ЛИТЕРАТУРА

1. **Фурунжиев Р.И., Останин А.Н.** Управление колебаниями многоопорных машин. - М.: Машиностроение, 1984. - 206 с.
2. **Спиридонов А.А.** Планирование эксперимента при исследовании процессов. - М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
3. ГОСТ 7057-81. Тракторы сельскохозяйственные. Методы испытания. - М., 1981. - 25 с.

Армсельхозинститут 10.06.94

Изв. НАН и ГИУ Армении (сер. ТН), т. XLIX, № 1, 1996, с. 6-11.

УДК 621.311.001 **ЭНЕРГЕТИКА**

Р.А. БАБАЯН

РАСЧЕТ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИТЕМЫ ПРИ P–Q-ТИПЕ СТАНЦИОННЫХ УЗЛОВ

Առաջարկվում է էլեկտրաէներգետիկական համակարգերի կայունացված ռեժիմի հաշվարկի մեթոդիկա, երբ ցանցի վիճակը տրվում է Z–Y տեսքով: Ի տարբերություն գոյություն ունեցող մեթոդների, առաջարկվում է շրջել էլեկտրական կայանների Y վանդակի մատրիցը, որի դեպքում խիստ նվազում է հաշվողական ծավալը:

Предлагается метод расчета установившегося режима электроэнергетической системы при Z–Y форме задания состояния сети. В отличие от существующих методов предлагается обращение Y-блока матрицы станционных узлов, число которых в ЭЭС намного меньше, чем число нагрузочных узлов, что позволяет значительно уменьшить объем вычислительных работ.

Библиогр.: 2 назв.

A method of calculation for steady-state conditions of an electrical power system having Z–Y units of circuit state is proposed. Apart from the existing methods a Y-unit matrix inversion of the stationary units is proposed, the number of which is much less in an electrical power system than the number of loading units, and this permits to decrease considerably the volume of computational work.

Ref. 2.

Рассматривается электроэнергетическая система (ЭЭС), состоящая из (Г-1) станционных и Н нагрузочных узлов. После выбора одного из станционных узлов в качестве базисного ЭЭС будет состоять из (Г+Н) независимых узлов. Как известно, уравнение состояния ЭЭС в Y-форме при матричной записи имеет следующий вид:

$$\dot{I} = Y\dot{U}, \tag{1}$$

где $\dot{I}$ — многомерный вектор комплексных токов (Г+Н) независимых узлов; $\dot{U}$ — многомерный вектор комплексных напряжений (Г+Н) независимых узлов относительно базисного узла; Y-неособенная квадратная матрица узловых комплексных проводимостей порядка (Г+Н). После выбора систем индексов для станционных $m(n)=0,\ 1,\ 2,\ \ldots,\ Г$ и нагрузочных узлов $k(\ell)=Г+1,\ Г+2,\ \ldots,\ Г+Н$ и выбора станционного узла с индексом "0" в качестве базисного матричное уравнение (1) в блочно-матричной форме принимает вид

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_n \\ \dot{I}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{mn} & Y_{m\ell} \\ Y_{kn} & Y_{k\ell} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{U}_{m0} \\ \dot{U}_{\ell 0} \end{bmatrix}. \qquad (2)$$

После определенного преобразования матричное уравнение (2) можно представить в виде

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{m0} \\ \dot{I}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{mn}^{-1} & -Y_{mn}^{-1} Y_{n\ell} \\ Y_{kn} Y_{mn}^{-1} & Y_{k\ell} - Y_{kn} Y_{mn}^{-1} Y_{n\ell} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{I}_n \\ \dot{U}_{\ell 0} \end{bmatrix}. \qquad (3)$$

Полученное матричное уравнение (3) называется гибридным уравнением, а квадратная матрица постоянных отличается от заранее известных форм, используемых в [1]. Предлагаемая форма представления гибридной матрицы является результатом того, что станционные узлы являются узлами $P-Q$. Известно, что в ЭЭС, как обычно, число станционных узлов намного меньше, чем число нагрузочных узлов. Поэтому целесообразно обращение Y_{mn}-подматрицы станционных узлов, чем $Y_{k\ell}$-подматрицы нагрузочных узлов.

Представим матричное уравнение (3) в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{m0} \\ \dot{I}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{mn} & H_{m\ell} \\ H_{kn} & Y_{k\ell} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{I}_n \\ \dot{U}_{\ell 0} \end{bmatrix}, \qquad (4)$$

где $Z_{mn} = Y_{mn}^{-1}$, $Y_{k\ell} = Y_{k\ell} - Y_{kn} Z_{mn} Y_{n\ell}$, $H_{m\ell} = -Z_{mn} Y_{n\ell}$, $H_{kn} = Y_{kn} Z_{mn}$.

Представим матричное уравнение (4) в алгебраической форме:

$$\dot{U}_{m0} = \sum_{n=1}^{Г} Z_{mn} \dot{I}_n + \sum_{\ell=Г+1}^{Г+Н} H_{m\ell} \dot{U}_{\ell 0}, \qquad (5)$$

$$\dot{I}_k = \sum_{n=1}^{Г} H_{kn} \dot{I}_n + \sum_{\ell=Г+1}^{Г+Н} Y_{k\ell} \dot{U}_{\ell 0}. \qquad (6)$$

Поскольку $\dot{U}_{m0} = \dot{U}_m - \dot{U}_0$, $\dot{U}_{\ell 0} = \dot{U}_\ell - \dot{U}_0$, то уравнения (5) и (6) после преобразований принимают следующий вид:

$$\dot{U}_m = \dot{U}_{mБ} + \sum_{n=1}^{Г} Z_{mn} \dot{I}_n + \sum_{\ell=Г+1}^{Г+Н} H_{m\ell} \dot{U}_\ell, \qquad (7)$$

$$\dot{I}_k = \dot{I}_{kБ} + \sum_{n=1}^{Г} H_{kn} \dot{I}_n + \sum_{\ell=Г+1}^{Г+Н} Y_{k\ell} \dot{U}_\ell, \qquad (8)$$

где $\dot{U}_{mБ} = (1 - \sum_{\ell=Г+1}^{Г+Н} H_{m\ell}) \dot{U}_0$.

Как независимые станционные узлы, так и нагрузочные узлы являются узлами типа $P-Q$, поэтому системы уравнений (7) и (8) также необходимо выразить через активные и реактивные мощности. Умножая обе стороны уравнения (7) на $\hat{\dot{I}}_m$ и обе стороны уравнения (8) на $\hat{\dot{U}}_k$, получаем

$$P_m + jQ_m = \dot{U}_{mБ}\hat{\dot{I}}_m + \sum_{n=1}^{\text{Г}} \hat{\dot{I}}_m Z_{mn} \dot{I}_n + \sum_{\ell=\text{Г}+1}^{\text{Г}+\text{Н}} \hat{\dot{I}}_m H_{m\ell} \dot{U}_\ell , \tag{9}$$

$$P_k - jQ_k = \hat{\dot{U}}_k \dot{I}_{kБ} + \sum_{n=1}^{\text{Г}} \hat{\dot{U}}_k H_{kn} \dot{I}_n + \sum_{\ell=\text{Г}+1}^{\text{Г}+\text{Н}} \hat{\dot{U}}_k Y_{k\ell} \dot{U}_\ell . \tag{10}$$

Представим системы уравнений (9) и (10) в виде

$$P_m + jQ_m = \dot{S}_{mБ} + \sum_{n=1}^{\text{Г}} \hat{\dot{I}}_m Z_{mn} \dot{I}_n , \tag{11}$$

$$P_k - jQ_k = \hat{S}_{kБ} + \sum_{\ell=\text{Г}+1}^{\text{Г}+\text{Н}} \hat{\dot{U}}_k Y_{k\ell} \dot{U}_\ell . \tag{12}$$

В (11) и (12) были приняты следующие обозначения:

$$\dot{S}_{mБ} = \dot{U}_{mБ}\hat{\dot{I}}_m + \sum_{\ell=\text{Г}+1}^{\text{Г}+\text{Н}} \hat{\dot{I}}_m H_{m\ell} \dot{U}_\ell , \quad \hat{S}_{kБ} = \hat{\dot{U}}_k \dot{I}_{kБ} + \sum_{n=1}^{\text{Г}} \hat{\dot{U}}_k H_{kn} \dot{I}_n .$$

Разлагая уравнение (11) на действительные и мнимые составляющие, получаем

$$P_m = P_{mБ} + \sum_{n=1}^{\text{Г}} [R_{mn}(I'_m I'_n + I''_m I''_n) + x_{mn}(I''_m I'_n - I'_m I''_n)] , \tag{13}$$

$$Q_m = Q_{mБ} + \sum_{n=1}^{\text{Г}} [R_{mn}(I'_m I''_n - I''_m I'_n) + x_{mn}(I'_m I'_n + I''_m I''_n)] . \tag{14}$$

Здесь

$$P_{mБ} = U_0 I'_m - \sum_{\ell=\text{Г}+1}^{\text{Г}+\text{Н}} (H'_{m\ell} I'_m + H''_{m\ell} I''_m) U_0 + \sum_{\ell=\text{Г}+1}^{\text{Г}+\text{Н}} (I'_m K'_{m\ell} + I''_m K''_{m\ell}) ,$$

$$Q_{mБ} = -U_0 I''_m - \sum_{\ell=\text{Г}+1}^{\text{Г}+\text{Н}} (H''_{m\ell} I'_m - H'_{m\ell} I''_m) U_0 + \sum_{\ell=\text{Г}+1}^{\text{Г}+\text{Н}} (I'_m K''_{m\ell} - I''_m K'_{m\ell}) ,$$

где $K'_{m\ell} = (H'_{m\ell} U'_\ell - H''_{m\ell} U''_\ell)$, $K''_{m\ell} = (H'_{m\ell} U''_\ell + H''_{m\ell} U'_\ell)$.

Аналогично для (12) получаем

$$P_k = P_{kБ} + \sum_{\ell=\text{Г}+1}^{\text{Г}+\text{Н}} [g_{k\ell}(U'_k U'_\ell + U''_k U''_\ell) + b_{k\ell}(U''_k U'_\ell - U'_k U''_\ell)] , \tag{15}$$

$$Q_k = Q_{kБ} + \sum_{\ell=\text{Г}+1}^{\text{Г}+\text{Н}} [g_{k\ell}(U''_k U'_\ell - U'_k U''_\ell) - b_{k\ell}(U'_k U'_\ell + U''_k U''_\ell)] , \tag{16}$$

где

$$P_{kБ} = -\sum_{\ell=\text{Г}+1}^{\text{Г}+\text{Н}} (g_{k\ell} U'_k - b_{k\ell} U''_k) + \sum_{n=1}^{\text{Г}} (U'_k L'_{kn} + U''_k L''_{kn}) ,$$

$$Q_{kБ} = \sum_{\ell=\text{Г}+1}^{\text{Г}+\text{Н}} (b_{k\ell} U'_k + g_{k\ell} U''_k) U_0 + \sum_{n=1}^{\text{Г}} (U''_k L'_{kn} - U'_k L''_{kn}) .$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$L'_{k,n} = H'_{k,n} I'_n - H''_{k,n} I''_n, \quad L''_{k,n} = H'_{k,n} I''_n + H''_{k,n} I'_n.$$

В результате получены две системы нелинейных алгебраических уравнений (13), (14) и (15), (16), которые необходимо решить итерационным методом Ньютона-Рафсона. Для этого целесообразно эти системы представить в следующем виде:

$$\begin{cases} F_{pm}(I'_m,\ I''_m) = P_m - [P_{mБ} + f_{pm}(I'_m,\ I''_m)] = 0, \\ F_{qm}(I'_m,\ I''_m) = Q_m - [Q_{mБ} + f_{qm}(I'_m,\ I''_m)] = 0, \end{cases} \tag{17}$$

$$\begin{cases} F_{pk}(U'_k,\ U''_k) = P_k - [P_{kБ} + f_{pk}(U'_k,\ U''_k)] = 0, \\ F_{qk}(U'_k,\ I''_k) = Q_k - [Q_{kБ} + f_{qk}(U'_k,\ U''_k)] = 0. \end{cases} \tag{18}$$

В (17) и (18) приняты следующие обозначения:

$$\begin{cases} f_{pm}(I'_m,\ I''_m) = \sum\limits_{n=1}^{\Gamma} [R_{mn}(I'_m I'_n + I''_m I''_n) + x_{mn}(I''_m I'_n - I'_m I''_n)], \\ f_{qm}(I'_m,\ I''_m) = \sum\limits_{n=1}^{\Gamma} [R_{mn}(I'_m I''_n + I''_m I'_n) + x_{mn}(I'_m I'_n + I''_m I''_n)]. \end{cases} \tag{19}$$

$$\begin{cases} f_{pk}(U'_k,\ U''_k) = \sum\limits_{\ell=\Gamma+1}^{\Gamma+B} [g_{k\ell}(U'_k U'_\ell + U''_k U''_\ell) + b_{k\ell}(U''_k U'_\ell - U'_k U''_\ell)], \\ f_{qk}(U'_k,\ U''_k) = \sum\limits_{\ell=\Gamma+1}^{\Gamma+B} [g_{k\ell}(U''_k U'_\ell - U'_k U''_\ell) - b_{k\ell}(U'_k U'_\ell + U''_k U''_\ell)]. \end{cases} \tag{20}$$

Более компактно системы уравнений (17) и (18) можно представить в виде

$$\begin{cases} F_{pm}(I'_m,\ I''_m) = 0, \\ F_{qm}(I'_m,\ I''_m) = 0, \end{cases} \quad \begin{cases} F_{pk}(U'_k,\ U''_k) = 0, \\ F_{qk}(U'_k,\ U''_k) = 0. \end{cases} \tag{21}$$

Задача заключается в совместном решении систем уравнений (21), которые взаимно связаны, и это скрыто в выражениях $P_{mБ}$, $Q_{mБ}$, $P_{kБ}$, $Q_{kБ}$. Пользуясь этим обстоятельством, необходимо решить указанные два типа систем уравнений на основе метода Ньютона-Рафсона.

Рекуррентные выражения для решения систем уравнений (21), вытекающие из метода Ньютона-Рафсона, имеют вид

$$\begin{bmatrix} I'_m \\ I''_m \end{bmatrix}^{i+1} = \begin{bmatrix} I'_m \\ I''_m \end{bmatrix}^{i} - \begin{bmatrix} \partial F_{pm}/\partial I'_n & \partial F_{pm}/\partial I''_n \\ \partial F_{qm}/\partial I'_n & \partial F_{qm}/\partial I''_n \end{bmatrix}_i^{-1} \times \begin{bmatrix} F_{pm} \\ F_{qm} \end{bmatrix}_i, \tag{22}$$

$$\begin{bmatrix} U'_k \\ U''_k \end{bmatrix}^{i+1} = \begin{bmatrix} U'_k \\ U''_k \end{bmatrix}^{i} - \begin{bmatrix} \partial F_{pk}/\partial U'_\ell & \partial F_{pk}/\partial U''_\ell \\ \partial F_{qk}/\partial U'_\ell & \partial F_{qk}/\partial U''_\ell \end{bmatrix}_i^{-1} \times \begin{bmatrix} F_{pk} \\ F_{qk} \end{bmatrix}_i, \tag{23}$$

где i — номер итерации.

Частные производные, входящие в якобианы рекуррентных выражений (22) и (23), определяются на основании вышеполученных систем уравнений. Частные производные, входящие в матрицу Якоби выражения (22), определяются:

- при одинаковых индексах, т.е. когда

$$\partial F_{pm} / \partial I'_m = -\left[\partial P_{mБ} / \partial I'_m + \sum_{n=1}^{\Gamma} (R_{mn} I'_n - x_{mn} I''_n) \right], \tag{24}$$

$$\partial F_{pm} / \partial I''_m = -\left[\partial P_{mБ} / \partial I''_m + \sum_{n=1}^{\Gamma} (R_{mn} I''_n - x_{mn} I'_n) \right], \tag{25}$$

$$\partial F_{qm} / \partial I'_m = -\left[\partial Q_{mБ} / \partial I'_m + \sum_{n=1}^{\Gamma} (R_{mn} I''_n + x_{mn} I'_n) \right], \tag{26}$$

$$\partial F_{qm} / \partial I''_m = -\left[\partial Q_{mБ} / \partial I''_m - \sum_{n=1}^{\Gamma} (R_{mn} I'_n - x_{mn} I''_n) \right], \tag{27}$$

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

$$\partial F_{pn} / \partial I'_n = -(R_{mn} I'_m + x_{mn} I''_m), \tag{28}$$

$$\partial F_{pn} / \partial I''_n = -(R_{mn} I''_m - x_{mn} I'_m), \tag{29}$$

$$\partial F_{qn} / \partial I'_n = -(-R_{mn} I''_m + x_{mn} I'_m), \tag{30}$$

$$\partial F_{qn} / \partial I''_n = -(R_{mn} I'_m + x_{mn} I''_m). \tag{31}$$

Частные производные, входящие в матрицу Якоби рекуррентного выражения (23), определяются с помощью нижеприведенных выражений:

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

$$\partial F_{pk} / \partial U'_k = -\left[\partial P_{kБ} / \partial U'_k + \sum_{l=\Gamma+1}^{\Gamma+H} (g_{kl} U'_l - b_{kl} U''_l) \right], \tag{32}$$

$$\partial F_{pk} / \partial U''_k = -\left[\partial P_{kБ} / \partial U''_k + \sum_{l=\Gamma+1}^{\Gamma+H} (g_{kl} U''_l + b_{kl} U'_l) \right], \tag{33}$$

$$\partial F_{qk} / \partial U'_k = -\left[\partial Q_{kБ} / \partial U'_k + \sum_{l=\Gamma+1}^{\Gamma+H} (-g_{kl} U''_l - b_{kl} U'_l) \right], \tag{34}$$

$$\partial F_{qk} / \partial U''_k = -\left[\partial Q_{kБ} / \partial U''_k + \sum_{l=\Gamma+1}^{\Gamma+H} (g_{kl} U'_l - b_{kl} U''_l) \right], \tag{35}$$

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

$$\partial F_{pl} / \partial U'_l = -(g_{kl} U'_k + b_{kl} U''_k), \tag{36}$$

$$\partial F_{pl} / \partial U''_l = -(g_{kl} U''_k - b_{kl} U'_k), \tag{37}$$

$$\partial F_{ql} / \partial U'_l = -(g_{kl} U''_k - b_{kl} U'_k), \tag{38}$$

$$\partial F_{ql} / \partial U''_l = -(-g_{kl} U'_k - b_{kl} U''_k). \tag{39}$$

Имея аналитические выражения частных производных, входящих в матрицы Якоби рекуррентных выражений (22) и (23), можно решить практические задачи.

Количественное и качественное исследования показали, что при изменении режимов величины $P_{mБ}$, $Q_{mБ}$, а также $P_{kБ}$ и $Q_{kБ}$ изменяются незначительно. В силу этого можем написать, что

$$\partial P_{mБ} / \partial I'_m = \partial P_{mБ} / \partial I''_m = 0, \quad \partial Q_{mБ} / \partial I'_m = \partial Q_{mБ} / \partial I''_m = 0$$

При этом выражения (24) - (27) и (32) - (35) принимают следующий вид:

$$\partial F_{pm}/\partial I'_m=-\left[\sum_{n=1}^{\Gamma}(R_{mn}I'_n-x_{mn}I''_n)\right],\ \partial F_{pm}/\partial I''_m=-\left[\sum_{n=1}^{\Gamma}(R_{mn}I''_n+x_{mn}I'_n)\right],$$

$$\partial F_{qm}/\partial I'_m=-\left[\sum_{n=1}^{\Gamma}(R_{mn}I''_n+x_{mn}I'_n)\right],\ \partial F_{qm}/\partial I''_m=-\left[-\sum_{n=1}^{\Gamma}(R_{mn}I'_n-x_{mn}I''_n)\right],$$

$$\partial F_{pk}/\partial U'_k=-\left[\sum_{\ell=\Gamma+1}^{\Gamma+Н}(g_{k\ell}U'_\ell-b_{k\ell}U''_\ell)\right],\ \partial F_{pk}/\partial U''_k=-\left[\sum_{\ell=\Gamma+1}^{\Gamma+Н}(g_{k\ell}U''_\ell-b_{k\ell}U'_\ell)\right],$$

$$\partial F_{qk}/\partial U'_k=-\left[-\sum_{\ell=\Gamma+1}^{\Gamma+Н}(g_{k\ell}U''_\ell+b_{k\ell}U'_\ell)\right],\ \partial F_{qk}/\partial U''_k=-\left[\sum_{\ell=\Gamma+1}^{\Gamma+Н}(g_{k\ell}U'_\ell-b_{k\ell}U''_\ell)\right]$$

Данное обстоятельство обеспечивает уменьшение большого объема вычислений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Хачатрян В.С., Этмекчян Э.А.** Развитие гибридного метода расчета установившегося режима // Электричество. - 1991. - № 1. - С. 6 - 13.
2. **Хачатрян В.С.** Об одном методе решения системы нелинейных алгебраических уравнений специальной структуры большой размерности // ЖВММФ АН СССР. - 1079. - № 1. - С. 7-18.

ГИУА 10 [illegible] 1995

Изв. НАН и ГИУ Армении (сер. ТН), т. XLIX, № 1, 1996, с. 11-16

УДК 621.311.1.001.24 ЭНЕРГЕТИКА

Г.А. БАДАЛЯН

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ Z-МАТРИЦЫ ОБОБЩЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Առաջարկվում է նոր քայլային մեթոդ Z ընդհանրացված պարամետրերի մատրիցի կառուցման համար, որը Y-ընդհանրացված պարամետրերի մատրիցի շրջման անուղղակի մեթոդ է հիմնված էլեկտրական համակարգերի առանձնահատկությունների վրա

Предлагается новый поэтапный метод построения обобщенных параметров электрических систем, который является косвенным методом обращения Y-матрицы обобщенных параметров электрических систем и основывается на их индивидуальных свойствах.

Табл. 4. Библиогр.: 3 назв.