Изв. НАН и ГИУ Армении (сер. ТН), т. LI, № 3, 1998, с. 301 - 307.

УДК 621.31.1.001.24

ЭНЕРГЕТИКА

М.Г. ТАМРАЗЯН

ОБ ОДНОМ УПРОЩЕННОМ Y-Z-МЕТОДЕ РАСЧЕТА УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

[illegible]

Предлагается упрощенный метод решения систем нелинейных алгебраических уравнений Y-Z-формы ЭЭС. На основании многочисленных вычислительных экспериментов установлена весомость отдельных блоков матрицы Якоби. Рекомендуется структура, при которой обеспечивается упрощение обращения матрицы Якоби.

Библиогр.: 3 назв.

A simplified Y-Z - form method of simultaneous nonlinear algebraic equation solution for the electric power system is proposed. On the basis of numerous computer experiments the ponderability of Jacobi matrix separate blocks is established. A structure ensuring Jacobi matrix inversion simplification is recommended.

Ref. 3.

Вопросы решения систем нелинейных алгебраических уравнений гибридного типа с применением метода Ньютона-Рафсона освещены подробно в [1-3]. Несмотря на то, что метод Ньютона-Рафсона признан лучшим для решения как Y, Z, так и Y-Z-уравнений установившегося режима ввиду обеспечения квадратной сходимости, тем не менее обращение матрицы Якоби на каждой итерации нежелательно при решении численных задач.

Целью настоящей работы является упрощение вопроса обращения матрицы Якоби при решении Y-Z- гибридных нелинейных алгебраических уравнений установившихся режимов электроэнергетических систем (ЭЭС). Как известно, системы нелинейных алгебраических уравнений гибридной формы представляются в виде

$$\begin{cases} \Phi_{pm} = P_m - [P_{Бm} + \Psi_{pm}(U'_n, U''_n)] = 0, \\ \Phi_{qm} = Q_m - [Q_{Бm} + \Psi_{qm}(U'_n, U''_n)] = 0, \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} \Phi_{pk} = P_k - [P_{Бk} + \Psi_{pk}(I', U'')] = 0, \\ \Phi_{qk} = Q_k - [Q_{Бk} + \Psi_{qk}(I', U'')] = 0. \end{cases} \tag{2}$$

Рассмотрим случай, когда независимыми станционными узлами являются узлы типа P-Q. При этом рекуррентное выражение, вытекающее из метода Ньютона-Рафсона, представляется в виде

- для узлов с индексами m(n):

$$\begin{bmatrix} U'_m \\ --- \\ U''_m \end{bmatrix}^{u+1} = \begin{bmatrix} U'_m \\ --- \\ U''_m \end{bmatrix}^{u} - \begin{bmatrix} \dfrac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U'_n} & | & \dfrac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U''_n} \\ - & - & - \\ \dfrac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U'_n} & | & \dfrac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U''_n} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \Phi_{pm} \\ --- \\ \Phi_{qm} \end{bmatrix}; \qquad (3)$$

- для узлов с индексами k(ℓ):

$$\begin{bmatrix} I'_k \\ --- \\ I''_k \end{bmatrix}^{u+1} = \begin{bmatrix} I'_k \\ --- \\ I''_k \end{bmatrix}^{u} - \begin{bmatrix} \dfrac{\partial \Phi_{pk}}{\partial I'_\ell} & | & \dfrac{\partial \Phi_{pk}}{\partial I''_\ell} \\ - & - & - \\ \dfrac{\partial \Phi_{qk}}{\partial I'_\ell} & | & \dfrac{\partial \Phi_{qk}}{\partial I''_\ell} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \Phi_{pk} \\ --- \\ \Phi_{qk} \end{bmatrix}. \qquad (4)$$

Как видно из выражений (3) и (4), матрица Якоби представлена в виде четырехблочной матрицы.

Рассмотрим одну из возможных структур матриц Якоби рекуррентного выражения (3) для 10-узловой схемы [2]:

$$Я_U = \left[\begin{array}{cccc|} -10{,}7550 & 5{,}7554 & 0{,}7130 & 0{,}9543 \\ 5{,}7554 & -9{,}4976 & 1{,}1886 & 1{,}2458 \\ 0{,}7130 & 1{,}1886 & -9{,}2376 & 6{,}4609 \\ 0{,}9543 & 1{,}2458 & 6{,}4609 & -9{,}3457 \\ - & - & - & - \\ -19{,}0998 & 9{,}4954 & 1{,}3831 & 2{,}3496 \\ 9{,}4954 & -15{,}7824 & 2{,}0057 & 2{,}7024 \\ 1{,}3831 & 2{,}0057 & -15{,}2391 & 11{,}0448 \\ 2{,}3496 & 2{,}7024 & 11{,}0448 & -17{,}4102 \end{array}\right. \qquad (5)$$

$$\left.\begin{array}{cccc} -19{,}0998 & 9{,}4954 & 1{,}3831 & 2{,}3496 \\ 9{,}4954 & -15{,}7824 & 2{,}0057 & 2{,}7024 \\ 1{,}3831 & 2{,}0057 & -15{,}2391 & 11{,}0448 \\ 2{,}3496 & 2{,}7024 & 11{,}0448 & -17{,}4102 \\ - & - & - & - \\ -10{,}7550 & 5{,}7554 & 0{,}7130 & 0{,}9543 \\ 5{,}7554 & -9{,}4976 & 1{,}1886 & 1{,}2458 \\ 0{,}7130 & 1{,}1886 & -9{,}2376 & 6{,}4609 \\ 0{,}9543 & 1{,}2458 & 6{,}4609 & -9{,}3457 \end{array}\right]$$

Отдельные блоки рекуррентного выражения (4) определяются в виде

$$\frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial I'_r}=\begin{vmatrix} -214,7385 & -0,0107 & 0,1996 & -0,0112 & 0 \\ -0,0072 & -217,2623 & -0,0218 & 0,0111 & 0 \\ 0,1533 & -0,0420 & -215,6501 & -0,0681 & 0 \\ -0,0268 & -0,0253 & -0,0816 & -216,8732 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -216,6656 \end{vmatrix},$$

$$\frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial I''_r}=\begin{vmatrix} -1,0633 & -0,2585 & -1,5578 & -0,5743 & 0 \\ -0,1415 & 0,1370 & -0,3233 & -0,8094 & 0 \\ -0,4336 & -0,5412 & -0,5876 & -1,2033 & 0 \\ -0,5500 & -1,4158 & -0,3104 & -0,7096 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1,5962 \end{vmatrix}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial I'_r}=\begin{vmatrix} 7,5523 & 0,2585 & 1,5578 & 0,5743 & 0 \\ 0,1415 & 4,2357 & 0,3233 & 0,8094 & 0 \\ 0,4336 & 0,5412 & 0,9760 & 1,2033 & 0 \\ 0,5500 & 1,4158 & 0,3104 & 5,5777 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6,5605 \end{vmatrix},$$

$$\frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial I''_r}=\begin{vmatrix} 215,7058 & -0,0107 & 0,1996 & -0,0112 & 0 \\ -0,0072 & 217,3158 & -0,0218 & 0,0111 & 0 \\ 0,1533 & -0,0425 & 216,2459 & -0,0681 & 0 \\ -0,0268 & -0,0253 & -0,0816 & 216,8991 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 216,8593 \end{vmatrix}.$$

После обращения матрицы Якоби рекуррентного выражения (3) получаем

$$Я_U^{-1}=\begin{bmatrix} fpu' & fpu'' \\ fqu' & fqu'' \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Для отдельных блоков имеем следующие численные значения:

$$fpu'=\begin{vmatrix} -0,036305 & -0,026199 & -0,018740 & -0,019338 \\ -0,026189 & -0,048515 & -0,023633 & -0,024063 \\ -0,018717 & -0,023560 & -0,053588 & -0,035359 \\ -0,019127 & -0,023772 & -0,034993 & 0,047316 \end{vmatrix},$$

$$
\mathrm{fpu}'' = \begin{vmatrix} -0{,}085278 & -0{,}068144 & -0{,}057581 & -0{,}05815 \\ -0{,}067763 & -0{,}107542 & -0{,}069326 & -0{,}069499 \\ -0{,}057607 & -0{,}069775 & -0{,}140005 & -0{,}109348 \\ -0{,}058455 & -0{,}070274 & -0{,}109886 & -0{,}134209 \end{vmatrix}, \qquad (8)
$$

$$
\mathrm{fqu}' = \begin{vmatrix} -0{,}093213 & -0{,}076763 & -0{,}069135 & -0{,}09225 \\ -0{,}077024 & -0{,}18138 & -0{,}083340 & -0{,}082910 \\ -0{,}068979 & -0{,}082833 & -0{,}160724 & -0{,}128523 \\ -0068828 & -0{,}082124 & -0{,}128036 & -0{,}151677 \end{vmatrix},
$$

$$
\mathrm{fqu}'' = \begin{vmatrix} 0{,}052430 & 0{,}044514 & 0{,}040478 & 0{,}039949 \\ 0{,}044301 & 0{,}070519 & 0{,}049322 & 0{,}048371 \\ 0{,}040546 & 0{,}049643 & 0{,}090799 & 0{,}069343 \\ 0{,}040149 & 0{,}048843 & 0{,}069627 & 0{,}080186 \end{vmatrix}.
$$

После обращения матрицы Якоби рекуррентного выражения (4) получаем

$$
Я_r^{-1} = \begin{bmatrix} \mathrm{fpi}' & \mathrm{fpi}'' \\ \mathrm{fqi}' & \mathrm{fqi}'' \end{bmatrix}. \qquad (9)
$$

Для отдельных блоков имеем следующие численные значения:

$$
\mathrm{fpi}' = \begin{vmatrix} -0{,}004658 & -0{,}000000 & -0{,}000005 & -0{,}000000 & 0{,}000000 \\ 0{,}000000 & -0{,}004603 & 0{,}000000 & -0{,}000001 & 0{,}000000 \\ -0{,}000005 & 0{,}000000 & -0{,}004638 & 0{,}000001 & 0{,}000000 \\ 0{,}000000 & 0{,}000000 & 0{,}000001 & -0{,}004612 & 0{,}000000 \\ 0{,}000000 & 0{,}000000 & 0{,}000000 & 0{,}000000 & -0{,}004616 \end{vmatrix},
$$

$$
\mathrm{fpi}'' = \begin{vmatrix} -0{,}000023 & -0{,}000006 & -0{,}000034 & -0{,}000012 & 0{,}000000 \\ -0{,}000003 & 0{,}000003 & -0{,}000007 & -0{,}000017 & 0{,}000000 \\ -0{,}000031 & -0{,}000012 & -0{,}000013 & -0{,}000026 & 0{,}000000 \\ 0{,}000012 & -0{,}000030 & -0{,}000007 & -0{,}000015 & 0{,}000000 \\ 0{,}000000 & 0{,}000000 & 0{,}000000 & 0{,}000000 & -0{,}000039 \end{vmatrix}. \qquad (10)
$$

$$fqi' = \begin{vmatrix} -0{,}000163 & 0{,}000006 & 0{,}000034 & 0{,}000012 & 0{,}000000 \\ 0{,}000000 & 0{,}000090 & -0{,}000007 & 0{,}000017 & 0{,}000000 \\ 0{,}000031 & 0{,}000012 & 0{,}000128 & 0{,}000026 & 0{,}000000 \\ 0{,}000012 & 0{,}000030 & 0{,}000007 & 0{,}000119 & 0{,}000000 \\ 0{,}000000 & 0{,}000000 & 0{,}000000 & 0{,}000000 & -0{,}000140 \end{vmatrix},$$

$$fqi'' = \begin{vmatrix} 0{,}004637 & 0{,}000001 & -0{,}000003 & 0{,}000001 & 0{,}000000 \\ 0{,}000000 & 0{,}004602 & 0{,}000001 & 0{,}000000 & 0{,}000000 \\ -0{,}000002 & 0{,}000001 & 0{,}004628 & 0{,}000002 & 0{,}000000 \\ 0{,}000001 & 0{,}000001 & 0{,}000002 & 0{,}004611 & 0{,}000000 \\ 0{,}000000 & 0{,}000000 & 0{,}000000 & 0{,}000000 & 0{,}004612 \end{vmatrix}.$$

Как видно, диагональные элементы матрицы Якоби в (10) значительно больше остальных, что позволяет приближенно рассчитать матрицу Якоби с помощью диагональных элементов, т.е. матрица является блочно-диагональной, где каждый блок представлен в виде квадратной матрицы, а недиагональные элементы - нули.

Таким образом, выражение (4) принимает вид

$$\begin{bmatrix} I'_k \\ --- \\ I''_k \end{bmatrix}^{n+1} = \begin{bmatrix} I'_k \\ --- \\ I''_k \end{bmatrix}^{n} - \begin{bmatrix} \dfrac{\partial \Phi_{pk}}{\partial I'_\ell} & | & 0 \\ - & - & - \\ 0 & | & \dfrac{\partial \Phi_{qk}}{\partial I''_\ell} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Phi_{pk} \\ --- \\ \Phi_{qk} \end{bmatrix}, \qquad (11)$$

Частные производные, входящие в рекуррентное выражение (11), определяются с помощью выражений:

- при одинаковых индексах, т.е. когда $k=\ell$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial I'_k} &= -\left[U'_{Бk} + \sum_{\ell=Г+1}^{M} D_{k\ell} + (R_{kk} I'_k + X_{kk} I''_k) \right], \\ \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial I''_k} &= -\left[-U'_{Бk} - \sum_{\ell=Г+1}^{M} D_{k\ell} + (R_{kk} I'_k + X_{kk} I''_k) \right], \end{aligned} \qquad (12)$$

где

$$U'_{Бk} = (1 - \sum_{n=1}^{Г} C'_{kn}) U_n + \sum_{n=1}^{Г} (C'_{kn} U'_n - C''_{kn} U''_n), \qquad (13)$$

$$D_{k\ell} = R_{k\ell} I'_\ell - X_{k\ell} I''_\ell; \qquad (14)$$

- при разных индексах, т.е. когда $k \neq \ell$:

$$\frac{\partial \Phi_{pk}}{I'_i} = -(R_{ki} I'_k + X_{ki} I''_k),$$
$$\frac{\partial \Phi_{qk}}{I''_i} = -(R_{ki} I'_k + X_{ki} I''_k). \tag{15}$$

Рекурр нтное выражение (3) остается неизменным, а частные производные, входящие в (3), определяются с помощью следующих выражений:

- при одинаковых индексах, т.е. когда m=n:

$$\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U'_m} = -\left[I'_{Бm} + \sum_{n=1}^{Г} H_{nm} + (g_{mm} U'_m + b_{mm} U''_m) \right],$$
$$\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U''_m} = -\left[I''_{Бm} + \sum_{n=1}^{Г} K_{nm} + (g_{mm} U''_m - b_{mm} U'_m) \right],$$
$$\frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U'_m} = -\left[-I''_{Бm} - \sum_{n=1}^{Г} K_{nm} + (g_{mm} U''_m - b_{mm} U'_m) \right], \tag{16}$$
$$\frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U''_m} = -\left[I'_{Бm} + \sum_{n=1}^{Г} H_{nm} - (g_{mm} U'_m + b_{mm} U''_m) \right],$$

где

$$H_{nm} = g_{nm} U'_n - b_{nm} U''_n, \quad K_{nm} = g_{mn} U''_n + b_{mn} U'_n. \tag{17}$$

С другой стороны,

$$I'_{Бm} = -\sum_{n=1}^{Г} g_{mn} U_n + \sum_{k=Г+1}^{M} (a'_{mk} I'_k - a''_{mk} I''_k),$$
$$I''_{Бm} = -\sum_{n=1}^{Г} b_{mn} U_n + \sum_{k=Г+1}^{M} (a''_{mk} I''_k - a'_{mk} I'_k); \tag{18}$$

- при разных индексах, т.е когда $m \neq n$:

$$\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U'_n} = -(g_{mm} U'_m + b_{mm} U''_m), \quad \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U''_n} = -(g_{mm} U''_m - b_{mm} U'_m). \tag{19}$$

Частные производные имеют вид

$$\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U'_n} = -\frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U''_n}, \quad \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U''_n} = \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U'_n}. \tag{20}$$

Используя указанные свойства, можно намного уменьшить объем вычислительных работ, требуемых для обращения матрицы Якоби, входящей в выражение (3). Эксперименты показали, что объем вычислительных работ при применении рекуррентных выражений (3) и (11) уменьшается, что впервые было обнаружено при решении уравнений установившегося режима при Y-Z-форме задания состояния сети. Аналогичное явление было обнаружено при 22 и 46 узловых схемах.

Выявленные численные особенности матриц Якоби, входящих в (11), обеспечивают уменьшение объема вычислительных работ на 20...25% в зависимости от числа исследуемой ЭЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Хачатрян В.С., Этмекчян Э.А.** Метод установившегося режима электрической системы // Изв. вузов. Энергетика. - 1989. - №5. - С. 12-18.
2. **Хачатрян В.С., Этмекчян Э.А.** Развитие гибридного метода расчета установившегося режима электрической системы // Электричество. - 1991. - № 1. - С. 6-13.
3. **Тамразян М.Г.** Об одном Y-Z-методе расчета установившегося режима электроэнергетической системы // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 1996. - Т. 49, № 3. - С. 138-142.

ГИУА

22.04.1998

Изв. НАН и ГИУ Армении (сер. ТН), т. LI, № 3, 1998, с. 307 - 314.

УДК 621.039.51

ЭНЕРГЕТИКА

С.В. ШАХВЕРДЯН, А.С. ШАХВЕРДЯН

МИНИМИЗАЦИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ НЕЙТРОНОВ КСЕНОНОМ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРАХ

Օպտիմալ կառավարման տեսության հիման վրա ստացվել են ռեակտորների աշխատաշրջանի երկարացման խնդրի օպտիմալության անհրաժեշտ պայմանները: Բերված են թվային փորձարկումների արդյունքները:

На основе теории оптимального управления получены новые необходимые условия оптимальности для задачи выбора продолжительности продления кампании и режима работы энергетического реактора. Приведены результаты численных экспериментов, показывающие значительный эффект оптимизации режима реактора, достигающий 5...6%. Сравнение режимов проведено при постоянной выработке электроэнергии.

Ил. 2. Табл. 2. Библиогр.: 6 назв.

New optimal conditions necessary for the choice of a campaign extension durability problem and nuclear power reactor mode of operation are obtained on the basis of the optimal control theory. The results of numerical experiments showing a considerable effect of reactor modes running into 5...6% are given. Mode comparison is performed at constant electric power production.

Ill. 2. Tables 2. Ref. 6.

Проблема продления кампании водо-водяных реакторов АЭС за счет уменьшения влияния ксенона является многогранной, весьма сложной и вместе с тем исключительно актуальной. Несмотря на это, в настоящее время проблема в целом (комплексно) не решена. Существующие работы, как правило, посвящены отдельным ее аспектам [1-4].

Исходя из анализа задачи и существующих работ оказалось целесообразным использовать методы теории оптимального управления для получения необходимых условий оптимальности и на их основе построить вычислительные алгоритмы, позволяющие дать ответ на вопросы: насколько снизить мощность реактора, по какому