

М. А. БАЛАБЕКЯН

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ПРИРОСТОВ ПОТЕРЬ В СЕТЯХ ЭНЕРГОСИСТЕМ МЕТОДОМ ДЕКОМПОЗИЦИИ

При решении задачи по наиболее выгодному распределению активных нагрузок между станциями энергосистем приходится определять относительные приросты потерь всех источников активной и реактивной мощностей, т. е. частные производные от суммарных потерь мощностей в сетях энергосистемы по мощностям соответствующего источника.

Задачу расчета относительных приростов потерь можно рассматривать как определенный этап расчета оптимальных установившихся режимов. Для расчета частных производных в уравнениях оптимальных режимов энергосистем применяются несколько методов. Получить точные выражения удельных приростов потерь затруднительно, так как при изменении какой-либо узловой мощности (активной или реактивной) изменяются значения модулей и фазовых углов всех напряжений, кроме базисного. Поэтому практически обычно пользуются приближенными формулами для удельных приростов потерь. Одним из таких методов является примечание, так называемых, *B*-коэффициентов формулы потерь для расчета вышеуказанных частных производных [1]. Как известно, метод *B*-коэффициентов определения относительных приростов потерь основывается на следующих допущениях:

- а) при изменении режимов модули и аргументы во всех узлах остаются неизменными;
- б) отношение реактивных и активных мощностей по всем узлам при изменении режимов остается неизменным;
- в) при изменении режимов каждая нагрузка является фиксированной долей общей нагрузки системы.

В [2; 3; 4] были предложены более усовершенствованные методы расчета относительных приростов потерь, однако эти методы также не обеспечивают требуемой точности при расчете оптимальных режимов больших энергосистем. В [5; 7] получены аналитические выражения для определения относительных приростов потерь, которые позволяют учитывать любые факторы, влияющие на режим данной энергосистемы. Здесь определение частных производных типа  $\frac{\partial U_k}{\partial P_n}$ ,  $\frac{\partial Q_n}{\partial P_n}$ ,  $\frac{\partial \psi_i}{\partial P_n}$  сводится к обращению матриц порядка  $2M$  ( $M$ —число узлов энерго-

системы). Для больших энергосистем практическое применение этого метода стало почти невозможным, потому что метод требовал большой оперативной памяти вычислительной машины и много машинного времени вычисления. Применение предлагаемого метода определения указанных частных производных для больших энергосистем стало возможным благодаря принципиально новому подходу—представлению больших систем как совокупности радиально связанных оптимальных подсистем [6]. Этот метод позволяет при установлении численных значений вышеуказанных частных производных взамен обращения одной матрицы высшего порядка рассмотреть обращение ряда матриц несравненно низших порядков. Порядок отдельных подматриц характеризуется числом узлов соответствующих подсистем. Несмотря на то, что в этом методе обращается матрица низшего порядка, этот процесс неизбежен. А обращение матрицы при расчетах электрических режимов (установившихся и оптимальных), как известно, занимает основное машинное время вычисления.

Полученные аналитические выражения, для определения частных производных от потерь активных мощностей по мощностям станционных узлов, вводятся в общую систему уравнений оптимальных режимов больших энергосистем. Уравнения оптимальных режимов энергетических систем являются нелинейными и решаются методом итерации. Исследования показывают, что во многих случаях целесообразно в начальных итерациях пользоваться упрощенными выражениями частных производных, в которых нет обращения матриц.

В связи с этим, целью настоящей статьи является предложение более упрощенной формулы, которая может быть использована при организации первой стадии решения нелинейных алгебраических уравнений оптимальных режимов методом подсистемы. Упрощенную формулу частных производных можно использовать также и в других расчетах, не требующих большой точности.

В статье принимается следующая система индексов: для станционных узлов  $m = 0, 1, 2, \dots, r$ , где  $r$ —число станционных узлов с неизвестными узловыми мощностями. Узел с нулевым индексом имеет зависящие узловые мощности и выбирается как базисный.

Для произвольных узлов, включающих в себя как станционные так и нагрузочные узлы, выбирается  $i = 1, 2, \dots, r, r+1, \dots, r+n=m$ ,

где  $n$ —число нагрузочных узлов;  $m$ —число общих узлов в исследуемой энергосистеме, за исключением базисного.

Когда большая электроэнергетическая система представляется как совокупность радиально связанных подсистем, то потери мощностей каждой подсистемы определяются [6] так:





$$\begin{aligned}
 U_{i_1} &= \frac{U_{\delta a_{i_1}}}{\cos \psi_{i_1}} + \sum_{j=1}^{m_1} [(R_{i_1 j} P_j + X_{i_1 j} Q_j) \frac{\cos \psi_j}{U_j \cos \psi_{i_1}} - \\
 &\quad - (X_{i_1 j} P_j - R_{i_1 j} Q_j) \frac{\sin \psi_j}{U_j \cos \psi_{i_1}}], \\
 \sin \psi_{i_1} &= \frac{U_{\delta p_{i_1}}}{U_{i_1}} + \sum_{j=1}^{m_1} [(R_{i_1 j} P_j + X_{i_1 j} Q_j) \frac{\sin \psi_j}{U_j U_{i_1}} + \\
 &\quad + (X_{i_1 j} P_j - R_{i_1 j} Q_j) \frac{\cos \psi_j}{U_j U_{i_1}}] \dots \dots \dots (7) \\
 U_{i_N} &= \frac{U_{\delta a_{i_N}}}{\cos \psi_{i_N}} + \sum_{j=1}^{m_N} [(R_{i_N j} P_j + X_{i_N j} Q_j) \frac{\cos \psi_j}{U_j \cos \psi_{i_N}} - \\
 &\quad - (X_{i_N j} P_j - R_{i_N j} Q_j) \frac{\sin \psi_j}{U_j \cos \psi_{i_N}}], \\
 \sin \psi_{i_N} &= \frac{U_{\delta p_{i_N}}}{U_{i_N}} + \sum_{j=1}^{m_N} [(R_{i_N j} P_j + X_{i_N j} Q_j) \frac{\sin \psi_j}{U_j U_{i_N}} + \\
 &\quad + (X_{i_N j} P_j - R_{i_N j} Q_j) \frac{\cos \psi_j}{U_j U_{i_N}}].
 \end{aligned}$$

При таких значениях потерь активных мощностей (3) и токов отдельных подсистем (5) частные производные от потерь активных мощностей по мощностям станционных узлов соответствующих подсистем можно представлять в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \Pi_{a_1}}{\partial P_{m_1}} &= \frac{\partial \Pi_{a_1}}{\partial I_{a_{m_1}}} \cdot \frac{\partial I_{a_{m_1}}}{\partial P_{m_1}} + \frac{\partial \Pi_{a_1}}{\partial I_{p_{m_1}}} \cdot \frac{\partial I_{p_{m_1}}}{\partial P_{m_1}} + \sum_{i=1}^{m_1} \left( \frac{\partial \Pi_{a_1}}{\partial I_{a_{i_1}}} \cdot \frac{\partial I_{a_{i_1}}}{\partial U_{i_1}} \cdot \frac{\partial U_{i_1}}{\partial P_{m_1}} \right. \\
 &+ \left. \frac{\partial \Pi_{a_1}}{\partial I_{a_{i_1}}} \cdot \frac{\partial I_{a_{i_1}}}{\partial \psi_{i_1}} \cdot \frac{\partial \psi_{i_1}}{\partial P_{m_1}} \right) + \sum_{i=1}^{m_1} \left( \frac{\partial \Pi_{a_1}}{\partial I_{p_{i_1}}} \cdot \frac{\partial I_{p_{i_1}}}{\partial U_{i_1}} \cdot \frac{\partial U_{i_1}}{\partial P_{m_1}} + \frac{\partial \Pi_{a_1}}{\partial I_{p_{i_1}}} \cdot \frac{\partial I_{p_{i_1}}}{\partial \psi_{i_1}} \cdot \frac{\partial \psi_{i_1}}{\partial P_{m_1}} \right) \dots \dots \dots (8) \\
 \frac{\partial \Pi_{a_N}}{\partial P_{m_N}} &= \frac{\partial \Pi_{a_N}}{\partial I_{a_{m_N}}} \cdot \frac{\partial I_{a_{m_N}}}{\partial P_{m_N}} + \frac{\partial \Pi_{a_N}}{\partial I_{p_{m_N}}} \cdot \frac{\partial I_{p_{m_N}}}{\partial P_{m_N}} + \sum_{i=1}^{m_N} \left( \frac{\partial \Pi_{a_N}}{\partial I_{a_{i_N}}} \cdot \frac{\partial I_{a_{i_N}}}{\partial U_{i_N}} \cdot \frac{\partial U_{i_N}}{\partial P_{m_N}} \right.
 \end{aligned}$$

$$\left( \frac{\partial \Pi_{a_N}}{\partial I_{a_N}} \cdot \frac{\partial I_{a_N}}{\partial \psi_{i_N}} \cdot \frac{\partial \psi_{i_N}}{\partial P_{m_N}} \right) + \sum_{i_N=1}^{m_N} \left( \frac{\partial \Pi_{a_N}}{\partial I_{p_{i_N}}} \cdot \frac{\partial I_{p_{i_N}}}{\partial U_{i_N}} \cdot \frac{\partial U_{i_N}}{\partial P_{m_N}} + \frac{\partial \Pi_{a_N}}{\partial I_{p_{i_N}}} \cdot \frac{\partial I_{p_{i_N}}}{\partial \psi_{i_N}} \cdot \frac{\partial \psi_{i_N}}{\partial P_{m_N}} \right)$$

Формулы для нахождения частных производных, входящих в выражение (6), приведены в приложении I, а пример расчета относительных приростов потерь предложенным способом — в приложении II.

Нами проведен еще один эксперимент: оптимизированы режимы электрических систем, состоящих из 10; 25 и 51 узлов, используя частные производные, приведенные в [6]. Пользуясь упрощенной формулой частных производных, получились почти одинаковые параметры режима, по сравнению с предыдущими вариантами, сэкономили при этом 10÷12% машинного времени. Предполагается более ощутимый выигрыш во времени при расчете оптимальных режимов больших электрических систем.

Вывод: в работе дается упрощенная формула для определения частных производных активных потерь по активным мощностям станционных узлов для схем замещения любой размерности с любыми рабочими режимами.

#### Приложение I

Из выражения (2) можно получить:

$$\frac{\partial \Pi_{a_i}}{\partial I_{a_{m_i}}} = 2 \sum_{k=1}^{m_i} R_{m_i k} I_{a_{k_i}} + U_{i a_{m_i}}$$

$$\frac{\partial \Pi_{a_i}}{\partial I_{p_{m_i}}} = 2 \sum_{k=1}^{m_i} R_{m_i k} I_{p_{k_i}} - U_{i p_{m_i}}$$

Если принять заданными активные и реактивные мощности узлов, то из (4) получим:

$$\frac{\partial I_{a_{i_1}}}{\partial U_{i_1}} = - \frac{P_{i_1} \cos \psi_{i_1} + Q_{i_1} \sin \psi_{i_1}}{U_{i_1}^2};$$

$$\frac{\partial I_{p_{i_1}}}{\partial U_{i_1}} = - \frac{P_{i_1} \sin \psi_{i_1} - Q_{i_1} \cos \psi_{i_1}}{U_{i_1}^2};$$

$$\frac{\partial I_{a_{i_1}}}{\partial \psi_{i_1}} = \frac{-P_{i_1} \sin \psi_{i_1} + Q_{i_1} \cos \psi_{i_1}}{U_{i_1}};$$

$$\frac{\partial I_{p_{i_1}}}{\partial \psi_{i_1}} = \frac{P_{i_1} \cos \psi_{i_1} + Q_{i_1} \sin \psi_{i_1}}{U_{i_1}}.$$

\* Здесь даются формулы только для первой подсистемы. Для остальных подсистем формулы аналогичны.

Так как  $\psi_{i_1}$  малые углы, то можно принять  $\sin \psi_{i_1} \approx \psi_{i_1}$ . Тогда из (7) получим:

$$\frac{\partial U_{i_1}}{\partial P_{m_1}} = \frac{R_{l,m_1} \cos \psi_{m_1} - X_{l,m_1} \sin \psi_{m_1}}{U_{m_1} \cos \psi_{i_1}};$$

$$\frac{\partial \psi_{i_1}}{\partial P_{m_1}} = \frac{R_{l,m_1} \sin \psi_{m_1} + X_{l,m_1} \cos \psi_{m_1}}{U_{i_1} U_{m_1}}.$$

### Приложение II

Пример расчета. Для иллюстрации предложенного метода рассмотрим схему замещения одной энергосистемы, состоящей из десяти узловых точек [6]. Данная энергосистема разделена на три радиально связанные подсистемы. К узлам 0, 2, 5, 7, 9 этой схемы подключены генераторы, а к узлам 1, 3, 4, 6, 8 — нагрузки. В качестве базисного узла выбран генерирующий узел 0, в котором поддерживается постоянное напряжение  $U_0 = 220$  кВ. Для заданной схемы замещения рассматривается сетевой режим, приведенный в табл. 1.

Таблица 1

Узлы	П а р а м е т р ы			
	$P, \text{ МВт}$	$Q, \text{ Мвар}$	$U, \text{ кВ}$	$\psi, \text{ град}$
0	150,2	89,9	220,0	0°
1	-110,0	-50,0	210,0	-1° 40'
2	106,0	92,5	215,0	-0° 50'
3	-60,0	-28,0	211,8	-1° 30'
4	-104,0	-51,0	208,6	-1° 55'
5	85,0	-71,1	210,2	-0° 14'
6	-100,0	-48,0	208,1	-2° 9'
7	60,0	136,7	215,1	-2° 27'
8	-94,0	-45,0	210,0	-2° 41'
9	80,0	-5,8	212,1	-1° 23'

Численные значения расчетной  $Z$ -матрицы  $\dot{U}_0$  и  $\dot{U}_6$  отдельных подсистем приводятся в [6]. Для данного режима определяются значения узловых комплексных токов отдельных подсистем:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_1 \\ \dot{i}_2 \\ \dot{i}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,5164 + j0,2520 \\ 0,4870 - j0,4367 \\ -0,2798 + j0,1394 \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} \dot{i}_4 \\ \dot{i}_5 \\ \dot{i}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,4900 + j0,2607 \\ 0,4055 + j0,3374 \\ -0,4719 + j0,2475 \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_7 \\ \dot{i}_8 \\ \dot{i}_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,2515 - j0,6467 \\ -0,4371 + j0,2350 \\ 0,3778 + j0,0182 \end{bmatrix}.$$

После расчета частных производных, на основании выражения (5), устанавливаем их значения для отдельных подсистем:

$$\frac{\partial \Pi_{\Sigma}}{\partial P_1} = -0,05275; \quad \frac{\partial \Pi_{\Sigma}}{\partial P_2} = 0,03685; \quad \frac{\partial \Pi_{\Sigma}}{\partial P_3} = -0,07312;$$

$$\frac{\partial \Pi_{\Sigma}}{\partial P_0} = -0,07152.$$

На основании предложенной формулы расчета относительных приростов потерь составлены программы на языке «Фортран-4» для ЭВМ «Урал-14Д», позволяющие определить численные значения искомых частных производных для схем замещения любой сложности.

Таблица 2

Режимы	Число независимых узлов на системе	Число подсистем	Число узлов на каждой подсистеме	Число генерирующих узлов на каждой подсистеме	Точные значения частных производных, подсчитанные по методу [6]	Значения частных производных по упрощенной формуле
1	9	3	3	1	-0,0540	-0,0527
			3	1	0,0410	0,0369
			3	2	-0,0748	-0,0731
			3	2	-0,0759	-0,0715
2	25	2	13	2	0,0820	0,0800
			13	2	0,2008	0,1901
			12	3	0,1360	0,1412
			12	3	0,0891	0,0862
					0,1067	0,0996

Сравнение результатов, приведенных в табл. 2 показывают, что полученные на основании предложенного упрощенного метода численные значения частных производных близки к результатам, полученным по методу [6].

Армения

Поступило 10.V.1976

И. А. РАЦАБЕЦАЦ

ԷՆԵՐԳԱՀԱՄԱԿԱՐԴԻ ԶԱՆԾԵՐՈՒՄ ԿՈՐՈՒՍՏՆԵՐԻ ՀԱՐԱՐԵՐԱԿԱՆ ԱՃԵՐԻ ԻՐՈՇՈՒՄԸ ԴԵԿՈՄՊՈԶԻՑԻԱՅԻ ՄԵԹՈԴՈՎ

Ա. Վ. Փ Ո Փ Ո Վ

Հոդվածում աստիճանաբար է էլեկտրական ջանցերում հարաբերական սեփական արդյան պարզեցված բանաձև, երբ էներգահամակարգը բաժանվում է շառվիզորեն կապված ենթասխեմաների բազմություն

Պարզեցված բանաձևեր կարելի է հաջողությամբ օգտագործել էներգուհամակարգի օպտիմալ ռեժիմների ոչ-դժարին հանրահաշվական հավասարումների սխեմանի լուծման առաջին կտապը կազմակերպելու համար, ինչպես նաև էներգահամակարգի օպտիմալ ռեժիմների որոշման հաշվարկներում, երբ խնդիրը չի պահանջում մեծ ճշտություն:

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. George E. E. Intrasystem transmission losses. IEEE Trans. Vol. 62, March 1943.
2. Kirchmayer I. K., Happ H. H., Stagg G. W., Hohenstein V. F. Direct calculation of transmission loss formula. IEEE Trans. Power Appar. and systems. 1960, № 51.
3. Адоиц Г. Т. К методу расчета потерь мощности в электрических сетях энергосистем. «Электричество», 1962, № 11.
4. Watson R. E., Stadeln W. O. The calculation of incremental transmission losses and the general transmission loss equation. Power Appar. and systems. 1959, № 41.
5. Хачатрян В. С. К вопросу об определении производных от потерь по активным мощностям. «Известия АН АрмССР (серия Т. Н.)», 1963, № 6.
6. Хачатрян В. С. Метод определения относительных приростов потерь в сетях больших электрических систем. Известия АН СССР. «Энергетика и транспорт», 1974, № 5.
7. Хачатрян В. С. К вопросу об определении производных от потерь активной и реактивной мощностей по активным мощностям стационарных узлов. Известия АН СССР. «Энергетика и транспорт», 1970, № 2.
8. Фазылов Х. Ф., Юлдашев Х. Об определении производных потерь в сетях электрических систем. «Известия АН УзССР (серия Т. Н.)», 1970, № 4.