

В. С. ХАЧАТРЯН

## ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ РАСЧЕТА УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ БОЛЬШИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рассматривается энергосистема, состоящая из  $M+1$  узловых точек, каждый узел которой характеризуется четырьмя режимными параметрами: активной и реактивной мощностями, модулем и аргументом напряжения. В зависимости от типа заданной исходной информации узлы классифицируются:

а) базисный (балансирующий) узел, для которого задаются модуль и аргумент напряжения и необходимо определить активную и реактивную мощности;

б) стационарный узел, для которого задаются активная мощность и модуль напряжения и необходимо определить реактивную мощность и аргумент напряжения;

в) нагрузочный узел, для которого задаются активная и реактивная мощности и необходимо определить аргумент и модуль комплексного напряжения.

Задача заключается в определении вышеуказанных неизвестных параметров путем решения системы нелинейных алгебраических уравнений установившихся режимов, построенных на основе  $Z$  обобщенных параметров сети [1-4].

$$\dot{U}_i = \dot{U}_b + Z_{ij} \cdot I_j, \quad (1)$$

где  $\dot{U}_i$  и  $I_j$  — многомерные векторы узловых комплексных напряжений и токов,  $\dot{U}_b$  — напряжение базисного узла, а  $Z_{ij}$  — матрица обобщенных параметров. Исследование показало, что, с точки зрения быстроты сходимости, для решения системы (1) необходимо пользоваться методом Ньютона-Рафсона. Однако, из-за требования большой памяти при построении матрицы Якоби, до настоящего времени для решения (1) не был применен метод Ньютона-Рафсона. Поэтому, успешное применение метода Ньютона-Рафсона требует минимизации порядка  $Z$ -матрицы или матрицы Якоби.

С этой целью применяется идея представления большой энергосистемы как совокупности радиально соединенных подсистем [3, 4]. При этом, вместо матрицы  $Z_{ij}$  в память машины необходимо хранить другую матрицу, которая называется расчетной  $Z$ -матрицей и имеет следующий вид [4]:



$\Phi_{p1}(P, Q, U, \psi) = 0$			
$\Phi_{q1}(P, Q, U, \psi) = 0$			
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td style="padding: 5px;"><math>\Phi_{p2}(P, Q, U, \psi) = 0</math></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;"><math>\Phi_{q2}(P, Q, U, \psi) = 0</math></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">...</td> </tr> </table>	$\Phi_{p2}(P, Q, U, \psi) = 0$	$\Phi_{q2}(P, Q, U, \psi) = 0$	...
$\Phi_{p2}(P, Q, U, \psi) = 0$			
$\Phi_{q2}(P, Q, U, \psi) = 0$			
...			
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td style="padding: 5px;"><math>\Phi_{pN}(P, Q, U, \psi) = 0</math></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;"><math>\Phi_{qN}(P, Q, U, \psi) = 0</math></td> </tr> </table>	$\Phi_{pN}(P, Q, U, \psi) = 0$	$\Phi_{qN}(P, Q, U, \psi) = 0$	
$\Phi_{pN}(P, Q, U, \psi) = 0$			
$\Phi_{qN}(P, Q, U, \psi) = 0$			

(5)

Применительно к (5) метод Ньютона-Рафсона дает:

$Q_{m1}$	$Q_{m1}$	$\frac{\partial \Phi_{pm1}}{\partial Q_{m1}}$	$\frac{\partial \Phi_{pm1}}{\partial U_{k1}}$	$\frac{\partial \Phi_{pm1}}{\partial \psi_{j1}}$	×	$\Phi_{pm1}$
$U_{k1}$	$U_{k1}$	$\frac{\partial \Phi_{pk1}}{\partial Q_{n1}}$	$\frac{\partial \Phi_{pk1}}{\partial U_{k1}}$	$\frac{\partial \Phi_{pk1}}{\partial \psi_{j1}}$		$\Phi_{pk1}$
$\psi_{j1}$	$\psi_{j1}$	$\frac{\partial \Phi_{q1}}{\partial Q_{n1}}$	$\frac{\partial \Phi_{q1}}{\partial U_{k1}}$	$\frac{\partial \Phi_{q1}}{\partial \psi_{j1}}$		$\Phi_{q1}$
...	...	...	...	...		...
$Q_{mN}$	$Q_{mN}$	$\frac{\partial \Phi_{pmN}}{\partial Q_{mN}}$	$\frac{\partial \Phi_{pmN}}{\partial U_{kN}}$	$\frac{\partial \Phi_{pmN}}{\partial \psi_{jN}}$		$\Phi_{pmN}$
$U_{kN}$	$U_{kN}$	$\frac{\partial \Phi_{pkN}}{\partial Q_{nN}}$	$\frac{\partial \Phi_{pkN}}{\partial U_{kN}}$	$\frac{\partial \Phi_{pkN}}{\partial \psi_{jN}}$		$\Phi_{pkN}$
$\psi_{jN}$	$\psi_{jN}$	$\frac{\partial \Phi_{qN}}{\partial Q_{nN}}$	$\frac{\partial \Phi_{qN}}{\partial U_{kN}}$	$\frac{\partial \Phi_{qN}}{\partial \psi_{jN}}$		$\Phi_{qN}$

(6)

Величины, входящие в (6), определяются как:

$$\Phi_{pi} = \frac{1}{U_i} (U_{Bat} H_i + U_{Bpi} K_i) + \gamma_{ij} - P_i = 0; \tag{7}$$

$$\Phi_{qi} = \frac{1}{U_i} (U_{Bat} K_i - U_{Bpi} H_i) + \delta_{ij} - Q_i = 0. \tag{8}$$

На основании (7) и (8) можно написать выражения частных производных, входящих в матрицу Якоби.

При одинаковых индексах ( $i=j$ ):

$$\frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial Q_i} = \frac{1}{U_i} (U_{Bat} \sin \psi_i - U_{Bpi} \cos \psi_i) + \frac{2Q_i}{U_i^2} R_{ii} + H_{ij}; \tag{9}$$

$$\frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial U_i} = -\frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^3} R_{ii} - \frac{P_i}{U_i}; \tag{10}$$

$$\frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial \psi_i} = - \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} R_{ii} + Q_i; \quad (11)$$

$$\frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial Q_i} = \frac{1}{U_i} (U_{\text{Бал}} \cos \psi_i + U_{\text{Бпр}} \sin \psi_i) + \frac{2Q_i}{U_i^2} X_{ii} + \alpha_{ii} - 1; \quad (12)$$

$$\frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial U_i} = - \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} X_{ii} - \frac{Q_i}{U_i}; \quad (13)$$

$$\frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial \psi_i} = \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} R_{ii} - P_i. \quad (14)$$

При разных индексах ( $i \neq j$ ):

$$\frac{\partial \Phi_{pj}}{\partial Q_i} = R_{ij} \beta_{ij} + X_{ij} \alpha_{ij}; \quad (15)$$

$$\frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial U_j} = - \frac{1}{U_j} (R_{ji} A_{ji} + X_{ji} B_{ji}); \quad (16)$$

$$\frac{\partial \Phi_{pj}}{\partial \psi_i} = R_{ji} B_{ji} - X_{ji} A_{ji}; \quad (17)$$

$$\frac{\partial \Phi_{qj}}{\partial Q_i} = - (R_{ij} \alpha_{ij} - X_{ij} \beta_{ij}); \quad (18)$$

$$\frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial U_j} = \frac{1}{U_j} (R_{ji} B_{ji} - X_{ji} A_{ji}); \quad (19)$$

$$\frac{\partial \Phi_{qj}}{\partial \psi_i} = R_{ji} A_{ji} + X_{ji} B_{ji}. \quad (20)$$

В вышеприведенных выражениях приняты следующие обозначения:

$$H_i = P_i \cos \psi_i + Q_i \sin \psi_i; \quad (21)$$

$$K_i = P_i \sin \psi_i - Q_i \cos \psi_i. \quad (22)$$

$$A_{ij} = \frac{1}{U_i U_j} [(P_i P_j + Q_i Q_j) \cos(\psi_i - \psi_j) + (Q_i P_j - P_i Q_j) \sin(\psi_i - \psi_j)]; \quad (23)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{U_i U_j} [(P_i P_j + Q_i Q_j) \sin(\psi_i - \psi_j) - (Q_i P_j - P_i Q_j) \cos(\psi_i - \psi_j)]; \quad (24)$$

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{U_i U_j} [P_j \cos(\psi_i - \psi_j) - Q_j \sin(\psi_i - \psi_j)]; \quad (25)$$

$$\beta_{ij} = \frac{1}{U_i U_j} [P_j \sin(\psi_i - \psi_j) + Q_j \cos(\psi_i - \psi_j)]; \quad (26)$$

$$\gamma_{ij} = \sum_{l=1}^M (R_{lj}A_{lj} + X_{lj}B_{lj}); \quad (27)$$

$$\delta_{ij} = \sum_{l=1}^M (x_{lj}A_{lj} - R_{lj}B_{lj}); \quad (28)$$

$$\epsilon_{ij} = \sum_{l=1}^M (R_{lj}z_{lj} + x_{lj}\beta_{lj}); \quad (29)$$

$$\theta_{ij} = \sum_{l=1}^M (R_{lj}\beta_{lj} - x_{lj}z_{lj}). \quad (30)$$

С другой стороны:

$$U_{\text{вн}} = \operatorname{Re}(U_{\text{вн}}); \quad U_{\text{вр}} = \operatorname{Im}(U_{\text{вн}}). \quad (31)$$

Предлагается следующая очередность решения поставленной задачи.

1. Устанавливаются предварительные значения комплексных токов узлов большой энергосистемы как совокупность узловых токов отдельных подсистем:

$$\vec{I}_l = (I_{l1}, I_{l2}, \dots, I_{lN}). \quad (32)$$

При этом токи отдельных узлов определяются по формуле:

$$I_l = \frac{P_l - jQ_l}{\vec{U}_l}. \quad (33)$$

2. Устанавливаются численные значения базисных напряжений первой подсистемы  $U_{\text{вн}}$ .

3. Устанавливая численные значения элементов матрицы Якоби первой подсистемы, определяются неизвестные режимные параметры этой же подсистемы из (6):

$$\begin{bmatrix} Q_{m_1} \\ U_{k_1} \\ \varphi_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{m_1} \\ U_{k_1} \\ \varphi_{11} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pm_1}}{\partial Q_{m_1}} & \frac{\partial \Phi_{pm_1}}{\partial U_{k_1}} & \frac{\partial \Phi_{pm_1}}{\partial \varphi_{11}} \\ \frac{\partial \Phi_{pk_1}}{\partial Q_{m_1}} & \frac{\partial \Phi_{pk_1}}{\partial U_{k_1}} & \frac{\partial \Phi_{pk_1}}{\partial \varphi_{11}} \\ \frac{\partial \Phi_{q1_1}}{\partial Q_{m_1}} & \frac{\partial \Phi_{q1_1}}{\partial U_{k_1}} & \frac{\partial \Phi_{q1_1}}{\partial \varphi_{11}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Phi_{pm_1} \\ \Phi_{pk_1} \\ \Phi_{q1_1} \end{bmatrix}. \quad (34)$$

4. Определяя из (30) комплексное напряжение  $\vec{U}_{M_1}$  последнего  $M_1$  узла первой подсистемы, устанавливаем численные значения базисных напряжений второй подсистемы  $U_{\text{вн}}$ .

5. Устанавливаются численные значения элементов матрицы Якоби для второй подсистемы и определяются ее режимные параметры и т. д.

6. Определяя комплексное напряжение  $U_{M_1 N-1}$  последнего узла предпоследней подсистемы, устанавливаются численные значения базисных напряжений  $N$ -ой подсистемы.

7. Устанавливая численные значения элементов матрицы Якоби  $N$ -ой подсистемы, определяются ее неизвестные режимные параметры из (6):

$$\begin{array}{c} Q_{mN} \\ U_{kN} \\ \dot{q}_{iN} \end{array} = \begin{array}{c} Q_{mN} \\ U_{kN} \\ \dot{q}_{iN} \end{array} \times \begin{array}{c} \frac{\partial \Phi_{pmN}}{\partial Q_{nN}} \\ \frac{\partial \Phi_{pkN}}{\partial Q_{nN}} \\ \frac{\partial \Phi_{qiN}}{\partial Q_{nN}} \end{array} \begin{array}{c} \frac{\partial \Phi_{pmN}}{\partial U_{gN}} \\ \frac{\partial \Phi_{pkN}}{\partial U_{gN}} \\ \frac{\partial \Phi_{qiN}}{\partial U_{gN}} \end{array} \begin{array}{c} \frac{\partial \Phi_{pmN}}{\partial \dot{q}_{jN}} \\ \frac{\partial \Phi_{pkN}}{\partial \dot{q}_{jN}} \\ \frac{\partial \Phi_{qiN}}{\partial \dot{q}_{jN}} \end{array} \times \begin{array}{c} \Phi_{pmN} \\ \Phi_{pkN} \\ \Phi_{qiN} \end{array} \quad (35)$$

Этим заканчивается полный цикл одной итерации. Процесс считается законченным, когда функции  $\Phi_p$  и  $\Phi_q$  стремятся к нулю.

*Пример расчета.* Для численной иллюстрации предложенного метода рассмотрим схему замещения одной электрической системы, состоящей из 10 узлов и представляющей совокупность трех радиально связанных подсистем [4]. Численные значения элементов расчетной  $Z$ -матрицы также приводятся в [4]. Задается следующая исходная информация относительно режимных параметров отдельных узлов (табл. 1).

Таблица 1

Исходные режимные параметры

Узлы	Подсистемы	$P, \text{ Мвт}$	$Q, \text{ Мвар}$	$U, \text{ кв}$	$\psi$
ЭС-0		—	—	220,0	0°0'
ЭН-1	I	110,0	50,0	—	—
ЭС-2		106,0	—	215,1	—
ЭН-3		60,0	28,0	—	—
ЭН-4		104,0	51,0	—	—
ЭС-5	II	85,0	—	210,2	—
ЭН-6		100,0	48,0	—	—
ЭС-7		60,0	—	215,1	—
ЭН-8	III	94,0	45,0	—	—
ЭС-9		80,0	—	212,1	—

Процесс решения данной задачи производится по той же последовательности, что и было предложено выше.

I. Устанавливаются предварительные значения узловых токов отдельных подсистем:

$$\begin{array}{l} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{array} = \begin{array}{l} -0,5000 + j0,2273 \\ 0,4930 + j0,0000 \\ -0,2727 + j0,1273 \end{array}; \quad \begin{array}{l} I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{array} = \begin{array}{l} 0,4727 + j0,2318 \\ 0,4044 + j0,0000 \\ -0,4545 + j0,2182 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} I_7 \\ I_8 \\ I_9 \end{array} = \begin{array}{l} 0,2789 + j0,0000 \\ -0,4273 + j0,2045 \\ 0,3771 + j0,0000 \end{array}$$

2. Устанавливается численное значение

$$U_{\text{вн}} = \begin{array}{l} U_{\text{вн1}} \\ U_{\text{вн2}} \\ U_{\text{вн3}} \end{array} = \begin{array}{l} 210,9023 + j0,6657 \\ 209,3068 + j0,2597 \\ 209,2425 - j0,4768 \end{array}$$

3. Устанавливаются численные значения элементов матрицы Якоби

0,4872	-0,0319	-0,0025	-54,8041	3,3847	-1,2482
0,0120	0,0332	0,0076	2,1294	-5,0650	1,5250
-0,0023	-0,0213	0,2695	-1,2590	2,2681	-29,7074
0,2054	0,0012	-0,0056	112,8102	-0,1363	0,5507
0,0096	-0,0420	0,0069	-2,6473	-103,4972	-1,6812
-0,0057	-0,0008	0,1195	0,5226	0,0889	60,6902

и определяются неизвестные режимные параметры 1 подсистемы:

$U_1 = 210,5593$  кв;  $Q_2 = 141,5814$  Мвар,  $U_3 = 213,4790$  кв;  $\psi_1 = -1^\circ 34'$ ;  $\psi_2 = -2^\circ 29'$  и  $\psi_3 = -1^\circ 16'$ .

4. Определяются комплексное напряжение  $U_3 = 213,4159 - j4,7180$  и численное значение напряжения  $U_{\text{вн}}$ :

$$\begin{array}{l} U_{\text{вн1}} \\ U_{\text{вн2}} \\ U_{\text{вн3}} \end{array} = \begin{array}{l} 216,8767 - j1,5115 \\ 219,5499 - j1,7396 \\ 219,9984 - j1,1068 \end{array}$$

5. Устанавливается матрица Якоби второй подсистемы

0,4655	-0,0314	-0,0067	-54,1047	2,6753	-2,9858
0,0097	0,0531	0,0142	1,6066	-4,4453	2,2042
-0,0069	-0,0449	0,4101	-2,9603	3,8168	-53,1994
0,2177	0,0004	-0,0135	105,5801	-0,0397	1,4880
0,0073	-0,0536	0,0100	-2,1395	-82,3784	-3,1248
-0,0134	0,0027	0,1945	1,5380	-0,2347	103,1665

и определяются неизвестные режимные параметры:

$U_4 = 207,8623$ ;  $Q_3 = -13,5383$ ;  $U_6 = 206,0394$ ;  $\psi_4 = -0^\circ 57'$ ;  $\psi_5 = 0^\circ 22'$ ;  
 $\psi_6 = -1^\circ 14'$ .

6. Определяются комплексное напряжение  $U_6 = 206,1368 - j4,4311$  и численное значение напряжения  $U_{B3}$ :

$$\begin{array}{l} \overline{U_{B7}} \\ \overline{U_{B8}} \\ \overline{U_{B9}} \end{array} = \begin{array}{l} \boxed{206,7787 - j9,7761} \\ \boxed{206,7524 - j10,9654} \\ \boxed{206,7432 - j13,4178} \end{array}$$

7. Устанавливается матрица Якоби третьей подсистемы

0.0390	0.0131	0.0334	-1.9763	2.4239	-2.6723
-0.0619	0.4080	-0.0765	3.7176	-52.7761	6.1269
0.0445	0.0221	0.0756	-2.6723	3.7292	-5.8876
-0.0656	0.0106	-0.0153	-59.0585	-2.8913	1.2730
-0.0001	0.1691	0.0018	0.0071	98.2313	-0.1450
-0.0212	0.0169	-0.0701	1.2730	-4.8634	-76.8087

и определяются неизвестные режимные параметры:  $Q_7 = 94,0219$ ;  
 $U_8 = 208,3876$ ;  $Q_8 = 22,6437$ ;  $\psi_7 = -6^\circ 6'$ ;  $\psi_8 = 1^\circ 56'$ ;  $\psi_9 = -0^\circ 36'$ .

Используя полученные значения режимных параметров отдельных подсистем и заданные исходные данные, начинаем новую итерацию. Проведя три итерации, устанавливаются значения неизвестных режимных параметров с обеспечением средней точности 0,01.

ԱրմՀՊՊԷ

Поступило 1.11.1974.

#### Վ. Ս. ԿԱԶԱՏՐԱՆ

ՄԵՆՏ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՍԻՍՏԵՄՆԵՐԻ ԿԱՅՈՒՆ ՌԵԺԻՄՆԵՐԻ ՀԱՇՎՄԱՆ ՄԻ ԱԼԳՈՐԻԹՄԻ ՄԿԱՍԻՆ

Ա ճ Վ ի ս Վ ի ս ճ

Մեծ էլեկտրական սիստեմաների կայուն էլեկտրական ռեժիմների հաշվման համար հողվածում առաջարկվում է նոր մեթոդ հիմնված այն սկզբունքի վրա, որ մեծ էներգասիստեմաները կարելի է ներկայացնել որպես շառավղային մեկ կառուցող ենթասիստեմաների ամբողջություն: Ստացված ոչ-գծային հանրահաշվական հավասարումների սիստեմաների լուծման համար օգտագործվում է նյուտոնի մեթոդը: Մշակված է հաշվարկային ալգորիթմ, որը հնարավորություն է բնձնում կազմել համապատասխան ծրագիր թվային հաշվիչ մեքենաների համար:

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Адоиц Г. Т. Многополюсник. Изд. АН АрмССР, Ереван, 1965.
2. Марковиц И. М. Режимы энергетических систем. Гостэнергоиздат, 1963.
3. Хачатрян В. С., Суханов О. А. Диагностика и задача определения обобщенных параметров больших энергосистем. «Электричество», 1973, № 4.
4. Хачатрян В. С. Метод и алгоритм расчета установившихся режимов больших энергосистем, «Известия АН СССР. Энергетика и транспорт», 1973, № 4.