УДК 621.311.1.001.24

ДИАКОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД КОРРЕКЦИИ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА БОЛЬШОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Канд. техн. наук ХАЧАТРЯН К. В.

Государственный инженерный университет Армении

Решение многих режимных задач большой электроэнергетической системы (ЭЭС) может быть выполнено с применением методов диакоптики [1...6].

Впервые для решения задачи расчета установившихся режимов был применен метод диакоптики, представляя ЭЭС в виде радиально связанных подсистем в [2]. Если исследуемая ЭЭС содержит M независимых узлов как совокупность радиально связанных N отдельных подсистем [3], то уравнение состояния также представляется как совокупность уравнений состояния отдельных подсистем (при отсутствии ЭДС в ветвях) [2]:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{U}}_{i_1} = \dot{U}_{\text{Б}i_1} + \mathbf{Z}_{i_1,\,j_1}\dot{\mathbf{I}}_{j_1}; \\ \dot{\mathbf{U}}_{i_2} = \dot{U}_{\text{Б}i_2} + \mathbf{Z}_{i_2,\,j_2}\dot{\mathbf{I}}_{j_2}; \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \dot{\mathbf{U}}_{i_N} = \dot{U}_{\text{Б}i_N} + \mathbf{Z}_{i_N,\,j_N}\dot{\mathbf{I}}_{j_N}, \end{cases} \tag{1}$$

где $\dot{\mathbf{U}}_i = \left(\dot{U}_{i_1}, \dot{U}_{i_2}, \dots, \dot{U}_{i_N}\right)$; $\dot{\mathbf{I}}_j = \left(\dot{I}_{j_1}, \dot{I}_{j_2}, \dots, \dot{I}_{j_N}\right)$ – векторы комплексных напряжений и токов отдельных подсистем ЭЭС; $\dot{\mathbf{Z}}_{i_1 j_1}, \dot{\mathbf{Z}}_{i_2 j_2}, \dots, \dot{\mathbf{Z}}_{i_N j_N}$ – неособенные квадратные матрицы узловых собственных и взаимных сопротивлений отдельных подсистем.

Величины $\dot{U}_{\text{Б}i_1}, \dot{U}_{\text{Б}i_2}, \dots, \dot{U}_{\text{Б}i_N}$ определяются на основании соответствующих выражений [2].

Если умножить систему уравнений (1) соответственно на $\hat{I}_{i_1}, \hat{I}_{i_2}, \dots, \hat{I}_{i_N}$, то получим систему нелинейных алгебраических уравнений отдельных подсистем для активных и реактивных мощностей:

$$\begin{cases} \mathbf{\Phi}_{pi_1}\left(I'_{i_1}, I''_{i_1}\right) = P_{i_1} - \left\{P_{\text{Б}i_1} - \sum\limits_{j_1}\left[R_{i_1 j_1}\left(I'_{i_1}I'_{j_1} + I''_{i_1}I''_{j_1}\right) + X_{i_1 j_1}\left(I''_{i_1}I'_{j_1} - I'_{i_1}I''_{j_1}\right)\right]\right\}; \\ \mathbf{\Phi}_{qi_1}\left(I'_{i_1}, I''_{i_1}\right) = Q_{i_1} - \left\{Q_{\text{Б}i_1} - \sum\limits_{j_1}\left[X_{i_1 j_1}\left(I'_{i_1}I'_{j_1} + I''_{i_1}I''_{j_1}\right) - R_{i_1 j_1}\left(I''_{i_1}I'_{j_1} - I'_{i_1}I''_{j_1}\right)\right]\right\}; \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \mathbf{\Phi}_{pi_N}\left(I'_{i_N}, I''_{i_N}\right) = P_{i_N} - \left\{P_{\text{Б}i_N} - \sum\limits_{j_N}\left[R_{i_N j_N}\left(I'_{i_N}I'_{j_N} + I''_{i_N}I''_{j_N}\right) + X_{i_N j_N}\left(I''_{i_N}I'_{j_N} - I'_{i_N}I''_{j_N}\right)\right]\right\}; \\ \mathbf{\Phi}_{qi_N}\left(I'_{i_N}, I''_{i_N}\right) = Q_{i_N} - \left\{Q_{\text{Б}i_N} - \sum\limits_{j_N}\left[X_{i_N j_N}\left(I'_{i_N}I'_{j_N} + I''_{i_N}I''_{j_N}\right) - R_{i_N j_N}\left(I''_{i_N}I'_{j_N} - I'_{i_N}I''_{j_N}\right)\right]\right\}. \end{cases} \tag{2}$$

Величины $P_{Бi_1}, Q_{Бi_1}, \ldots, P_{Бi_N}, Q_{Бi_N}$ определяются на основании соответствующих выражений [2].

Пользуясь понятиями векторов состояния **X**, управления **Λ** и возмущения **W**, как это сделано в [7], можно записать:

$$[\mathbf{X}_{Zi}] = \begin{bmatrix} \left.\begin{matrix} P_Б \\ Q_Б \end{matrix}\right\} - \text{для единственного базисного (балансирующего) станционного узла типа } U - \Psi_U; \\ \left.\begin{matrix} I'_i \\ I''_i \end{matrix}\right\} - \text{для станционных и нагрузочных узлов типа } P - Q \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$[\mathbf{\Lambda}_{Zi}] = \begin{bmatrix} \left.\begin{matrix} U_Б \\ \Psi_{uБ} \end{matrix}\right\} - \text{для единственного базисного (балансирующего) станционного узла типа } U - \Psi_U; \\ \left.\begin{matrix} P_{mi} \\ Q_{mi} \end{matrix}\right\} - \text{для независимых станционных узлов типа } P - Q \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$[\mathbf{W}_{Zi}] = \begin{bmatrix} \left.\begin{matrix} P \\ Q \end{matrix}\right\} - \text{для нагрузочных узлов типа } P - Q \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где

$$i = (i_1, i_2, \ldots, i_N).$$

При этом систему уравнений (2) можно представить в виде

$$\mathbf{\Phi}_{Zi}(\mathbf{X}_{Zi}, \mathbf{\Lambda}_{Zi}, \mathbf{W}_{Zi}) = 0. \quad (6)$$

Фактически векторное уравнение (6) изображает математическую модель установившегося режима радиально связанных подсистем.

Если векторы $\mathbf{\Lambda}_{Zi}$ и $\mathbf{W}_{Zi}$ получают приращения $\Delta\mathbf{\Lambda}_{Zi}$, $\Delta\mathbf{W}_{Zi}$, то соответствующее приращение получает также $\mathbf{X}_{Zi}$, в результате чего (6) принимает следующий вид:∂

$$\mathbf{\Phi}_{Zi}(\mathbf{X}_{Zi} + \Delta\mathbf{X}_{Zi}, \mathbf{\Lambda}_{Zi} + \Delta\mathbf{\Lambda}_{Zi}, \mathbf{W}_{Zi} + \Delta\mathbf{W}_{Zi}) = 0. \quad (7)$$

Разлагая (7) в ряд Тейлора в области решения $\mathbf{X}^P_{Zi}$ при заданных $\mathbf{\Lambda}^0_{Zi}$ и $\mathbf{W}^0_{Zi}$, получим

$$\mathbf{\Phi}_{Zi}(\mathbf{X}^P_{Zi} + \Delta\mathbf{X}_{Zi}, \mathbf{\Lambda}^0_{Zi} + \Delta\mathbf{\Lambda}_{Zi}, \mathbf{W}^0_{Zi} + \Delta\mathbf{W}_{Zi}) = \mathbf{\Phi}_{Zi}(\mathbf{X}^P_{Zi}, \mathbf{\Lambda}^0_{Zi}, \mathbf{W}^0_{Zi}) +$$
$$+ \frac{\partial\mathbf{\Phi}_{Zi}}{\partial\mathbf{X}_{Zi}}\Delta\mathbf{X}_{Zi} + \frac{\partial\mathbf{\Phi}_{Zi}}{\partial\mathbf{\Lambda}_{Zi}}\Delta\mathbf{\Lambda}_{Zi} + \frac{\partial\mathbf{\Phi}_{Zi}}{\partial\mathbf{W}_{Zi}}\Delta\mathbf{W}_{Zi} + \mathbf{\Phi}^{\beta}_{Zi}, \quad (8)$$

где $\mathbf{\Phi}^{\beta}_{Zi}$ – члены ряда Тейлора, имеющие частные производные второго и высших порядков.

Пренебрегая $\mathbf{\Phi}^{\beta}_{Zi}$ и учитывая (6) и (7), выражение (10) принимает следующий вид:

$$\frac{\partial \mathbf{\Phi}_{Zi}}{\partial \mathbf{X}_{Zi}} \Delta \mathbf{X}_{Zi} + \frac{\partial \mathbf{\Phi}_{Zi}}{\partial \mathbf{\Lambda}_{Zi}} \Delta \mathbf{\Lambda}_{Zi} + \frac{\partial \mathbf{\Phi}_{Zi}}{\partial \mathbf{W}_{Zi}} \Delta \mathbf{W}_{Zi} = 0 . \tag{9}$$

Из (9) можно определить приращение искомого вектора состояния

$$\Delta \mathbf{X}_{Zi} = \mathbf{S}_{Zi}^{U} \Delta \mathbf{\Lambda}_{Zi} + \mathbf{S}_{Zi}^{W} \Delta \mathbf{W}_{Zi},$$

где

$$\mathbf{S}_{Zi}^{U} = -\left(\frac{\partial \mathbf{\Phi}_{Zi}}{\partial \mathbf{X}_{Zi}}\right) \frac{\partial \mathbf{\Phi}_{Zi}}{\partial \mathbf{U}_{Zi}}; \quad \mathbf{S}_{Zi}^{W} = -\left(\frac{\partial \mathbf{\Phi}_{Zi}}{\partial \mathbf{X}_{Zi}}\right) \frac{\partial \mathbf{\Phi}_{Zi}}{\partial \mathbf{W}_{Zi}}. \tag{10}$$

Выражения (10) по сути являются матрицами чувствительности, которые с учетом (3)...(5) определяются в виде:

$$\mathbf{S}_{Zi}^{U} = -\left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{pi}}{\partial I'_j} & \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{pi}}{\partial I''_j} \\ \hline \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{qi}}{\partial I'_j} & \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{qi}}{\partial I''_j} \end{array}\right]^{-1} \left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{pi}}{\partial P_{mi}} & \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{pi}}{\partial Q_{mi}} \\ \hline \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{qi}}{\partial P_{mi}} & \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{qi}}{\partial Q_{mi}} \end{array}\right]; \tag{11}$$

$$\mathbf{S}_{Zi}^{W} = -\left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{pi}}{\partial I'_j} & \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{pi}}{\partial I''_j} \\ \hline \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{qi}}{\partial I'_j} & \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{qi}}{\partial I''_j} \end{array}\right]^{-1} \left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{pi}}{\partial P_{ki}} & \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{pi}}{\partial Q_{ki}} \\ \hline \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{qi}}{\partial P_{ki}} & \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{qi}}{\partial Q_{ki}} \end{array}\right]. \tag{12}$$

Анализ выражений (11) и (12) показывает, что первые сомножители матриц чувствительности $\mathbf{S}_{Zi}^{U}$ и $\mathbf{S}_{Zi}^{W}$ являются обращенными матрицами Якоби, которые присутствуют в соответствующем рекуррентном выражении при решении системы нелинейных алгебраических уравнений отдельных подсистем методом Ньютона – Рафсона.

Учитывая также, что $\Delta \mathbf{X}_{Zi}$ определяется как

$$\Delta \mathbf{X}_{Zi} = \left[\begin{array}{c} \Delta I'_i \\ \hline \Delta I''_i \end{array}\right], \tag{13}$$

имеем

$$\left[\begin{array}{c} \Delta I'_i \\ \hline \Delta I''_i \end{array}\right] = -\left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{pi}}{\partial I'_j} & \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{pi}}{\partial I''_j} \\ \hline \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{qi}}{\partial I'_j} & \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{qi}}{\partial I''_j} \end{array}\right]^{-1} \left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{pi}}{\partial P_{mi}} & \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{pi}}{\partial Q_{mi}} \\ \hline \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{qi}}{\partial P_{mi}} & \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{qi}}{\partial Q_{mi}} \end{array}\right] -$$

$$-\left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{pi}}{\partial I'_j} & \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{pi}}{\partial I''_j} \\ \hline \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{qi}}{\partial I'_j} & \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{qi}}{\partial I''_j} \end{array}\right]^{-1} \left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{pi}}{\partial P_{ki}} & \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{pi}}{\partial Q_{ki}} \\ \hline \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{qi}}{\partial P_{ki}} & \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{qi}}{\partial Q_{ki}} \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} \Delta P_{mi} \\ \hline \Delta Q_{mi} \end{array}\right]. \tag{14}$$

Полученное выражение (14) является общим и показывает изменение искомых режимных параметров при вариации активных мощностей как станционных, так и нагрузочных узлов отдельных подсистем.

В случае, когда варьируются только активные и реактивные мощности нагрузочных узлов, выражение (14) принимает вид

$$\begin{bmatrix} \Delta I'_i \\ \hline \Delta I''_i \end{bmatrix} = -\left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{pi}}{\partial I'_j} & \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{pi}}{\partial I''_j} \\ \hline \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{qi}}{\partial I'_j} & \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{qi}}{\partial I''_j} \end{array}\right]^{-1} \left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{pi}}{\partial P_{\text{Н}j}} & \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{pi}}{\partial Q_{\text{Н}j}} \\ \hline \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{qi}}{\partial P_{\text{Н}j}} & \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{qi}}{\partial Q_{\text{Н}j}} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \Delta P_{\text{Н}j} \\ \hline \Delta Q_{\text{Н}j} \end{bmatrix}. \tag{15}$$

Выражение (15) приведено для общего случая, когда происходит изменение активных и реактивных выражений мощностей нагрузочных узлов во всех подсистемах.

В той подсистеме, в которой происходит изменение величин активных и реактивных мощностей нагрузочных узлов, необходимо пользоваться уравнением (15), а для остальных подсистем приемлемо рекуррентное выражение

$$\begin{bmatrix} I'_i \\ \hline I''_i \end{bmatrix}^{\text{И}+1} = \begin{bmatrix} I'_i \\ \hline I''_i \end{bmatrix} - \left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{pi}}{\partial I'_j} & \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{pi}}{\partial I''_j} \\ \hline \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{qi}}{\partial I'_j} & \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{qi}}{\partial I''_j} \end{array}\right]^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{\Phi}_{pi} \\ \hline \mathbf{\Phi}_{qi} \end{bmatrix},$$

где И – номер итерации; $i \neq j$.

Найдя приращение $\Delta \mathbf{X}_{Zi}$ с помощью (13), определяем режимные параметры для искомого установившегося режима

$$\mathbf{X}^{\text{Н}}_{Zi_1} = \mathbf{X}^{\text{Д}}_{Zi_1} + \Delta \mathbf{X}_{Zi_1}, \tag{16}$$

где $\mathbf{X}^{\text{Н}}_{Zi_1}$, $\mathbf{X}^{\text{Д}}_{Zi_1}$ – соответственно скорректированный и исходный векторы состояния.

В развернутой форме (16) можно представить в виде

$$\begin{bmatrix} I'_{i_1} \\ \hline I''_{i_1} \end{bmatrix}^{\text{Н}} = \begin{bmatrix} I'_{i_1} \\ \hline I''_{i_1} \end{bmatrix}^{\text{Д}} - \left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{pi}}{\partial I'_j} & \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{pi}}{\partial I''_j} \\ \hline \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{qi}}{\partial I'_j} & \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{qi}}{\partial I''_j} \end{array}\right]^{-1} \left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{pi}}{\partial P_{\text{Н}j}} & \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{pi}}{\partial Q_{\text{Н}j}} \\ \hline \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{qi}}{\partial P_{\text{Н}j}} & \dfrac{\partial \mathbf{\Phi}_{qi}}{\partial Q_{\text{Н}j}} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \Delta P_{\text{Н}j} \\ \hline \Delta Q_{\text{Н}j} \end{bmatrix}.$$

Имея новые численные значения составляющих комплексных токов первой подсистемы, можно определить $\dot{I}^{\text{Н}}_{j_1}$ и $U^{\text{Н}}_{\text{Б}i_1}$. Пользуясь первым уравнением системы (1), найти $\dot{U}^{\text{Н}}_{i_1}$.

Получив новое значение $U^{\text{Н}}_{\text{Б}i_2}$ и определив $\dot{I}_{j_2}$, с помощью второго уравнения системы (1) можно найти численное значение $U^{\text{Н}}_{i_2}$. Таким же образом вычислим $U^{\text{Н}}_{i_3}$, ..., $U^{\text{Н}}_{i_N}$.

Имея

$$\dot{\mathbf{U}}_i^{\text{Н}} = \left(\dot{U}_{i_1}^{\text{Н}}, \dot{U}_{i_2}^{\text{Н}}, \ldots, \dot{U}_{i_N}^{\text{Н}}\right),$$

можно определить

$$\dot{\mathbf{I}}_j^{\text{Н}} = \left(\dot{I}_{j_1}^{\text{Н}}, \dot{I}_{j_2}^{\text{Н}}, \ldots, \dot{I}_{j_N}^{H}\right).$$

В результате получается новый скорректированный установившийся режим исследуемой ЭЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хачатрян В. С., Суханов О. А. Диакоптика и задача определения обобщенных параметров больших энергосистем // Электричество. – 1973. – № 4. – С. 1–10.
2. Хачатрян В. С. Определение установившихся режимов больших электроэнергетических систем с применением метода Ньютона–Рафсона // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1974. – № 4. – С. 36–43.
3. Хачатрян В. С., Балабекян М. А. Автоматизация разбивки больших систем на радиально связанные оптимальные подсистемы // Электричество. – 1977. – № 9. – С. 15–20.
4. Веников В. А., Суханов Щ. А. Кибернетические модели электрических систем. – М.: Энергоиздат, 1982. – 328 с.
5. Гераскин О. Т., Селеннова Т. Г. Решение уравнений установившихся режимов больших ЭЭС в Y-диакоптической форме итерационным методом Ньютона – Рафсона на многопроцессорных ЭВМ // Энергетика... (Известия высш. учеб. заведений СССР). – 1994. – № 9–10. – С. 13–24.
6. Гераскин О. Т. Методы декомпозиции для расчета установившихся режимов больших электроэнергетических систем // Энергетика. Изв. РАН. – 1997. – № 6. – С. 11–20.
7. Хачатрян К. В., Бороян А. В. Новый метод коррекции установившегося режима электроэнергетической системы // Изв. НАН и ГИУА. – Сер. ТН. – 2002. – № 2. – С. 222–231.

Поступила 28.03.2003

УДК 537.2.212.226

ОСЛАБЛЕНИЕ «КРАЕВОГО ЭФФЕКТА» ЭЛЕКТРОДОВ НА КОНТАКТНОЙ ГРАНИЦЕ С ДИЭЛЕКТРИКОМ

Докт. техн. наук ШАХТАХТИНСКИЙ Т. И.

Азербайджанская государственная нефтяная академия

В высоковольтных электроизоляционных конструкциях для устранения «краевого эффекта» – возрастания напряженности поля на острых краях электродов – кромки электродов закругляются под определенным радиусом подобно электродам Роговского или Фелиси [1]. По технологическим соображениям это не всегда возможно, и электроды обычно снабжаются специальными тороидальными (или шаровидными) наконечниками, другими словами, участки большей кривизны покрываются слоем твердой