лостого режима, очевидно, следует рассчитывать по выражениям соответствующих слагаемых этих формул. Определение потерь, обусловленных случайными составляющими нагрузки P'_2 и Q'_2, требует вероятностного подхода и вполне возможно на основе известных теорем о числовых характеристиках функций. Действительно, как видно из формулы (3), случайные составляющие потерь активной мощности представляют собой линейную и квадратичную функции случайных аргументов P'_2, Q'_2.

Литература

1. Электрические системы, т. 3. Под ред. В.А. Веникова.М., 1972. 2. Поспелов Г.Е. Элементы технико-экономических расчетов систем электропередач. Минск, 1967. 3. Поспелов Е.Г. Обобщенный метод определения потерь энергии в линиях электропередачи. — В сб.: Механизация и электрификация сельского хозяйства. Вып. 19. Минск, 1976.

С.К. Гурский, В.П. Керного

ОПЕРАТИВНОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ОСНОВНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАТРИЦЫ КОЭФФИЦИЕНТОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Для организации приближенного ускоренного расчета потокораспределения наиболее целесообразно использовать метод коэффициентов распределения. Преимуществами этого метода, помимо простоты учета переменной режимной информации — величин нагрузок узлов и коэффициентов трансформации регулируемых трансформаторов, — являются также легкость формирования матрицы коэффициентов распределения $\dot{C}$ с помощью специального метода наращивания и возможность ее быстрого пересчета при всех видах частичных изменений в схеме коммутации электрической сети. Соответствующие алгоритмы предлагаются в настоящей статье. Тем самым обеспечивается принципиальная возможность оперативного отображения режима основной электрической сети.

Выведем формулу, позволяющую произвести пересчет матрицы коэффициентов распределения при включении новой ветви между любой парой узлов.На этой формуле основывается предлагаемый метод наращивания схемы для вычисления матрицы коэффициентов распределения.

Матрица коэффициентов распределения для разомкнутой схемы-дерева

$$C_o = -M_\alpha^{-1}, \qquad (1)$$

где M_α — подматрица первой матрицы инциденций M для ветвей дерева. Приняв вначале в качестве начального вида схемы ее любое дерево ($\dot{C} = C_o$), будем последовательно добавлять к получающейся схеме хорды исходной схемы, соответственно пересчитывая матрицу $\dot{C}$, пока не получим полную исходную схему. Пусть в схеме включается ветвь k между узлами i и j, сопротивление которой $\dot{Z}_k$. Задана матрица $\dot{C}$ для некоммутированной схемы. Определим ток во вновь включенной ветви по теореме Тевенина. Для этого вначале найдем напряжение $\dot{U}_{ij}$ между концевыми узлами включенной ветви в некоммутированной схеме. Имеем

$$\dot{U}_\Delta = -\overset{*}{C_o}\, \dot{Z}_\alpha\, \dot{C}_\alpha\, \dot{I}, \qquad (2)$$

где $\dot{U}_\Delta$ — столбец напряжений узлов относительно базисного; $\dot{Z}_\alpha$ — диагональная матрица сопротивлений ветвей дерева; $\dot{C}_\alpha$ — подматрица матрицы $\dot{C}$ для ветвей дерева; $\dot{I}$ — столбец задающих узловых токов, в котором положительными считаются токи, вытекающие из схемы, $*$ — знак транспонирования матрицы. Отсюда

$$\dot{U}_{ij} = \dot{U}_{\Delta i} - \dot{U}_{\Delta j} = (\overset{*}{C}_{oj} - \overset{*}{C}_{oi})\dot{Z}_\alpha\, \dot{C}_\alpha\, \dot{I}, \qquad (3)$$

где C_{oi}, C_{oj} — столбцы матрицы C_o, соответствующие узлам i и j,

$$\dot{I}_k = \dot{U}_{ij} / \dot{Z}^{(ij)}_{вх} + \dot{Z}_k \qquad (4)$$

($\dot{Z}^{(ij)}_{вх}$ — входное сопротивление некоммутированной схемы между зажимами i и j). Для нахождения $\dot{Z}^{(ij)}_{вх}$ воспользуемся принципом наложения (рис. 1).

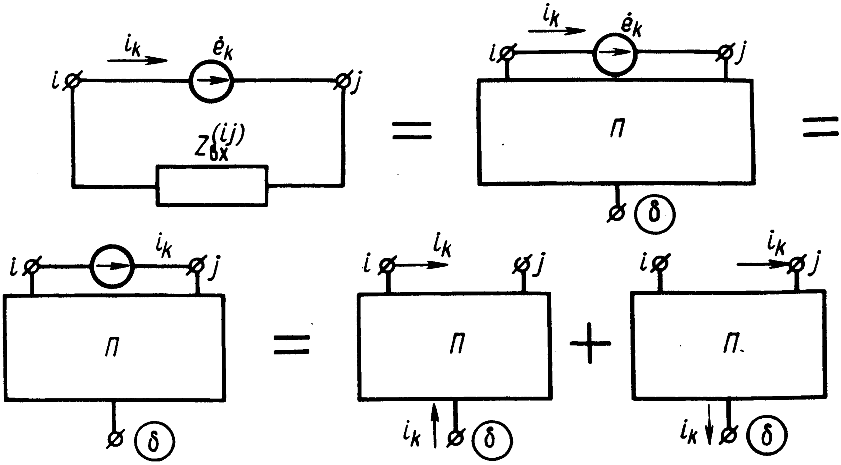

Рис. 1.

Для схемы с трехполюсником $П_1$ имеем

$$\dot{U}^{(1)}_{i\Delta} = -C^{*}_{oi}\dot{Z}_{\alpha}\dot{C}_{\alpha} \begin{array}{c} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ i_k \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \end{array} \begin{array}{l} 1 \\ \\ i \\ \\ n \end{array} = -i_k C^{*}_{oi}\dot{Z}_{\alpha}\dot{C}_{\alpha i}, \tag{5}$$

где $\dot{C}_{\alpha i}$ — столбец $\dot{C}$, соответствующий i-му узлу. Аналогично

$$\dot{U}^{(1)}_{j\Delta} = i_k C^{*}_{oj}\dot{Z}_{\alpha}\dot{C}_{\alpha i}. \tag{6}$$

Отсюда напряжение между узлами i и j в той же схеме равно

$$\dot{U}^{(1)}_{ij} = i_k (C^{*}_{oj} - C^{*}_{oi})\dot{Z}_{\alpha}\dot{C}_{\alpha i}. \tag{7}$$

Соответственно для схемы с трехполюсником $П_2$ получим

$$\dot{U}^{(2)}_{ij} = \dot{i}_k (C^*_{oi} - C^*_{oj}) \dot{Z}_\alpha \dot{C}_{\alpha j}. \tag{8}$$

Для схемы с трехполюсником П в соответствии с принципом наложения

$$\dot{U}_{ij} = \dot{U}^{(1)}_{ij} + \dot{U}^{(2)}_{ij} = \dot{i}_k (C^*_{oi} - C^*_{oj}) \dot{Z}_\alpha (\dot{C}_{\alpha i} - \dot{C}_{\alpha j}). \tag{9}$$

Тогда
$$\dot{Z}^{(ij)}_{вх} = \dot{e}_k / \dot{i}_k = -\frac{\dot{U}_{ij}}{\dot{i}_k} = (C^*_{oi} - C^*_{oj}) \dot{Z}_\alpha (\dot{C}_{\alpha i} - \dot{C}_{\alpha j}). \tag{10}$$

Подставляя значения $\dot{U}_{ij}$ из (3) и $\dot{Z}^{(ij)}_{вх}$ из (10) в (4), получим

$$\dot{I}_k = \frac{(C^*_{oj} - C^*_{oi}) \dot{Z}_\alpha \dot{C}_\alpha \dot{J}}{(C^*_{oi} - C^*_{oj}) \dot{Z}_\alpha (\dot{C}_{\alpha i} - \dot{C}_{\alpha j}) + \dot{Z}_k}. \tag{11}$$

Сопоставляя эту формулу с выражением

$$\dot{I}_k = \dot{C}^*_k \dot{J}. \tag{12}$$

где $\dot{C}^*_k$ -- строка матрицы $\dot{C}$ для вновь включенной ветви, получим

$$\dot{C}^*_k = \frac{(C^*_{oj} - C^*_{oi}) \dot{Z}_\alpha \dot{C}_\alpha}{(C^*_{oi} - C^*_{oj}) \dot{Z}_\alpha (\dot{C}_{\alpha i} - \dot{C}_{\alpha j}) + \dot{Z}_k}. \tag{13}$$

Используя теорему Тевенина, получаем также формулу для коэффициентов распределения некоммутировавшихся ветвей коммутированной схемы

$$\dot{C}' = \dot{C} - \frac{(\dot{C}_i - \dot{C}_j)(C^*_{oi} - C^*_{oj})\dot{Z}_\alpha \dot{C}_\alpha}{(C^*_{oi} - C^*_{oj})\dot{Z}_\alpha(\dot{C}_{\alpha i} - \dot{C}_{\alpha j}) + \dot{Z}_k}\,. \tag{14}$$

Объединяя (13) с (14), находим искомую формулу для определения матрицы коэффициентов распределения коммутированной схемы для всех ветвей

$$\dot{C}'' = \left[\frac{\dot{C}}{0}\right] - \left[\frac{\dot{C}_i - \dot{C}_j}{1}\right] \frac{(C^*_{oi} - C^*_{oj})\dot{Z}_\alpha \dot{C}_\alpha}{(C^*_{oi} - C^*_{oj})\dot{Z}_\alpha(\dot{C}_{\alpha i} - \dot{C}_{\alpha j}) + \dot{Z}_k}. \tag{15}$$

Рассмотрим сейчас способы пересчета матрицы $\dot{C}$ при изменениях в схеме соединений сети.

1. Включение ветви с сопротивлением $\dot{Z}_k$, присоединяющей к i-му узлу схемы ранее отключенный узел. Здесь матрица $\dot{C}$ пересчитывается по очевидной формуле

$$\dot{C}' = \begin{bmatrix} \dot{C} & \dot{C}_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{16}$$

где $\dot{C}$, $\dot{C}'$ — матрицы коэффициентов распределения сети соответственно до и после коммутации; $\dot{C}_i$ — столбец матрицы $\dot{C}$, соответствующий i-му узлу; 0 — строка длины n, где n — число узлов, не считая балансирующего, до коммутации, состоящей из нулей; 1 — скаляр.

2. Для включения ветви с сопротивлением $\dot{Z}_k$ между узлами i и j схемы можно использовать формулу (15).

3. Отключение ветви, присоединяющей к схеме j-ый узел.

Пусть

$$G_k = \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} 12 & k-1 & k+2 & m \end{array} \\ \begin{bmatrix} 10\ldots & 0000\ldots & 0 \\ 01\ldots & 0000\ldots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ 00\ldots & 1000\ldots & 0 \\ 00\ldots & 0010\ldots & 0 \\ 00\ldots & 0001\ldots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ 00\ldots & 0000\ldots & 1 \end{bmatrix} \end{array} \begin{array}{l} \\ 1 \\ 2 \\ \\ k-1 \\ k \\ k+1 \\ \\ \\ m-1 \end{array} \qquad Q_j = \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} 12 & j-1 & j+2 & n-1 \end{array} \\ \begin{bmatrix} 10\ldots0000\ldots0 \\ 01\ldots0000\ldots0 \\ \cdots\cdots\cdots \\ 00\ldots1000\ldots0 \\ 00\ldots0000\ldots0 \\ 00\ldots0010\ldots0 \\ 00\ldots0001\ldots0 \\ \cdots\cdots\cdots \\ 00\ldots0000\ldots1 \end{bmatrix} \end{array} \begin{array}{l} \\ 1 \\ 2 \\ \cdot \\ j-1 \\ j \\ \\ j+2 \\ \\ n \end{array}$$

матрицы G_k и Q_j , которые назовем матрицами переключений. Тогда

$$\dot{C}' = G_k \dot{C} Q_j. \qquad (18)$$

Преобразование по этой формуле обеспечивает исключение k-ой строки и j-го столбца матрицы $\dot{C}$ и уплотнение ее строк и столбцов на одну позицию соответственно вверх и влево.

4. Отключение ветви с сопротивлением $\dot{Z}_k$, соединявшей узлы i и j, сохраняющиеся в схеме. Такое изменение в схеме можно промоделировать включением ветви с сопротивлением $-\dot{Z}_k$, между этими узлами, поскольку

$$\frac{\dot{Z}_k(-\dot{Z}_k)}{\dot{Z}_k + (-\dot{Z}_k)} = \infty . \qquad (19)$$

Тогда матрица коэффициентов распределения для коммутированной схемы с учетом того, что k-ая строка должна быть исключена, определится как

$$\dot{C}' = G \left[\dot{C} - \frac{(\dot{C}_i - \dot{C}_j)(C^*_{oi} - C^*_{oj})\dot{Z}_\alpha \; \dot{C}_\alpha}{(C^*_{oi} - C^*_{oj})\dot{Z}_\alpha \; (\dot{C}_{\alpha i} - \dot{C}_{\alpha j}) - \dot{Z}_k} \right] . \qquad (20)$$

5. Замыкание накоротко узлов i и j (включение секционного выключателя).

Формулу пересчета $\dot{C}$ можно получить из (15), полагая $\dot{Z}_k = 0$. Тогда

$$\dot{C}' = \left[\frac{\dot{C}}{0} \right] - \left[\frac{\dot{C}_i - \dot{C}_j}{1} \right] \frac{(C^*_{oi} - C^*_{oj})\dot{Z}_\alpha \; \dot{C}_\alpha}{(C^*_{oi} - C^*_{oj})\dot{Z}_\alpha \; (\dot{C}_{\alpha i} - \dot{C}_{\alpha j})} . \qquad (21)$$

Здесь последняя строка пересчитанной матрицы $\dot{C}$ дает коэффициенты распределения через секционный выключатель.

6. Отключение секционного выключателя.

Для вывода формулы пересчета будем рассматривать схему как активный двухполюсник относительно концов k', k'' ветви k (рис. 2). Включим отключенную ветвь снова, вводя одновременно фиктивные задающие токи $\dot{J}_{k'}$, $\dot{J}_{k''}$ в узлах k', k'' так, чтобы потокораспределение в сети не изменилось. Тогда $\dot{J}_{k'}$, $\dot{J}_{k''}$ будут удовлетворять системе уравнений

$$\left.\begin{aligned} &\dot{J}_{k'} - \dot{I}_k = 0; \\ &\dot{J}_{k''} + \dot{I}_k = 0; \\ &\dot{I}_k = \sum_{j=1}^{n} \dot{c}_{kj}\dot{J}_j + \dot{c}_{kk'}\dot{J}_{k'} + \dot{c}_{kk''}\dot{J}_{k''}, \end{aligned}\right\} \qquad (22)$$

где $\dot{I}_k$ -- ток во вновь включенной k-ой ветви; $\dot{c}_{kj}$, $j = 1,2,\ldots, k', \ldots, k'', \ldots, n$ -- коэффициенты распределения k-ой ветви в некоммутированной схеме. Решение этой системы дает

$$\dot{I}_k = \dot{J}_{k'} = -\dot{J}_{k''} = \frac{\sum\limits_{j=1}^{n} \dot{c}_{kj}\dot{J}_j}{1-\dot{c}_{kk'}+\dot{c}_{kk''}}. \qquad (23)$$

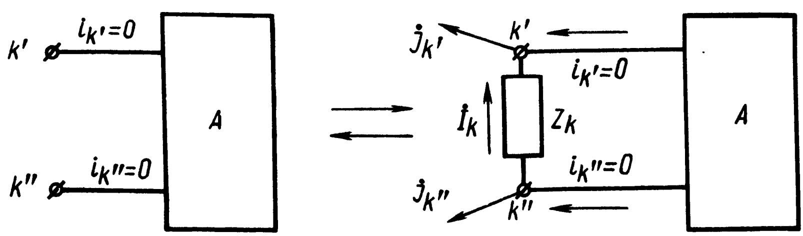

Рис. 2.

Токи в ветвях коммутированной схемы можно выразить через их значения в некоммутированной схеме и фиктивные нагрузки $\dot{J}_{k'}$, $\dot{J}_{k''}$:

$$\dot{I}_\mu = \dot{I}^*_\mu + \dot{c}_{\mu k'}\dot{J}_{k'} + \dot{c}_{\mu k''}\dot{J}_{k''}, \qquad (24)$$

где $\dot{c}_{\mu k'}$, $\dot{c}_{\mu k''}$ — коэффициенты распределения для ветви μ и узлов k', k''. Но

$$\dot{I}^*_\mu = \sum_{j=1}^{n} \dot{c}_{\mu j} \dot{J}_j. \tag{25}$$

Отсюда и из (23), (24) получаем

$$\dot{I}_\mu = \sum_{i=1}^{n} \left(\dot{c}_{\mu j} + \frac{\dot{c}_{\mu k'} - \dot{c}_{\mu k''}}{1-\dot{c}_{kk'} + \dot{c}_{kk''}} \dot{c}_{kj}\right) \dot{J}_j . \tag{26}$$

Следовательно, получена формула пересчета коэффициентов распределения от $\dot{c}_{\mu j}$ к новым $\dot{c}'_{\mu j}$:

$$\dot{c}'_{\mu j} = \dot{c}_{\mu j} + \frac{\dot{c}_{\mu k'} - \dot{c}_{\mu k''}}{1-\dot{c}_{kk'} + \dot{c}_{kk''}} \dot{c}_{kj}. \tag{27}$$

Переписывая (27) для удобства в матричном виде, имеем

$$\dot{C}' = \dot{C}_\mu + \frac{(\dot{C}_{\mu k'} - \dot{C}_{\mu k''})\dot{C}^*_k}{1-\dot{c}_{kk'} + \dot{c}_{kk''}} , \tag{28}$$

где $\dot{C}'$ — матрица коэффициентов распределения для коммутированной схемы; $\dot{C}_\mu$ — подматрица матрицы $\dot{C}$ для некоммутированной схемы, соответствующая некоммутируемым ветвям; $\dot{C}_{\mu k'}$, $\dot{C}_{\mu k''}$ — столбцы матрицы $\dot{C}_\mu$ для узлов k' и k'', являющихся соответственно начальной и конечной вершиной отключаемой k-ой ветви; $\dot{C}^*_k$ — соответствующая ей строка матрицы $\dot{C}$.

В настоящее время отлажена и работает программа формирования матрицы $\dot{C}$ методом наращивания на ЭВМ БЭСМ-4. Матрица коэффициентов распределения хранится на внешних носителях информации — магнитных барабанах.