УДК 621.311.1.001.24

КОРРЕКЦИЯ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ЗАДАННЫХ АКТИВНЫХ МОЩНОСТЯХ И АРГУМЕНТАХ КОМПЛЕКСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ СТАНЦИОННЫХ УЗЛОВ

Канд. техн. наук ХАЧАТРЯН К. В.

Государственный инженерный университет Армении

Расчет установившегося режима электроэнергетической системы (ЭЭС) и его коррекция являются взаимосвязанными и взаимодополняющими задачами [1...8]. Коррекция режима сводится к уточнению функционирующего установившегося режима, когда изменяется исходная информация относительно пассивной [1] либо активной части [8].

Если [8] посвящена коррекции установившегося режима при $P-Q$ типе станционных узлов, то настоящая работа – коррекции установившегося режима при $P-U$ типе станционных узлов, когда уравнения состояния ЭЭС задаются в $Y-Z$ форме [2...5, 8, 9].

Появление [5...9] обеспечивает высокую маневренность при пользовании $Y-Z$ формой уравнений установившегося режима ЭЭС, которая и используется в настоящей работе.

Для решения задачи коррекции установившегося режима ЭЭС в работе приводятся следующие типы систем нелинейных алгебраических уравнений [7].

• Для $Y(Z)$ блока независимых станционных узлов с индексами $m(n)$:

$$\begin{cases} P_m = P_{\text{Б}m} + \sum\limits_{n=1}^{\Gamma} U_m\left[g_{m,n}\cos(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) + b_{m,n}\sin(\Psi_{Um} - \Psi_{Un})\right]U_n; \\ Q_m = Q_{\text{Б}m} + \sum\limits_{n=1}^{\Gamma} U_m\left[g_{m,n}\sin(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) + b_{m,n}\cos(\Psi_{Um} - \Psi_{Un})\right]U_n. \end{cases} \tag{1}$$

• Для $Z(Y)$ блока нагрузочных узлов с индексами $k(l)$:

$$\begin{cases} P_k = P_{\text{Б}k} + \sum\limits_{l=\Gamma+1}^{M}\left[R_{k,l}(I'_k I'_l + I''_k I''_l) + X_{k,l}(I''_k I'_l - I'_k I''_l)\right]U_n; \\ Q_k = Q_{\text{Б}k} - \sum\limits_{l=\Gamma+1}^{M}\left[R_{k,l}(I''_k I'_l - I'_k I''_l) - X_{k,l}(I'_k I'_l + I''_k I''_l)\right]U_n. \end{cases} \tag{2}$$

Выражения $P_{\text{Б}m}$, $Q_{\text{Б}m}$ и $P_{\text{Б}k}$, $Q_{\text{Б}k}$ приведены в [7] в виде (3), (4) и (5), (6) соответственно.

Представим системы нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима (1) и (2) в виде:

$$\begin{cases} \Phi_{pm} = P_m - \left[P_{\text{Б}m} + \varphi_{pm}(U_n; \Psi_{Un})\right] = 0; \\ \Phi_{qm} = Q_m - \left[Q_{\text{Б}m} + \varphi_{qm}(U_n; \Psi_{Un})\right] = 0; \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} \Phi_{pk} = P_k - \left[P_{Бk} + \varphi_{pk}(I_l'; I_l'')\right] = 0; \\ \Phi_{qk} = Q_k - \left[Q_{Бk} + \varphi_{pk}(I_l'; I_l'')\right] = 0, \end{cases} \tag{4}$$

где

$$\begin{cases} \varphi_{pm}(U_n, \Psi_{Un}) = \sum_{n=1}^{\Gamma} U_m\left[g_{m,n}\cos(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) + b_{m,n}\sin(\Psi_{Um} - \Psi_{Un})\right]U_n; \\ \varphi_{qm}(U_n, \Psi_{Un}) = \sum_{n=1}^{\Gamma} U_m\left[g_{m,n}\sin(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) - b_{m,n}\cos(\Psi_{Um} - \Psi_{Un})\right]U_n; \end{cases} \tag{5}$$

$$\begin{cases} \varphi_{pk}(I_l', I_l'') = \sum_{l=\Gamma+1}^{M} \left[R_{k,l}(I_k', I_l' + I_k'', I_l'') + X_{k,l}(I_k'', I_l' - I_k', I_l'')\right]; \\ \varphi_{qk}(I_l', I_l'') = \sum_{l=\Gamma+1}^{M} \left[R_{k,l}(I_k'', I_l' - I_k', I_l'') - X_{k,l}(I_k', I_l' + I_k'', I_l'')\right]. \end{cases} \tag{6}$$

Пользуясь понятиями векторов состояния **X**, управления **U** и возмущения **W**, как это сделано в [8], можно написать:

$$\mathbf{X} = \left[\begin{array}{ll} \left.\begin{matrix} P \\ Q \end{matrix}\right\} & \text{для базисного (балансирующего) станционного узла типа } U\text{–}\Psi_U; \\ \left.\begin{matrix} Q \\ \Psi \end{matrix}\right\} & \text{для независимых станционных узлов типа } P\text{–}U; \\ \left.\begin{matrix} I'_{Z(Y)} \\ I''_{Z(Y)} \end{matrix}\right\} & \text{для системы нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима } \mathbf{Z}(\mathbf{Y}) \text{ блока с индексами } k(\ell). \end{array}\right] \tag{7}$$

$$\mathbf{U} = \left[\begin{array}{ll} \left.\begin{matrix} U_0 \\ \Psi_{U0} \end{matrix}\right\} & \text{для базисного (балансирующего) станционного узла типа } U\text{–}\Psi_U; \\ \left.\begin{matrix} P \\ U \end{matrix}\right\} & \text{для независимых станционных узлов типа } P\text{–}U; \\ \left.\begin{matrix} U'_{m(n)} \\ U''_{m(n)} \end{matrix}\right\} & \text{для системы нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима } \mathbf{Z}(\mathbf{Y}) \text{ блока с индексами } k\ (\ell). \end{array}\right] \tag{8}$$

$$\mathbf{W} = \left[\begin{array}{ll} \left.\begin{matrix} P \\ Q \end{matrix}\right\} & \text{для нагрузочных узлов типа } P\text{–}Q; \\ \left.\begin{matrix} I'_{Y(Z)} \\ I''_{Y(Z)} \end{matrix}\right\} & \text{для системы нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима } \mathbf{Z}(\mathbf{Y}) \text{ блока с индексами } \ell(k). \end{array}\right] \tag{9}$$

При этом системы уравнений **Y**(**Z**) и **Z**(**Y**) блоков (3) и (4) соответственно можно представить в виде следующих векторных уравнений:

$$\Phi_{Y(Z)}(\mathbf{X}, \mathbf{U}; \mathbf{W}) = 0\,; \tag{10}$$

$$\mathbf{\Phi}_{Z(Y)}(\mathbf{X},\ \mathbf{U};\ \mathbf{W})=0\,. \tag{11}$$

В каждом векторном уравнении (10) и (11) **X**, **U**, **W** имеют свои соответствующие компоненты согласно (7)...(9).

Если векторы **U** и **W** получают соответственно приращения $\Delta\mathbf{U}$ и $\Delta\mathbf{W}$, то приращение на $\Delta\mathbf{X}$ получает также **X**, и в результате (10) и (11) принимают следующий вид:

$$\mathbf{\Phi}_{Y(Z)}\left(\mathbf{X}^{P}+\Delta\mathbf{X},\ \mathbf{U}^{0}+\Delta\mathbf{U};\ \mathbf{W}^{0}+\Delta\mathbf{W}\right)=0\,; \tag{12}$$

$$\mathbf{\Phi}_{Z(Y)}\left(\mathbf{X}^{P}+\Delta\mathbf{X},\ \mathbf{U}^{0}+\Delta\mathbf{U};\ \mathbf{W}^{0}+\Delta\mathbf{W}\right)=0\,, \tag{13}$$

где $\mathbf{X}^{P}$ – вектор состояния в точке решения при заданных $\mathbf{U}^{0}$ и $\mathbf{W}^{0}$.

Разложив (12) и (13) в ряд Тейлора и пренебрегая при этом членами с частными производными второго и высших порядков, получим:

$$\Delta\mathbf{X}_{Y(Z)}=\mathbf{S}^{U}_{Y(Z)}\Delta\mathbf{U}_{Y(Z)}+\mathbf{S}^{W}_{Y(Z)}\Delta\mathbf{W}_{Y(Z)}\,; \tag{14}$$

$$\Delta\mathbf{X}_{Z(Y)}=\mathbf{S}^{U}_{Z(Y)}\Delta\mathbf{U}_{Z(Y)}+\mathbf{S}^{W}_{Z(Y)}\Delta\mathbf{W}_{Z(Y)}\,. \tag{15}$$

В выражениях (14), (15):

$$\mathbf{S}^{U}_{Y(Z)}=-\left(\frac{\partial\mathbf{\Phi}_{Y(Z)}}{\partial\mathbf{X}}\right)^{-1}\frac{\partial\mathbf{\Phi}_{Y(Z)}}{\partial\mathbf{U}}\,; \tag{16}$$

$$\mathbf{S}^{W}_{Y(Z)}=-\left(\frac{\partial\mathbf{\Phi}_{Y(Z)}}{\partial\mathbf{X}}\right)^{-1}\frac{\partial\mathbf{\Phi}_{Y(Z)}}{\partial\mathbf{W}}\,; \tag{17}$$

$$\mathbf{S}^{U}_{Z(Y)}=-\left(\frac{\partial\mathbf{\Phi}_{Z(Y)}}{\partial\mathbf{X}}\right)^{-1}\frac{\partial\mathbf{\Phi}_{Z(Y)}}{\partial\mathbf{U}}\,; \tag{18}$$

$$\mathbf{S}^{W}_{Z(Y)}=-\left(\frac{\partial\mathbf{\Phi}_{Z(Y)}}{\partial\mathbf{X}}\right)^{-1}\frac{\partial\mathbf{\Phi}_{Z(Y)}}{\partial\mathbf{W}}\,. \tag{19}$$

Обратные матрицы в правых частях уравнений (16)...(19) являются обращенными матрицами Якоби, которые возникают в соответствующих рекуррентных выражениях при решении систем нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима ЭЭС (10), (11) или (3), (4) методом первого порядка или Ньютона – Рафсона.

Это свидетельствует о том, что действительно коррекция установившегося режима ЭЭС сводится к его уточнению при изменении исходной информации относительно **U** и **W**.

Из (7) можно заметить, что искомыми режимными параметрами для независимых станционных узлов типа P–U являются реактивные мощности и аргументы комплексных напряжений. Из вторых уравнений (3) и (5) можно также заметить, что для определения реактивных мощностей достаточно иметь аргументы комплексных напряжений независимых станционных узлов.

При этом для определения указанных аргументов достаточно пользоваться только первыми уравнениями из (3) и (5). Несмотря на это, для определения аргументов Ψ_U в данном случае удобно пользоваться следующим рекуррентным выражением:

$$\begin{bmatrix} U'_m \\ \hline U''_m \end{bmatrix}^{И+1} = \begin{bmatrix} U'_m \\ \hline U''_m \end{bmatrix}^{И} - \left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U'_n} & \dfrac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U''_n} \\ \hline \dfrac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U'_n} & \dfrac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U''_n} \end{array}\right]^{-1} \begin{bmatrix} \Phi_{pm} \\ \hline \Phi_{qm} \end{bmatrix}. \tag{20}$$

Рекуррентное выражение относительно систем уравнений (4) принимает вид

$$\begin{bmatrix} I'_k \\ \hline I''_k \end{bmatrix}^{И+1} = \begin{bmatrix} I'_k \\ \hline I''_k \end{bmatrix}^{И} - \left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial \Phi_{pk}}{\partial I'_l} & \dfrac{\partial \Phi_{pk}}{\partial I''_l} \\ \hline \dfrac{\partial \Phi_{qk}}{\partial I'_l} & \dfrac{\partial \Phi_{qk}}{\partial I''_l} \end{array}\right]^{-1} \begin{bmatrix} \Phi_{pk} \\ \hline \Phi_{qk} \end{bmatrix}, \tag{21}$$

где И – номер итераций.

Частные производные, входящие в матрицу Якоби рекуррентного выражения (20), определяются формулами (20)...(24), приведенными в [7], а выражение (21) – формулами (29)...(34), приведенными в [3].

В силу (20) и (21), пользуясь (7)...(9), с учетом (14) и (15) можем написать:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta U'_m \\ \hline \Delta U''_m \end{bmatrix} = &- \left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U'_n} & \dfrac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U''_n} \\ \hline \dfrac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U'_n} & \dfrac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U''_n} \end{array}\right]^{-1} \left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial \Phi_{pm}}{\partial P_m} & \dfrac{\partial \Phi_{pm}}{\partial Q_m} \\ \hline \dfrac{\partial \Phi_{qm}}{\partial P_m} & \dfrac{\partial \Phi_{qm}}{\partial Q_m} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \hline \Delta Q_m \end{bmatrix} - \\ &- \left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U'_n} & \dfrac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U''_n} \\ \hline \dfrac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U'_n} & \dfrac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U''_n} \end{array}\right]^{-1} \left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial \Phi_{pm}}{\partial I'_{l,Y(z)}} & \dfrac{\partial \Phi_{pm}}{\partial I''_{l,Y(z)}} \\ \hline \dfrac{\partial \Phi_{qm}}{\partial I'_{l,Y(z)}} & \dfrac{\partial \Phi_{qm}}{\partial I''_{l,Y(z)}} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \Delta I'_{k,Y(z)} \\ \hline \Delta I''_{k,Y(z)} \end{bmatrix}; \end{aligned} \tag{22}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta I'_{k,Z(Y)} \\ \Delta I''_{k,Z(Y)} \end{bmatrix} = -\left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial\Phi_{pk}}{\partial I'_l} & \dfrac{\partial\Phi_{pk}}{\partial I''_l} \\ \dfrac{\partial\Phi_{qk}}{\partial I'_l} & \dfrac{\partial\Phi_{qk}}{\partial I''_l} \end{array}\right]^{-1} \left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial\Phi_{pk}}{\partial U'_n} & \dfrac{\partial\Phi_{pk}}{\partial U''_n} \\ \dfrac{\partial\Phi_{qk}}{\partial U'_n} & \dfrac{\partial\Phi_{qk}}{\partial U''_n} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \Delta U'_m \\ \Delta U''_m \end{bmatrix} -$$

$$- \left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial\Phi_{pk}}{\partial I'_l} & \dfrac{\partial\Phi_{pk}}{\partial I''_l} \\ \dfrac{\partial\Phi_{qk}}{\partial I'_l} & \dfrac{\partial\Phi_{qk}}{\partial I''_l} \end{array}\right]^{-1} \left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial\Phi_{pk}}{\partial P_l} & \dfrac{\partial\Phi_{pk}}{\partial Q_l} \\ \dfrac{\partial\Phi_{qk}}{\partial P_l} & \dfrac{\partial\Phi_{qk}}{\partial Q_l} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \end{bmatrix}. \qquad (23)$$

Если предположить, что приращение получают только компоненты вектора **W**, то искомые режимные параметры скорректированного установившегося режима ЭЭС определяются:

$$\begin{bmatrix} U'_m \\ U''_m \end{bmatrix}^{\text{Н}} = \begin{bmatrix} U'_m \\ U''_m \end{bmatrix}^{\Phi} - \left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial\Phi_{pm}}{\partial U'_n} & \dfrac{\partial\Phi_{pm}}{\partial U''_n} \\ \dfrac{\partial\Phi_{qm}}{\partial U'_n} & \dfrac{\partial\Phi_{qm}}{\partial U''_n} \end{array}\right]^{-1} \left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial\Phi_{pm}}{\partial I'_{l,Y(Z)}} & \dfrac{\partial\Phi_{pm}}{\partial I''_{l,Y(Z)}} \\ \dfrac{\partial\Phi_{qm}}{\partial I'_{l,Y(Z)}} & \dfrac{\partial\Phi_{qm}}{\partial I''_{l,Y(Z)}} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \Delta I'_{k,Y(Z)} \\ \Delta I''_{k,Y(Z)} \end{bmatrix}; \qquad (24)$$

$$\begin{bmatrix} I'_{k,Z(Y)} \\ I''_{k,Z(Y)} \end{bmatrix}^{\text{Н}} = \begin{bmatrix} I'_{k,Z(Y)} \\ I''_{k,Z(Y)} \end{bmatrix}^{\Phi} - \left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial\Phi_{pk}}{\partial I'_l} & \dfrac{\partial\Phi_{pk}}{\partial I''_l} \\ \dfrac{\partial\Phi_{qk}}{\partial I'_l} & \dfrac{\partial\Phi_{qk}}{\partial I''_l} \end{array}\right]^{-1} \left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial\Phi_{pk}}{\partial P_l} & \dfrac{\partial\Phi_{pk}}{\partial Q_l} \\ \dfrac{\partial\Phi_{qk}}{\partial P_l} & \dfrac{\partial\Phi_{qk}}{\partial Q_l} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \end{bmatrix}, \qquad (25)$$

где Н – новый, Ф – функционирующий установившиеся режимы.

Для решения численных практических задач в обобщенной форме можно предложить следующий вычислительный алгоритм.

1. В ходе расчета текущего установившегося режима с помощью рекуррентных выражений (20) и (21) получаются матрицы Якоби с численными элементами, которые входят в (24) и (25).

2. Устанавливаются численные значения элементов других квадратных матриц, входящих в правую часть выражений (24) и (25).

В данном случае $\partial\Phi_{pm}/\partial I'_l$; $\partial\Phi_{pm}/\partial I''_l$; $\partial\Phi_{qm}/\partial I'_l$; $\partial\Phi_{qm}/\partial I''_l$ определяются на основании следующих выражений:

$$\frac{\partial\Phi_{pm}}{\partial I'_l} = -\sum_{l=\Gamma+1}^{M}\left(A'_{m,l}U'_m + A''_{m,l}U''_m\right); \quad \frac{\partial\Phi_{pm}}{\partial I''_l} = -\sum_{l=\Gamma+1}^{M}\left(A'_{m,l}U''_m - A''_{m,l}U'_m\right); \qquad (26)$$

$$\frac{\partial\Phi_{qm}}{\partial I'_l} = -\sum_{l=\Gamma+1}^{M}\left(A'_{m,l}U''_m - A''_{m,l}U'_m\right); \quad \frac{\partial\Phi_{qm}}{\partial I''_l} = -\sum_{l=\Gamma+1}^{M}\left(A'_{m,l}U''_m + A''_{m,l}U'_m\right). \qquad (27)$$

А также:

$$\frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial P_l} = \begin{cases} 1 \text{ при } l = k; \\ 0 \text{ при } l \neq k; \end{cases} \qquad \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial P_l} = \begin{cases} 0 \text{ при } l = k; \\ 0 \text{ при } l \neq k; \end{cases} \tag{28}$$

$$\frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial Q_l} = \begin{cases} 0 \text{ при } l = k; \\ 0 \text{ при } l \neq k; \end{cases} \qquad \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial Q_l} = \begin{cases} 1 \text{ при } l = k; \\ 0 \text{ при } l \neq k. \end{cases} \tag{29}$$

3. Согласно постановке задач, устанавливая численные значения приращений ΔP_k и ΔQ_k, определяются численные значения приращений составляющих комплексных токов нагрузочных узлов $\Delta I'_{k,Y(Z)}$ и $\Delta I''_{k,Y(Z)}$.

4. Устанавливаются численные значения $I_{k,Y(Z)}^{\prime,\text{Н}}$ и $I_{k,Y(Z)}^{\prime\prime,\text{Н}}$ составляющих комплексных токов нагрузочных узлов на основании (25), а также численные значения составляющих комплексных напряжений станционных узлов – $U_m^{\prime,\text{Н}}$ и $U_m^{\prime\prime,\text{Н}}$ на основании (24).

ЛИТЕРАТУРА

1. Хачатрян В. С., Этмекчян Э. А. Метод коррекции установившихся режимов электрических систем // Электричество. – 1987. – № 3. – С. 6–14.

2. Хачатрян В. С., Этмекчян Э. А. Развитие гибридного метода расчета установившегося режима электрической системы // Электричество. – 1991. – № 1. – С. 6–13.

3. Решение систем гибридных уравнений установившегося режима ЭЭС при смешанном типе станционных узлов / В. С. Хачатрян, Н. П. Бадалян, М. Г. Тамразян, А. Г. Гулян // Изв. НАН и ГИУА. Сер. ТН. – 2001. – № 2. – С. 210–217.

4. Хачатрян В. С., Бадалян Н. П. Решение (*Y–Z*)-уравнений установившегося режима электроэнергетической системы методом декомпозиции // Изв. НАН и ГИУА. Сер. ТН. – 1997. – Т. 50. – № 2. – С. 96–103.

5. Метод коррекции *Y–Z* расчетной матрицы электроэнергетической системы / В. С. Хачатрян, Н. П. Бадалян, К. В. Хачатрян, К. К. Маргарян // Изв. НАН и ГИУА. Сер. ТН. – 2001. – № 1. – С. 41–46.

6. Хачатрян К. В. К решению системы нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима электроэнергетических систем методом Ньютона – Рафсона // Изв. НАН и ГИУА. Сер. ТН. – 1999. – № 1. – С. 38–43.

7. Хачатрян К. В. Расчет установившегося режима ЭЭС при *P–U* типе станционных узлов // Изв. НАН и ГИУА. Сер. ТН – 2000. – № 1. – С. 39–43.

8. Хачатрян К. В., Бороян А. В. Новый метод коррекции установившегося режима электроэнергетической системы // Изв. НАН и ГИУА. Сер. ТН. – 2002. – № 2. – С. 222–231.

9. Расчет установившегося режима электроэнергетической системы, когда станционные узлы типа *P–U* превращаются в нагрузочные узлы типа *P–Q* / В. С. Хачатрян, Н. П. Бадалян, К. В. Хачатрян, К. К. Маргарян // Изв. НАН и ГИУА. Сер. ТН. – 2002. – Т. 54. – № 1. – С. 52–57.

Поступила 28.03.2003