ISSN 0002-306X. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2002. Т. LV, № 3.

УДК 621.311 ЭНЕРГЕТИКА

К.В. ХАЧАТРЯН

КОРРЕКЦИЯ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ P-U ТИПЕ СТАНЦИОННЫХ УЗЛОВ

Предлагается метод коррекции функционирующего установившегося режима при изменении исходной информации относительно активных параметров ЭЭС.

Ключевые слова: режим, параметр, матрица, модель, информация, узел, мощность, коррекция, система, функция.

Задача расчета установившегося режима электроэнергетической системы (ЭЭС) и его коррекция являются взаимосвязанными [1-9]. Коррекция режима сводится к уточнению функционирующего установившегося режима, когда изменяется исходная информация либо относительно пассивной части [1], либо активной [8] ЭЭС.

Целью настоящей работы является коррекция установившегося режима при P-U типе станционных узлов, т.е. когда относительно станционных узлов задаются активные мощности и модули комплексных напряжений.

В [5,9] показана высокая маневренность при пользовании Y-Z типа систем нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима ЭЭС, применяемых в настоящей работе.

Для решения задачи коррекции установившегося режима ЭЭС рассматриваются следующие типы систем нелинейных алгебраических уравнений, приведенных в [7]:

— для Y(Z) блока независимых станционных узлов с индексами m(n):

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

—для Z(Y) блока нагрузочных узлов с индексами $k(\ell)$:

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

Выражения $P_{Бm}$, $Q_{Бm}$ и $P_{Бk}$, $Q_{Бk}$ приведены в [7] в виде (3), (4) и (5), (6) соответственно.

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

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

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

где

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

$$\begin{cases} \varphi_{pk}\left(I'_\ell,\ I''_\ell\right) = \sum\limits_{\ell=\Gamma+1}^{M} \left[R_{k,\ell}\left(I'_k,\ I'_\ell + I''_k,\ I''_\ell\right) + X_{k,\ell}\left(I''_k,\ I'_\ell - I'_k,\ I''_\ell\right)\right], \\ \varphi_{qk}\left(I'_\ell,\ I''_\ell\right) = -\sum\limits_{\ell=\Gamma+1}^{M} \left[R_{k,\ell}\left(I''_k,\ I'_\ell - I'_k,\ I''_\ell\right) - X_{k,\ell}\left(I'_k,\ I'_\ell + I''_k,\ I''_\ell\right)\right]. \end{cases} \tag{6}$$

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

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

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

$$[W]=\begin{bmatrix} \left.\begin{matrix} P \\ Q \end{matrix}\right\} & \text{для нагруз. узлов типа } P-Q; \\ \left.\begin{matrix} I'_{Y(Z)} \\ I''_{Y(Z)} \end{matrix}\right\} & \begin{matrix}\text{для системы нелинейных алгебр.уравнений} \\ \text{установившегося режима } Y(Z) \text{ блока с индексами } \ell\ (k). \end{matrix} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

При этом системы уравнений Y(Z) и Z(Y) блоков (1) и (2) соответственно можно представить в виде следующих векторных уравнений:

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

$$\Phi_{Z(Y)}\big(X,\ U;\ W\big)=0\,. \qquad (11)$$

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 ΔU и ΔW, то приращение на ΔX получает также X, и в результате уравнения (10) и (11) принимают вид

$$\Phi_{Y(Z)}\Big(X^{P}+\Delta X,\ U^{0}+\Delta U;\ W^{0}+\Delta W\Big)=0\,, \qquad (12)$$

$$\Phi_{Z(Y)}\Big(X^{P}+\Delta X,\ U^{0}+\Delta U;\ W^{0}+\Delta W\Big)=0\,, \qquad (13)$$

где X^{P} - вектор состояния в точке решения при заданных U^{0} и W^{0}.

Разлагая (12) и (13) в ряд Тейлора, пренебрегая членами с частными производными второго и высших порядков, получим

$$\Delta X_{Y(Z)}=S^{U}_{Y(Z)}\Delta U_{Y(Z)}+S^{W}_{Y(Z)}\Delta W_{Y(Z)}\,, \qquad (14)$$

$$\Delta X_{Z(Y)}=S^{U}_{Z(Y)}\Delta U_{Z(Y)}+S^{W}_{Z(Y)}\Delta W_{Z(Y)}\,. \qquad (15)$$

В выражениях (14), (15):

$$S^{U}_{Y(Z)}=-\left(\frac{\partial\Phi_{Y(Z)}}{\partial X}\right)^{-1}\frac{\partial\Phi_{Y(Z)}}{\partial U}\,, \qquad (16)$$

$$S^{W}_{Y(Z)}=-\left(\frac{\partial\Phi_{Y(Z)}}{\partial X}\right)^{-1}\frac{\partial\Phi_{Y(Z)}}{\partial W}\,, \qquad (17)$$

$$S^{U}_{Z(Y)}=-\left(\frac{\partial\Phi_{Z(Y)}}{\partial X}\right)^{-1}\frac{\partial\Phi_{Z(Y)}}{\partial U}\,, \qquad (18)$$

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

Обратные матрицы в левых частях (16)-(19) являются обращенными матрицами Якоби, которые возникают в соответствующих рекуррентных выражениях при решении систем нелинейных векторных 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 уточнению функционирующего установившегося режима 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 Q и аргументы φ_U комплексных напряжений. С другой стороны, 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). Расчетная система нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима ЭЭС принимает вид

$$\Phi_{pm}(P_m,\ U_n,\ \Psi_{un}) = P_m - \left[P_{Ám} + \phi_{pm}(U_n,\ \Psi_{Un})\right], \tag{20}$$

$$\begin{cases} \Phi_{pk}(P_k,\ I'_\ell,\ I''_\ell) = P_k - \left[P_{Бk} + \varphi_{pk}(I'_\ell,\ I''_\ell)\right], \\ \Phi_{qk}(Q_k,\ I'_\ell,\ I''_\ell) = Q_k - \left[Q_{Бk} + \varphi_{qk}(I'_\ell,\ I''_\ell)\right]. \end{cases} \tag{21}$$

Рекуррентное выражение для решения системы (20) представ-ляется в виде

$$\left[\Psi_{Um}\right]^{И+1} = \left[\Psi_{Um}\right]^{И} - \left[\frac{\partial\Phi(\Psi)}{\partial\Psi_{Un}}\right]^{-1} \cdot \left[\Phi_{pm}\right], \tag{22}$$

а для решения (21):

$$\left[\begin{array}{c} I'_k \\ \hline I''_k \end{array}\right]^{И+1} = \left[\begin{array}{c} I'_k \\ \hline I''_k \end{array}\right]^{И} - \left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial\Phi_{pk}}{\partial I'_\ell} & \dfrac{\partial\Phi_{pk}}{\partial I''_\ell} \\ \dfrac{\partial\Phi_{qk}}{\partial I'_\ell} & \dfrac{\partial\Phi_{qk}}{\partial I''_\ell} \end{array}\right]^{-1} \cdot \left[\begin{array}{c} \Phi_{pk} \\ \hline \Phi_{qk} \end{array}\right], \tag{23}$$

где И - номер итерации.

Частные производные, входящие в матрицу Якоби рекуррентного выражения (22), определяются формулами (20)-(24), приведенными в [7], а выражение (23) - формулами (36)-(39), приведенными в [3].

В силу (22) и (23), пользуясь (7)-(9), относительно (14) и (15) можно написать следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \left[\Delta\Psi_{Um}\right] = -\left[\frac{\partial\Phi_{pm}}{\partial\Psi_{Un}}\right]^{-1} \cdot \left[\frac{\partial\Phi_{pm}}{\partial P_n}\right] \cdot \left[\Delta P_m\right] - \left[\frac{\partial\Phi_{pm}}{\partial\Psi_{Un}}\right]^{-1} \times \\ \times \left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial\Phi_{pm}}{\partial I'_\ell} & \dfrac{\partial\Phi_{pm}}{\partial I''_\ell} \end{array}\right] \cdot \left[\begin{array}{c} \Delta I'_{k,Y(Z)} \\ \hline \Delta I''_{k,Y(Z)} \end{array}\right]; \end{aligned} \tag{24}$$

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

$$
- \left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial \Phi_{pk}}{\partial I'_\ell} & \dfrac{\partial \Phi_{pk}}{\partial I''_\ell} \\ \dfrac{\partial \Phi_{qk}}{\partial I'_\ell} & \dfrac{\partial \Phi_{qk}}{\partial I''_\ell} \end{array}\right]^{-1} \cdot \left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial \Phi_{pk}}{\partial P_\ell} & \dfrac{\partial \Phi_{pk}}{\partial Q_\ell} \\ \dfrac{\partial \Phi_{qk}}{\partial P_\ell} & \dfrac{\partial \Phi_{qk}}{\partial Q_\ell} \end{array}\right] \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \hline \Delta Q_k \end{bmatrix}. \tag{25}
$$

Если предположить, что приращение получают только компоненты вектора W, искомые режимные параметры скорректированного установившегося режима ЭЭС определяются в виде

$$
[\Psi_{Um}]^{H} = [\Psi_{Um}]^{\Phi} - \left[\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{Un}}\right]^{-1} \cdot \left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial \Phi_{pm}}{\partial I'_\ell} & \dfrac{\partial \Phi_{pm}}{\partial I''_\ell} \end{array}\right] \cdot \begin{bmatrix} \Delta I'_{k,Y(Z)} \\ \hline \Delta I''_{k,Y(Z)} \end{bmatrix}, \tag{26}
$$

$$
\begin{bmatrix} I'_{k,Z(Y)} \\ \hline I''_{k,Z(Y)} \end{bmatrix}^{H} = \begin{bmatrix} I'_{k,Z(Y)} \\ \hline I''_{k,Z(Y)} \end{bmatrix}^{\Phi} - \left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial \Phi_{pk}}{\partial I'_\ell} & \dfrac{\partial \Phi_{pk}}{\partial I''_\ell} \\ \dfrac{\partial \Phi_{qk}}{\partial I'_\ell} & \dfrac{\partial \Phi_{qk}}{\partial I''_\ell} \end{array}\right]^{-1} \cdot \left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial \Phi_{pk}}{\partial P_\ell} & \dfrac{\partial \Phi_{pk}}{\partial Q_\ell} \\ \dfrac{\partial \Phi_{qk}}{\partial P_\ell} & \dfrac{\partial \Phi_{qk}}{\partial Q_\ell} \end{array}\right] \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \hline \Delta Q_k \end{bmatrix}. \tag{27}
$$

Следует отметить, что частные производные $\partial \Phi_{pm} / \partial I'_\ell$, $\partial \Phi_{pm} / \partial I''_\ell$ определяются на основании аналитического выражения (20):

$$
\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial I'_\ell} = -\sum_{\ell=\Gamma+1}^{M} \left(A'_{m,\ell} \cos \Psi_{Um} + A''_{m,\ell} \sin \Psi_{Um} \right) U_m , \tag{28}
$$

$$
\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial I''_\ell} = -\sum_{\ell=\Gamma+1}^{M} \left(A'_{m,\ell} \sin \Psi_{Um} - A''_{m,\ell} \cos \Psi_{Um} \right) U_m , \tag{29}
$$

а частные производные, входящие во вторую матрицу (27), - на основании следующих соотношений:

$$
\frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial P_\ell} = \begin{cases} 1 \text{ при } \ell = k; \\ 0 \text{ при } \ell \neq k; \end{cases} \qquad \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial Q_\ell} = \begin{cases} 1 \text{ при } \ell = k; \\ 0 \text{ при } \ell \neq k; \end{cases}
$$

$$
\frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial Q_\ell} = \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial P_\ell} = 0 \text{ для всех } k \text{ и } \ell . \tag{30}
$$

В выражениях (26), (27) Н - новый, Ф - функционирующий установившиеся режимы.

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

1. Осуществляя расчет текущего установившегося режима с помощью рекуррентных выражений (22) и (23), получаются матрицы Якоби с численными элементами, которые входят также в (24) и (25).
2. Устанавливаются численные значения элементов других квадратных матриц, входящих в правую часть выражений (24) и (25).
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. На основании (27) устанавливаются численные значения $I'^{H}_{k,Z(Y)}$ и $I''^{H}_{k,Z(Y)}$ составляющих комплексных токов нагрузочных узлов, а на основании (26) - численные значения аргументов составляющих комплексных напряжений станционных узлов – Ψ_{Um}.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. **Хачатрян В. С., Бадалян Н. П., Тамразян М. Г., Гулян А. Г.** Решение систем гибридных уравнений установившегося режима ЭЭС при смешанном типе станционных узлов // Изв. НАН и ГИУА. Сер. ТН.-2001.- Т. 54,№ 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. **Хачатрян В. С., Бадалян Н. П., Хачатрян К. В., Маргарян К. К.** Метод коррекции Y-Z расчетной матрицы электроэнергетической системы // Изв. НАН и ГИУА. Сер. ТН.-2001.- Т. 54,№ 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.- Т. 52, № 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.- Т. 53, № 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.- Т. 55, № 2.- С. 222-232.

9. **Хачатрян В. С., Бадалян Н. П., Хачатрян К. В., Маргарян К. К.** Расчет установившегося режима электроэнергетической системы, когда станционные узлы типа P-U превращаются в нагрузочные узлы типа P-Q // Изв. НАН и ГИУА. Сер. ТН.-2002.- Т 55.- № 1.- С. 52-57.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 20.04.2001.

Կ.Վ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ

ԷԼԵԿՏՐԱԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԿԱՅՈՒՆԱՑՎԱԾ ՌԵԺԻՄԻ ՃՇԳՐՏՈՒՄԸ ԿԱՅԱՆԱՅԻՆ P-U ՀԱՆԳՈՒՅՑՆԵՐԻ ԴԵՊՔՈՒՄ

Առաջարկվում է ԷԷՀ կայունացված ռեժիմի ճշգրտման նոր մեթոդ, երբ էլեկտրական կայանները P-U տեսքի են:

K.V. KHACHATRYAN

STEADY-STATE CONDITION CORRECTION FOR ELECTRICAL POWER ENGINEERING SYSTEM IN P-U TYPE STATION UNITS

A correction method for functioning steady-state condition with initial information change concerning the active parameters in electrical power engineering system is proposed.