

ЧИСЛОВОЙ МЕТОД ДЛЯ РАСЧЕТА ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННЫХ ЦИФРОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН В ЗАДАЧАХ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМАМИ

С. БЕНЕДИКТ

Кафедра Автоматизации Будапештского политехнического университета

(Поступило в печать 31 апреля 1965 г.)

1. Введение

В предыдущей статье [1] мы показали важность разработки математических методов расчета изменений токораспределения, на основании которых современные электронные цифровые машины смогли бы за время порядка секунды оценить последствия оперативных изменений режима энергосистем.

Там же мы показали, что наиболее подходящим для этой цели является так называемый метод коэффициентов токораспределения [2, 3] и доказали принципиальную возможность применения этого метода в условиях оперативного управления энергосистемами, путем замены — при исследованиях — изменений оперативной схемы приложением фиктивных узловых нагрузок.

В данной статье будет показано применение этого метода в конкретных случаях оперативного изменения режима энергосистемы.

2. Определение токораспределения в случае одновременного отключения нескольких ветвей

(Исходная схема совпадает с некоммутированной схемой)

Допустим, мы хотим определить изменения токораспределения, вызываемые одновременным выключением ветвей $k-l$, $m-n$ и $s-t$ при исходной некоммутированной схеме. Приложим при неизменной исходной схеме в узловых точках k, l, m, n, s, t фиктивные нагрузки. В результате этого, токи ветвей $k-l$, $m-n$ и $s-t$ примут следующие значения:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{kl}^H &= \dot{I}_{kl}^C + \sum_i \Delta \dot{I}_i B_{(kl)i} \\ \dot{I}_{mn}^H &= \dot{I}_{mn}^C + \sum_i \Delta \dot{I}_i B_{(mn)i} \\ \dot{I}_{st}^H &= \dot{I}_{st}^C + \sum_i \Delta \dot{I}_i B_{(st)i} \quad i = k, l, m, n, s, t. \end{aligned} \quad (2.1)$$

где $\Delta \dot{I}_i$ — фиктивная нагрузка, приложенная в i -ой узловой точке;

$\dot{I}_{kl}^C, \dot{I}_{mn}^C, \dot{I}_{st}^C$ — точки соответствующих ветвей в исходном состоянии;
 $\dot{I}_{kl}^H, \dot{I}_{mn}^H, \dot{I}_{st}^H$ — токи соответствующих ветвей после приложения фиктивных нагрузок.

Выберем величины фиктивных нагрузок так, чтобы с точки зрения токораспределения остальной части системы создалось такое положение, как будто ветви $k-l$, $m-n$ и $s-t$ отключены.

В этом случае, как было доказано в [1], векторы фиктивных токов узловых точек, лежащих на концах одной и той же ветви, равны друг другу по величине, но противоположны по направлению:

$$\Delta \dot{I}_l = -\Delta \dot{I}_k; \quad \Delta \dot{I}_n = -\Delta \dot{I}_m; \quad \Delta \dot{I}_t = -\Delta \dot{I}_s \quad (2.2)$$

Принимая во внимание (2.2), для определения неизвестных фиктивных нагрузок достаточно написать уравнения только относительно одних из двух концов отключаемых ветвей, например относительно точек k , m и s :

$$\begin{aligned} \Delta \dot{I}_k + \dot{I}_{kl}^H &= 0 \\ \Delta \dot{I}_m + \dot{I}_{mn}^H &= 0 \\ \Delta \dot{I}_s + \dot{I}_{st}^H &= 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

На основании уравнений (2.1), (2.3) и введя обозначение:

$$\Delta B_{(ab)cd} = B_{(ab)c} - B_{(ab)d}$$

для определения неизвестных токов $\Delta \dot{I}_k, \Delta \dot{I}_m$ и $\Delta \dot{I}_s$ получим следующее уравнение в матричной форме:

$$\underset{(3,3)}{\underline{\underline{A}}} \underline{x} = \underline{c} \quad (2.4)$$

где

$$\underset{(3,3)}{\underline{\underline{A}}} = \begin{bmatrix} 1 + \Delta B_{(lk)kl} & \Delta B_{(kl)mn} & \Delta B_{(kl)st} \\ \Delta B_{(mn)kl} & 1 + \Delta B_{(mn)mn} & \Delta B_{(mn)st} \\ \Delta B_{(st)kl} & \Delta B_{(st)mn} & 1 + \Delta B_{(st)st} \end{bmatrix}$$

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} \Delta \dot{I}_k \\ \Delta \dot{I}_m \\ \Delta \dot{I}_s \end{bmatrix} \quad \underline{c} = \begin{bmatrix} -\dot{I}_{kl}^c \\ -\dot{I}_{mn}^c \\ -\dot{I}_{st}^c \end{bmatrix}$$

Решение уравнения (2.4)

$$\underline{x} = \underset{(3,3)}{\underline{\underline{A}}}^{-1} \underline{c}$$

(То, что уравнение (2.4) всегда имеет одно решение, в [1] мы уже доказали

физическим путем.) Фиктивные нагрузки $\Delta \dot{I}_t$, $\Delta \dot{I}_n$ и $\Delta \dot{I}_l$ могут быть определены на основании (2.2).

При помощи фиктивных нагрузок ток произвольной ветви $o-p$ после выключения ветвей $k-l$, $m-n$, $s-t$ (в первом приближении) может быть определен следующим образом:

$$\dot{I}_{op}^H = \dot{I}_{op}^c + \sum_i \Delta \dot{I}_i B_{(op)i} \quad (2.5)$$

$$i = k, l, m, n, s, t.$$

Аналогичным способом могут быть определены изменения токораспределения, вызываемые одновременным выключением k ветвей. В этом случае для определения неизвестных фиктивных нагрузок необходимо решить линейную систему k уравнений в комплексной форме.

При выводе (2.4) токи узловых точек остальной части сети, лежащей между концами выключаемых ветвей считались постоянными, что, строго говоря неверно, поскольку при выключении ветвей изменяется также распределение напряжений. Именно поэтому токораспределение, полученное вышеуказанным путем является первым приближением действительного токораспределения. Разница между точным токораспределением и его первым приближением тем меньше, чем меньше изменения напряжений, вызываемые отключением ветвей. Точные результаты мы можем получить в результате последовательных приближений. Для вычисления второго приближения токораспределения ветвей, необходимо определить изменения напряжений, вызываемые приложением вычисленных вышеуказанным путем фиктивных нагрузок, на основании этого, изменения нагрузок узловых точек остальной сети. Далее, учитывая эти изменения, с помощью коэффициентов токораспределения некоммутированной схемы надо заново определить токи отключаемых ветвей (они уже не будут равны нулю с точки зрения остальной сети). На следующем шагу в узловых точках отключаемых ветвей приложим такие новые фиктивные нагрузки, чтобы токи отключаемых ветвей снова стали равными нулю и т. д. Вычисление продолжают до тех пор, пока изменения в нагрузках узловых точек остальной сети станут настолько малы, что ими можно будет пренебречь.

В диспетчерской службе энергосистем потребность в оценке изменений, вносимых одновременным отключением нескольких ветвей возникает при составлении календарного плана ремонта линий (в этом случае необходимо выбирать между различными комбинациями одновременного отключения линий). В этом случае, поскольку, во-первых, информации относительно исходного токораспределения основной сети носят провизорический характер, во-вторых обычно нет надобности в одновременном отключении более 2—3 ветвей, практически достаточно знание первого приближения изменений токораспределения, вызываемых отключением ветвей.

3. Определение токораспределения в случае отключения одной ветви при произвольной исходной оперативной схеме

Допустим, что исходная оперативная основная схема энергосистемы тем отличается от некоммутированной, что ветви $k-l$ и $m-n$ отключены. Предположим, что, зная токораспределение исходного режима, мы хотим определить изменения токораспределения, вызываемые отключением новой ветви (например ветви $s-t$).

Согласно ранее доказанному, данное исходное токораспределение может быть осуществлено и при некоммутированной схеме, если мы в узловых точках k, l, m, n приложим определенным образом вычисленные фиктивные нагрузки. В данном случае, нас интересует исключительно принципиальная возможность указанного преобразования, значения же этих фиктивных нагрузок нас не интересуют, поскольку исходное токораспределение нам известно.

Для того, чтобы ток ветви $s-t$ стал, а токи ветвей $k-l$ и $m-n$ остались, с точки зрения остальной части сети, равными нулю, необходимо приложить новые фиктивные нагрузки в узловых точках k, l, m, n, s, t ($\Delta \dot{I}_k, \Delta \dot{I}_l, \Delta \dot{I}_m, \Delta \dot{I}_n, \Delta \dot{I}_s, \Delta \dot{I}_t$). Ситуация, с точки зрения определения вышеупомянутых новых фиктивных нагрузок почти совпадает с ситуацией при одновременном отключении ветвей $k-l, m-n, s-t$ в случае исходной некоммутированной схемы, с той разницей, что токи ветвей $k-l$ и $m-n$ с точки зрения остальной части системы уже в исходном режиме равны нулю. Таким образом неизвестные новые фиктивные нагрузки, в данном случае также могут быть определены на основании (2.4), при условии, если мы фигурирующие там токи \dot{I}_{kl}^c и \dot{I}_{mn}^c примем равными нулю.

Аналогичным способом могут быть определены фиктивные токи в случае если в основной сети помимо отключаемой ветви имеется k отключенных ветвей (для определения фиктивных нагрузок должна быть решена линейная система $k + 1$ уравнений комплексной формы).

4. Определение токораспределения в случае изменения нагрузок узловых точек при неизменной исходной оперативной схеме

Допустим, что исходная оперативная схема тем отличается от некоммутированной, что ветви $k-l, m-n$ и $s-t$ отключены. Воспроизведем данный электрический режим при некоммутированной схеме путем приложения определенных фиктивных нагрузок, определенных из условия, чтобы токи ветвей $k-l, m-n$ и $s-t$ с точки зрения остальной части сети стали равными нулю.

Предположим теперь, что нагрузка некоторой узловой точки (номера r) изменилась. Под действием ΔI_r токи ветвей $k-l$, $m-n$ и $s-t$ с точки зрения остальной части сети между точками, k, l, m, n, s, t примут следующие значения:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{kl} &= \Delta \dot{I}_r B_{(kl)r} \\ \dot{I}_{mn} &= \Delta \dot{I}_r B_{(mn)r} \\ \dot{I}_{st} &= \Delta \dot{I}_r B_{(st)r} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Для того, чтобы токи вышеупомянутых ветвей остались равными нулю с точки зрения остальной части сети, необходимо в узловых точках k, l, m, n, s, t принять новые фиктивные нагрузки. Эти нагрузки могут быть определены на основании (2.4), если мы фигурирующие там токи $\dot{I}_{kl}^c, \dot{I}_{mn}^c, \dot{I}_{st}^c$ примем равными соответственно токам $\dot{I}_{kl}, \dot{I}_{mn}, \dot{I}_{st}$ выражаемым при помощи (4.1).

В общем случае, если в исходной оперативной схеме имеется k отключенных ветвей, для вычисления фиктивных нагрузок необходимо решить линейную систему k уравнений в комплексной форме.

Новые токи ветвей могут быть определены с помощью коэффициентов токораспределения некоммутированной схемы с учетом как действительных, так и фиктивных изменений узловых нагрузок.

5. Определение изменений, вносимых включением ветвей в случае произвольной исходной оперативной схемы

Допустим, что в исходной оперативной схеме ветви $k-l, m-n$ и $s-t$ находятся в выключенном состоянии и мы хотим определить изменения, вносимые обратным включением ветви $s-t$. Как было нами ранее доказано [1], с точки зрения токораспределения остальной части сети между узловыми точками s, t , ничего не изменится, если мы ветвь $s-t$ включим обратно и одновременно в узловых точках s и t приложим следующие фиктивные нагрузки $\Delta \dot{I}'_s, \Delta \dot{I}'_t$:

$$\Delta \dot{I}'_s = -\Delta \dot{I}'_t = \frac{\dot{U}_{st}}{Z_{st}} \quad (5.1)$$

где \dot{U}_{st} — напряжение между точками s и t до обратного включения ветви $s-t$,

Z_{st} — продольный импеданс ветви $s-t$.

Если же мы хотим определить изменения, вносимые обратным включением ветви $s-t$, то, очевидно, мы должны из нагрузок узловых точек s и t

вычесть определяемые на основании (5.1) фиктивные нагрузки $\Delta \dot{I}_s$ и $\Delta \dot{I}_t$, т. е. фиктивные изменения нагрузок узловых точек s и t в данном случае примут следующие значения:

$$\Delta \dot{I}_s = -\Delta \dot{I}_t = -\frac{\dot{U}_{st}}{Z_{st}} \quad (5.2)$$

Начиная с этого момента задача определения изменений токораспределения ничем не отличается от подобной задачи в случае когда при неизменной исходной схеме (в которой имеется две отключенных ветви: $k-l$ и $m-n$) происходит изменение нагрузок узловых точек s и t . Эти изменения равны соответственно $\Delta \dot{I}_s$ и $\Delta \dot{I}_t$ выражаемым согласно (5.2).

Поэтому решение поставленной задачи продолжается способом, показанным в предыдущей части данной статьи.

В общем случае, когда мы из k отключенных ветвей одну ветвь хотим обратно включить, для определения фиктивных токов необходимо решить линейную систему $k-1$ уравнений в комплексной форме.

6. Заключение

Таким образом, мы показали, как в различных конкретных случаях оперативного изменения режима энергосистемы путем приложения фиктивных узловых нагрузок можно избежать пересчета коэффициентов токораспределения схемы.

Для вычисления фиктивных узловых нагрузок в случае отключения ветви необходимо решить линейную систему $k+1$, в случае обратного включения ветви $k-1$, в случае изменения узловых нагрузок при неизменной оперативной схеме k уравнений в комплексной форме, где k — число отключенных ветвей в исходной оперативной схеме. Поскольку обычно k намного меньше чем r (r — общее число ветвей), поэтому расчет фиктивных нагрузок требует во много раз меньше вычислений, чем пересчитывание коэффициентов токораспределения. На основании вышеизработанного числового метода электронные цифровые вычислительные машины могут сами, без вмешательства человека быстро решить вопрос относительно того, возможно ли осуществить упомянутые оперативные изменения режима без перегрузки линий или нет. Можно доказать, что для принятия вышеупомянутого решения в случае энергосистемы примерно такого же типа и величины как энергосистема Венгрии требуется промежуток времени меньше секунды.

Резюме

Статья показывает, каким образом, метод коэффициентов токораспределения, который обладает большими достоинствами с точки зрения расчёта токораспределения сети с помощью электронных цифровых вычислительных машин, может быть применён в отдельных конкретных случаях оперативного изменения режима энергосистемы (отключение и включение ветвей, изменение узловых нагрузок при неизменной схеме) без необходимости пересчитывания коэффициентов токораспределения.

Литература

1. Исследование применимости метода коэффициентов токораспределения в задачах диспетчерской службы энергосистемы. *Periodica polytechnica. Electrical engineering* **9**, (1965).
2. ZAVORSKY, JOHN—RITTENHOUSE: *Electric Power Transmission. The Power System in the Steady State*. New York, Ronald Press, 1954.
3. GESZTI, P. O.: *Villamosművek II*. Budapest, 1962.

dr. Szvetlána BENEDIKT, Budapest. XI. Egry József u. 18.