathbf{U}; \mathbf{W}^0 + \Delta\mathbf{W}) &= \mathbf{F}_{y(z)}(\mathbf{X}^P, \mathbf{U}^0, \mathbf{W}^0) + \frac{\partial \mathbf{F}_{y(z)}}{\partial \mathbf{X}} \Delta\mathbf{X} + \\ &+ \frac{\partial \mathbf{F}_{y(z)}}{\partial \mathbf{U}} \Delta\mathbf{U} + \frac{\partial \mathbf{F}_{y(z)}}{\partial \mathbf{W}} \Delta\mathbf{W}, \end{aligned}$$

или в компактном виде:

$$\frac{\partial \mathbf{F}_{z(y)}}{\partial \mathbf{X}} \Delta\mathbf{X} + \frac{\partial \mathbf{F}_{z(y)}}{\partial \mathbf{U}} \Delta\mathbf{U} + \frac{\partial \mathbf{F}_{z(y)}}{\partial \mathbf{W}} \Delta\mathbf{W} = 0; \quad (22)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_{y(z)}}{\partial \mathbf{X}} \Delta\mathbf{X} + \frac{\partial \mathbf{F}_{y(z)}}{\partial \mathbf{U}} \Delta\mathbf{U} + \frac{\partial \mathbf{F}_{y(z)}}{\partial \mathbf{W}} \Delta\mathbf{W} = 0. \quad (23)$$

Частные производные $\partial \mathbf{F}_{z(y)} / \partial \mathbf{X}$ и $\partial \mathbf{F}_{y(z)} / \partial \mathbf{X}$ изображают матрицы Якоби при решении систем нелинейных векторных уравнений методом Ньютона -- Рафсона, которые являются квадратными и неособенными, т. е. их можно обращать.

Умножая матричные выражения (22) и (23) соответственно на $(\partial \mathbf{F}_{z(y)}/\partial \mathbf{X})^{-1}$ и $(\partial \mathbf{F}_{y(z)}/\partial \mathbf{X})^{-1}$, получим:

$$\Delta \mathbf{X}_{z(y)} = - \left(\frac{\partial \mathbf{F}_{z(y)}}{\partial \mathbf{X}} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{F}_{z(y)}}{\partial \mathbf{U}} \Delta \mathbf{U} - \left(\frac{\partial \mathbf{F}_{z(y)}}{\partial \mathbf{X}} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{F}_{z(y)}}{\partial \mathbf{W}} \Delta \mathbf{W}; \quad (24)$$

$$\Delta \mathbf{X}_{y(z)} = - \left(\frac{\partial \mathbf{F}_{y(z)}}{\partial \mathbf{X}} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{F}_{y(z)}}{\partial \mathbf{U}} \Delta \mathbf{U} - \left(\frac{\partial \mathbf{F}_{y(z)}}{\partial \mathbf{X}} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{F}_{y(z)}}{\partial \mathbf{W}} \Delta \mathbf{W}. \quad (25)$$

Обозначив:

$$\mathbf{S}_{z(y)}^U = - \left(\frac{\partial \mathbf{F}_{z(y)}}{\partial \mathbf{X}} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{F}_{z(y)}}{\partial \mathbf{U}};$$

$$\mathbf{S}_{z(y)}^W = - \left(\frac{\partial \mathbf{F}_{z(y)}}{\partial \mathbf{X}} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{F}_{z(y)}}{\partial \mathbf{W}};$$

$$\mathbf{S}_{y(z)}^U = - \left(\frac{\partial \mathbf{F}_{y(z)}}{\partial \mathbf{X}} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{F}_{y(z)}}{\partial \mathbf{U}};$$

$$\mathbf{S}_{y(z)}^W = - \left(\frac{\partial \mathbf{F}_{y(z)}}{\partial \mathbf{X}} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{F}_{y(z)}}{\partial \mathbf{W}};$$

получим матрицы чувствительности, и тогда матричные выражения (24) и (25) соответственно принимают следующий вид:

$$\Delta \mathbf{X}_{z(y)} = \mathbf{S}_{z(y)}^U \Delta \mathbf{U}_{z(y)} + \mathbf{S}_{z(y)}^W \Delta \mathbf{W}_{z(y)};$$

$$\Delta \mathbf{X}_{y(z)} = \mathbf{S}_{y(z)}^U \Delta \mathbf{U}_{y(z)} + \mathbf{S}_{y(z)}^W \Delta \mathbf{W}_{y(z)}.$$

Приращения векторов состояния или вектора зависимых переменных характеризуют приращения составляющих комплексных токов независимых станционных узлов и комплексных напряжений нагрузочных узлов:

$$\Delta \mathbf{X}_{z(y)} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{I}'_m \\ \Delta \mathbf{I}''_m \end{bmatrix}; \quad \Delta \mathbf{X}_{y(z)} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{U}'_k \\ \Delta \mathbf{U}''_k \end{bmatrix}.$$

Тогда скорректированные режимные параметры определяются следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}'_m \\ \mathbf{I}''_m \end{bmatrix}^H = \begin{bmatrix} \mathbf{I}'_m \\ \mathbf{I}''_m \end{bmatrix}^\Phi + \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{I}'_m \\ \Delta \mathbf{I}''_m \end{bmatrix}^H; \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}'_k \\ \mathbf{U}''_k \end{bmatrix}^H = \begin{bmatrix} \mathbf{U}'_k \\ \mathbf{U}''_k \end{bmatrix}^\Phi + \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{U}'_k \\ \Delta \mathbf{U}''_k \end{bmatrix}, \quad (27)$$

где H – новый; Φ – функционирующий (существующий) режимы.

При этом матрицы чувствительности получают вид:

$$S_{Z(Y)}^U = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pm}}{\partial \mathbf{I}'_n} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pm}}{\partial \mathbf{I}''_n} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qm}}{\partial \mathbf{I}'_n} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qm}}{\partial \mathbf{I}''_n} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pm}}{\partial \mathbf{P}_n} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pm}}{\partial \mathbf{Q}_n} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qm}}{\partial \mathbf{P}_n} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qm}}{\partial \mathbf{Q}_n} \end{bmatrix};$$

$$S_{Z(Y)}^W = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pm}}{\partial \mathbf{I}'_n} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pm}}{\partial \mathbf{I}''_n} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qm}}{\partial \mathbf{I}'_n} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qm}}{\partial \mathbf{I}''_n} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pm}}{\partial \mathbf{U}'_l} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pm}}{\partial \mathbf{U}''_l} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qm}}{\partial \mathbf{U}'_l} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qm}}{\partial \mathbf{U}''_l} \end{bmatrix};$$

$$S_{Y(Z)}^U = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pk}}{\partial \mathbf{U}'_l} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pk}}{\partial \mathbf{U}''_l} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qk}}{\partial \mathbf{U}'_l} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qk}}{\partial \mathbf{U}''_l} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pk}}{\partial \mathbf{I}'_n} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pk}}{\partial \mathbf{I}''_n} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qk}}{\partial \mathbf{I}'_n} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qk}}{\partial \mathbf{I}''_n} \end{bmatrix};$$

$$S_{Y(Z)}^W = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pk}}{\partial \mathbf{U}'_l} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pk}}{\partial \mathbf{U}''_l} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qk}}{\partial \mathbf{U}'_l} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qk}}{\partial \mathbf{U}''_l} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pk}}{\partial \mathbf{P}_l} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pk}}{\partial \mathbf{Q}_l} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qk}}{\partial \mathbf{P}_l} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qk}}{\partial \mathbf{Q}_l} \end{bmatrix}.$$

С учетом матриц чувствительности выражения (26) и (27) можно пред-
ставить:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}'_m \\ \mathbf{I}''_m \end{bmatrix}^H = \begin{bmatrix} \mathbf{I}'_m \\ \mathbf{I}''_m \end{bmatrix}^\Phi - \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pm}}{\partial \mathbf{I}'_n} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pm}}{\partial \mathbf{I}''_n} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qm}}{\partial \mathbf{I}'_n} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qm}}{\partial \mathbf{I}''_n} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pm}}{\partial \mathbf{P}_n} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pm}}{\partial \mathbf{Q}_n} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qm}}{\partial \mathbf{P}_n} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qm}}{\partial \mathbf{Q}_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}_n \\ \Delta \mathbf{Q}_n \end{bmatrix} -$$

$$- \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pm}}{\partial \mathbf{I}'_n} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pm}}{\partial \mathbf{I}''_n} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qm}}{\partial \mathbf{I}'_n} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qm}}{\partial \mathbf{I}''_n} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pm}}{\partial \mathbf{U}'_l} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pm}}{\partial \mathbf{U}''_l} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qm}}{\partial \mathbf{U}'_l} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qm}}{\partial \mathbf{U}''_l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{U}'_l \\ \Delta \mathbf{U}''_l \end{bmatrix}; \quad (28)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}'_k \\ \mathbf{U}''_k \end{bmatrix}^H = \begin{bmatrix} \mathbf{U}'_k \\ \mathbf{U}''_k \end{bmatrix}^\Phi - \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pk}}{\partial \mathbf{U}'_l} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pk}}{\partial \mathbf{U}''_l} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qk}}{\partial \mathbf{U}'_l} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qk}}{\partial \mathbf{U}''_l} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pk}}{\partial \mathbf{I}'_n} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pk}}{\partial \mathbf{I}''_n} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qk}}{\partial \mathbf{I}'_n} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qk}}{\partial \mathbf{I}''_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{I}'_n \\ \Delta \mathbf{I}''_n \end{bmatrix} -$$

$$- \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pk}}{\partial \mathbf{U}'_l} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pk}}{\partial \mathbf{U}''_l} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qk}}{\partial \mathbf{U}'_l} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qk}}{\partial \mathbf{U}''_l} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pk}}{\partial \mathbf{P}_l} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pk}}{\partial \mathbf{Q}_l} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qk}}{\partial \mathbf{P}_l} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qk}}{\partial \mathbf{Q}_l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}_k \\ \Delta \mathbf{Q}_k \end{bmatrix}. \quad (29)$$

Матричные выражения (28) и (29) получены для самого общего случая, когда одновременно изменяются как вектор управления $\mathbf{U}$, так и вектор возмущения $\mathbf{W}$. На практике чаще всего изменяются активные и реактивные мощности нагрузочных узлов, т. е. компоненты вектора возмущения $\mathbf{W}$. При этом матричные выражения (28) и (29) можно записать следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}'_m \\ \mathbf{I}''_m \end{bmatrix}^H = \begin{bmatrix} \mathbf{I}'_m \\ \mathbf{I}''_m \end{bmatrix}^\Phi - \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pm}}{\partial \mathbf{I}'_n} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pm}}{\partial \mathbf{I}''_n} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qm}}{\partial \mathbf{I}'_n} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qm}}{\partial \mathbf{I}''_n} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pm}}{\partial \mathbf{U}'_l} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pm}}{\partial \mathbf{U}''_l} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qm}}{\partial \mathbf{U}'_l} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qm}}{\partial \mathbf{U}''_l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{U}'_l \\ \Delta \mathbf{U}''_l \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}'_k \\ \mathbf{U}''_k \end{bmatrix}^H = \begin{bmatrix} \mathbf{U}'_k \\ \mathbf{U}''_k \end{bmatrix}^\Phi - \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pk}}{\partial \mathbf{U}'_l} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pk}}{\partial \mathbf{U}''_l} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qk}}{\partial \mathbf{U}'_l} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qk}}{\partial \mathbf{U}''_l} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pk}}{\partial \mathbf{P}_l} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pk}}{\partial \mathbf{Q}_l} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qk}}{\partial \mathbf{P}_l} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qk}}{\partial \mathbf{Q}_l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}_k \\ \Delta \mathbf{Q}_k \end{bmatrix}.$$

Другие типы частных производных, входящие в приведенные выше выражения, определяются аналогично с учетом параметров исследуемого установившегося режима.

ВЫВОД

Получены универсальные выражения для коррекции параметров установившегося режима ЭЭС в гибридной Z - Y -форме, использующие матрицы чувствительности, формируемые для генерирующих и нагрузочных узлов разного типа в сложной ЭЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Х а ч а т р я н В. С. К методам расчета собственных и взаимных сопротивлений сложных энергосистем // Электричество. – 1964. – № 10. – С. 47–57.
2. Н а р р Н. Н. Z-diakoptics, torn subdivisions radially attached // IEEE Transactions. – 1967. – V. PAS-86, № 6. – P. 751–769.
3. Х а ч а т р я н В. С., Б а д а л я н Н. П. Расчет установившегося режима большой электроэнергетической системы методом диакоптики // Электричество. – 2003. – № 6. – С. 13–17.
4. Х а ч а т р я н В. С., Б а д а л я н Н. П. Решение гибридных уравнений установившегося режима электроэнергетической системы // Электричество. – 2003. – № 11. – С. 11–16.
5. Б а д а л я н Н. П. Реализация математической модели установившегося режима электроэнергетической системы // Электричество. – 2005. – № 6. – С. 33–40.
6. Х а ч а т р я н К. В. Новая диакоптическая обобщенная математическая модель коррекции установившегося режима сложной электроэнергетической системы // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2005. – № 1. – С. 76–88.
7. Х а ч а т р я н В. С., Х а ч а т р я н К. В. Новый метод коррекции установившегося режима сложной электроэнергетической системы // Вестник инженерной академии Армении. – 2005. – № 1. – С. 19–26.
8. Х а ч а т р я н К. В. Метод коррекции установившегося режима электроэнергетической системы // Электричество. – 2005. – № 5. – С. 8–11.

Поступила 17.10.2005