

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА КОЭФФИЦИЕНТОВ ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ДИСПЕТЧЕРСКОЙ СЛУЖБЫ ЭНЕРГОСИСТЕМ

СВЕТЛАНА БЕНЕДИКТ

Кафедра автоматизации Будапештского политехнического университета

(Поступило 31 мая 1965 г.)

Представлено профессором Ф. Чаки

1) Постановка задачи

В последнее время всё большую актуальность приобретает вопрос применения электронных цифровых вычислительных машин для целей оперативного управления энергосистемами [1, 2, 3].

Как известно, к числу важнейших задач диспетчерской службы относится руководство оперативными изменениями схемы основной сети и нагрузок узловых точек. При принятии решений, связанных с оперативными изменениями режима системы, диспетчер должен заранее оценить, не приведут ли эти изменения к перегрузке линий электропередачи. Практическое проведение вышеупомянутой оценки чрезвычайно затрудняет то обстоятельство, что диспетчеру часто приходится очень быстро принимать решения (за время порядка секунды). За такой короткий промежуток времени диспетчер, конечно, не в состоянии точно оценить все последствия своих действий. На успешность его действий, кроме того, сильно влияют различные субъективные факторы (настроение, состояние нервной системы и т. д.)

Именно поэтому, очень большое практическое значение имело бы применение для этой цели электронных цифровых вычислительных машин. Необходимым же условием успешного применения для этой цели цифровых вычислительных машин является разработка математических методов расчёта токораспределения, на основании которых современные электронные цифровые вычислительные машины могли бы за время порядка секунды произвести оценку последствий оперативных изменений режима с точки зрения перегрузки линий электропередачи.

Из литературы известно несколько методов расчёта токораспределения [4, 5, 6, 7]. Из этих методов меньше всего математических действий требует так называемый метод коэффициентов токораспределения. Этот метод является также самым пригодным с точки зрения программирования на цифровых машинах.

Сущность этого метода заключается в следующем [4, 5].

В сложно-замкнутой сети одного напряжения, где питание происходит в одной узловой точке (эту точку в дальнейшем будем называть баланси-

рующей точкой) и где ёмкостной проводимостью линий можно пренебречь. между нагрузками ветвей и узловыми нагрузками существует следующая зависимость:

$$\dot{I}_{kl} = \dot{I}_1 B_{(kl)1} + \dot{I}_2 B_{(kl)2} + \dots + \dot{I}_{n-1} B_{(kl)n-1} \quad (1.1)$$

где n — число узловых точек сети; \dot{I}_{kl} — ток ветви, соединяющей узловые точки номера « k » и « l »; $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dots, \dot{I}_{n-1}$ — нагрузки узловых точек номера $1, 2, \dots, n-1$; $B_{(kl)1}, B_{(kl)2}, \dots, B_{(kl)n-1}$ — постоянные, характерные для данной схемы сети (при данной балансирующей точке). Эти постоянные получили название коэффициентов токораспределения.

В уравнении (1.1) фигурируют токи всех узловых точек, за исключением тока балансирующей точки.

Зная коэффициенты токораспределения, изменения токораспределения, вызываемые изменениями нагрузок узловых точек могут быть определены чрезвычайно просто на основании уравнения (1.1). Пусть, например нагрузка узловой точки номера « r » изменилась на $\Delta \dot{I}_r$. Если мы в первом приближении предположим, что $\Delta \dot{I}_i (i \neq r) = 0$, то изменение тока ветви

$$\Delta \dot{I}_{mn} = \dots + \Delta \dot{I}_r$$

На основании этого новый ток ветви $m-n$ \dot{I}_{mn}^H выражается следующим образом:

$$\dot{I}_{mn}^H = \dot{I}_{mn}^c + B_{(mn)r} \cdot \Delta \dot{I}_r$$

где \dot{I}_{mn}^c — исходный ток ветви $m-n$.

При определении второго приближения изменений токов ветвей необходимо принять во внимание вызванные $\Delta \dot{I}_r$ изменения нагрузок остальных узловых точек и т. д. В задачах, возникающих на практике, обычно достаточно знать первое приближение изменений токораспределения. При изменении схемы сети коэффициенты распределения меняются. Вследствие этого, применение уравнения (1.1) в этом случае для расчётов токораспределения становится возможным только после пересчёта коэффициентов распределения.

Из литературы [4, 5] однако известен приём, при помощи которого в одном из специальных случаев изменения схемы (когда при постоянных нагрузках узловых точек происходит отключение одной ветви) можно избежать пересчитывание коэффициентов токораспределения. Этот приём заключается в том, что при расчёте изменений токораспределения, вместо отключения ветви, в узловых точках, лежащих на концах отключаемой ветви прикладываются фиктивные нагрузки. Фиктивные нагрузки определяются из условия, чтобы ток вышеупомянутой ветви с точки зрения остальной части сети стал равным нулю.

Допустим, мы хотим определить влияние отключения ветви $m - n$ на токи других ветвей. Приложим в узловых точках m, n фиктивные нагрузки $\Delta \dot{I}_m$ и $\Delta \dot{I}_n$. Эти нагрузки, очевидно изменят токораспределение в сети, в том числе изменится ток ветви $m - n$:

$$\dot{I}_{mn}^H = \dot{I}_{mn}^C + \Delta \dot{I}_m B_{(mn)m} + \Delta \dot{I}_n B_{(mn)n}. \tag{1.2}$$

Если мы $\Delta \dot{I}_m$ и $\Delta \dot{I}_n$ так определим, чтобы удовлетворялись следующие уравнения:

$$\Delta \dot{I}_m + \dot{I}_{mn}^H = 0 \tag{1.3a}$$

$$\Delta \dot{I}_n - \dot{I}_{mn}^H = 0 \tag{1.3б}$$

тогда с точки зрения токораспределения остальной части сети между точками m и n создаётся такое положение, как будто ветвь $m - n$ отключена. Из уравнений (1.2) (1.3а), (1.3б) мы можем определить токи $\Delta \dot{I}_m$ и $\Delta \dot{I}_n$:

$$\Delta \dot{I}_m = \Delta \dot{I}_n = \frac{\dot{I}_{mn}^C}{1 + B_{(mn)m} - B_{(mn)n}} \tag{1.4}$$

где \dot{I}_{mn}^C — ток ветви $m - n$ в исходном состоянии.

Результат вышеуказанного преобразования изображён на рис. 1.1.

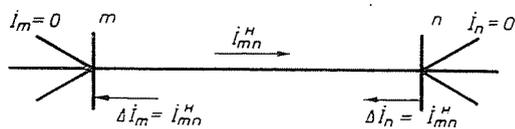


Рис. 1.1

Зная фиктивные нагрузки $\Delta \dot{I}_m$ и $\Delta \dot{I}_n$ на основании коэффициентов распределения исходной схемы легко определяются новые токи ветвей. Таким образом пересчитывание коэффициентов токораспределения, что потребовало бы большой вычислительной работы, удалось заменить вычислением одного единственного математического выражения (1.4).

Очень важно, однако, иметь ввиду, что принятие рассчитанных по формуле (1.4) фиктивных нагрузок в узловых точках, лежащих на концах отключаемой ветви, исключительно с точки зрения токораспределения и распределения напряжений сети эквивалентно отключению этой ветви. В то же время с точки зрения сопротивлений вышеупомянутой эквивалентности не существует. Из этого, однако, следует, что замена отключения ветви приложением фиктивных нагрузок в узловых точках, лежащих на концах ветви, справедлива только при определении изменений, вносимых отключением

данной ветви. В то же время при исследовании изменений режима системы, которые могут произойти после отключения этой ветви (изменение нагрузок узловых точек при неизменной схеме, отключение второй, третьей ветви и т. д., включение ветви . . . и т. д.) мы больше не имеем права использовать коэффициенты распределения исходной схемы.

В самом деле, допустим, что после отключения ветви $m - n$ снова произойдёт какое-нибудь изменение в режиме системы (например, изменится нагрузка узловой точки r). Если при исследовании влияния ΔI_r мы будем исходить из такой схемы, где действительно отключённая ветвь $m - n$ включена и, вместо этого, в узловых точках m и n приложены высчитанные по формуле (1.4) фиктивные нагрузки, то, на основании вышеуказанного, изменение тока ветви $m - n$ должно быть равным $\Delta I_r B_{(mn)r}$. В то же время, в действительности, поскольку ветвь $m - n$ отключена, ΔI_{mn} равно нулю.

Для использования метода коэффициентов токораспределения в задачах оперативного управления энергосистемами прежде всего необходимо доказать применимость этого метода в случае произвольной сложно-замкнутой схемы.

Кроме того, если бы мы захотели применить метод коэффициентов токораспределения в задачах оперативного управления энергосистемами, то, на основании вышесказанного, мы встретились бы со следующей трудностью.

Метод коэффициентов токораспределения в его оригинальной форме основывается на знании коэффициентов токораспределения исходной схемы. Основная схема энергосистемы, однако, время от времени меняется, с одной стороны, вследствие вывода линий из работы на ремонт, с другой стороны, в результате аварий. Вследствие этого в момент составления программы для цифровой вычислительной машины нельзя знать заранее, при какой исходной схеме придётся диспетчеру руководить оперативными изменениями.

На основании вышесказанного, возникла мысль так видоизменить метод коэффициентов распределения, чтобы он вместо коэффициентов токораспределения исходной оперативной схемы, которая постоянно меняется, использовал бы всегда коэффициенты токораспределения одной и той же схемы, а именно некоммутированной схемы.

В то же время возникает вопрос, нельзя ли метод коэффициентов токораспределения помимо исследования отключения ветвей и изменения узловых нагрузок использовать также для исследования включения ветвей.

Данная статья посвящена исследованию вышепоставленных вопросов.

2) Исследование применимости метода коэффициентов токораспределения в случае произвольной сложно-замкнутой сети

Исследуем вначале вышепоставленный вопрос в случае, когда ёмкостными проводимостями линий можем пренебречь.

В общем случае, в основной схеме может быть несколько уровней напряжения.

Приведём все напряжения, токи и сопротивления к общему напряжению. Выберем одну из узловых точек схемы в качестве балансирующей. Выразим напряжения остальных узловых точек схемы по отношению к напряжению этой точки. Выразим, далее, нагрузки всех узловых точек (кроме балансирующей) через токи примыкающих ветвей на основании 1-го закона Кирхгофа; в то же время токи ветвей выразим при помощи относительных напряжений узловых точек, лежащих на концах этих ветвей, и импедансов ветвей. Из решения системы этих уравнений, как не трудно доказать, получим следующую зависимость между токами узловых точек и токами ветвей:

$$\underline{I}_b = \underline{B}_{(r, n-1)} \cdot \underline{I}_y \quad (2.1)$$

где \underline{I}_b — матричный столбец токов ветвей,

\underline{I}_y — матричный столбец токов узловых точек (в нём фигурируют все узловые нагрузки, помимо нагрузки балансирующей точки),

$\underline{B}_{(r, n-1)}$ — матрица коэффициентов токораспределения.

Элементы матрицы \underline{B} выражаются следующим образом:

$$\underline{B} = [b_{ij}], \quad b_{ij} = \mathbf{B}_{(kl)j}$$

где k и l — номера узловых точек, соединяемых i -ой ветвью,

r — число ветвей сети,

n — число узловых точек.

Элементы матрицы \underline{B} — постоянные, зависящие исключительно от схемы сети, сопротивлений линий и выбора балансирующей точки.

Таким образом, в произвольной сложно-замкнутой схеме, где ёмкостными проводимостями ветвей можно пренебречь, между токами узловых точек и токами ветвей существует такого же рода зависимость, как и в том случае, для которого метод коэффициентов токораспределения был разработан.

Исследуем теперь, как видоизменится применение метода коэффициентов токораспределения в случае, когда ёмкостной проводимостью линий нельзя пренебречь.

Как известно, при исследованиях линия электропередачи может быть заменена симметричной Т-образной схемой замещения (см. рис. 2.1).

Между фигурирующими на рис. 2.1 напряжениями и токами существуют следующие зависимости:

$$\dot{I}_{mn}^{(m)} Z_T + \dot{I}_{mn}^{(n)} Z_T = \dot{U}_m - \dot{U}_n \quad (2.2)$$

$$\dot{I}_{mn}^{(n)} = \dot{I}_{mn}^{(m)} - \dot{I}_S \quad (2.3)$$

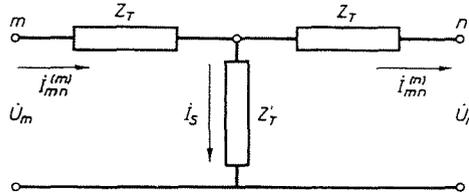


Рис. 2.1

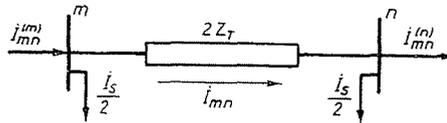


Рис. 2.2

Из сопоставления этих двух уравнений получим:

$$\dot{I}_{mn}^{(m)} = \frac{\dot{U}_m - \dot{U}_n}{2 Z_T} + \frac{\dot{I}_S Z_T}{2 Z_T} = \frac{\dot{U}_m - \dot{U}_n}{2 Z_T} + \frac{\dot{I}_S}{2}.$$

$$\dot{I}_{mn}^{(n)} = \dot{I}_{mn}^{(m)} - \dot{I}_S = \frac{\dot{U}_m - \dot{U}_n}{2 Z_T} - \frac{\dot{I}_S}{2}.$$

Введём следующее обозначение:

$$\dot{I}_{mn} = \frac{\dot{U}_m - \dot{U}_n}{2 Z_T}.$$

При этом обозначении получим следующие выражения для $\dot{I}_{mn}^{(m)}$ и $\dot{I}_{mn}^{(n)}$:

$$\dot{I}_{mn}^{(m)} = \dot{I}_{mn} + \frac{\dot{I}_S}{2} \quad (2.4)$$

$$\dot{I}_{mn}^{(n)} = \dot{I}_{mn} - \frac{\dot{I}_S}{2}. \quad (2.5)$$

На основании (2.4) и (2.5):

$$\dot{I}_{mn} = \frac{\dot{I}_{mn}^{(m)} + \dot{I}_{mn}^{(n)}}{2}. \quad (2.6)$$

Из выражений (2.4)—(2.6) видно, что с точки зрения токораспределения остальной части сети между концами линий ничего не изменится, если мы схему на рис. 2.1 видоизменим согласно рис. 2.2.

Если на всех линиях исследуемой схемы проведём вышеупомянутые видоизменения, то получим такую схему, где все нагрузки сконцентрированы в узловых точках, т. е. схему, для которой справедливость равенства (2.1) доказана.

Из вышесказанного следует, что исследование изменений узловых нагрузок при неизменной схеме в данном случае производится точно так же, как и в случае, когда ёмкостными проводимостями линий можно пренебречь. Исследование выключения линий в данном случае происходит в двух шагах. На первом шагу из нагрузок узловых точек, лежащих на концах выключаемых линий вычитаются токи $\frac{\dot{I}_S}{2}$ и исследуется действие вышеуказанного изменения на токи ветвей. На втором шагу происходит расчёт фиктивных токов, действие которых равноценно уменьшению рассчитанного по формуле (2.6) тока \dot{I}_{mn} до нуля. Этот шаг происходит точно так же как и в случае когда ёмкостной проводимостью линий пренебрегаем.

В энергосистемах, где токи $\frac{\dot{I}_S}{2}$ относительно малы, практически достаточно точные результаты получим и тогда, если мы от первого шага отвлечёмся, т. е. при исследовании предположим, что имеем дело с идеальными линиями, ёмкостная проводимость которых бесконечно мала, протекающий же по ним ток выражается формулой (2.6).

3) Доказательство возможности использования коэффициентов токораспределения некоммутированной схемы для расчётов токораспределения при произвольной исходной оперативной схеме

Рассмотрим произвольную некоммутированную основную схему энергосистемы, в которой ёмкостными проводимостями линий можно пренебречь. Выберём в ней k произвольных ветвей и докажем, что путём прибавления к нагрузкам узловых точек, расположенных по их концам некоторых определённых фиктивных нагрузок мы всегда можем получить такой режим, который с точки зрения токораспределения, а также распределения напряжений остальной сети между концами этих ветвей эквивалентен режиму, получаемому при отключении вышеупомянутых ветвей.

Докажем сначала справедливость этого утверждения, когда $k = 3$.

Допустим, что исследуемая нами оперативная основная схема (см. рис. 3.1) тем отличается от некоммутированной основной схемы, что ветви

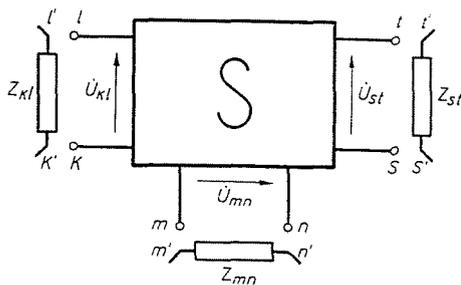


Рис. 3.1

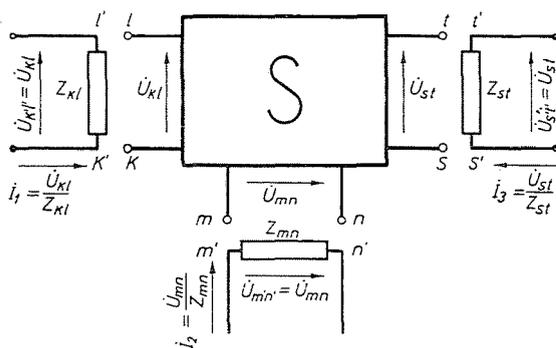


Рис. 3.2

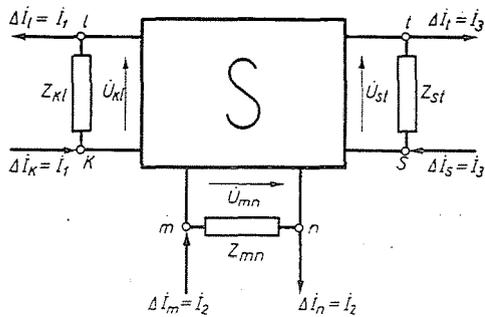


Рис. 3.3

$k - l$, $m - n$ и $s - t$ отключены. Обозначим напряжение между точками k, l через \dot{U}_{kl} , между m, n через \dot{U}_{mn} , а между s, t через \dot{U}_{st} .

Предположим, что у нас имеется три источника тока.

$$\text{Ток первого источника: } \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_{kl}}{Z_{kl}}$$

$$\text{Ток второго источника: } \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_{mn}}{Z_{mn}}$$

$$\text{Ток третьего источника: } \dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_{st}}{Z_{st}}$$

Если мы к первому источнику тока подключим ветвь $k - l$, ко второму — ветвь $m - n$, а к третьему — ветвь $s - t$, то напряжения между концами ветвей $k - l$, $m - n$, $s - t$, которые мы обозначим соответственно $\dot{U}_{k'l}$, $\dot{U}_{m'n}$ и $\dot{U}_{s't}$ примут следующие значения:

$$\dot{U}_{k'l} = \dot{U}_{kl}; \quad \dot{U}_{m'n} = \dot{U}_{mn}; \quad \dot{U}_{s't} = \dot{U}_{st}. \tag{3.1}$$

Результат преобразований изображён на рис. 3.2.

Если же мы теперь

точку k	соединим с точкой	k'
„ l	„	l'
„ m	„	m'
„ n	„	n'
„ s	„	s'
„ t	„	t'

то исследуемая нами схема превратится в некоммутированную схему, нагрузки же узловых точек k, l, m, n, s, t определённым образом изменятся (см. рис. 3.3). В то же время на основании равенств (3.1) можно заключить, что напряжения между точками k и l, m и n а также s и t не изменятся. Из этого однако следует, что как токораспределение, так и распределение напряжений в остальной части системы (S) останутся без изменений. Таким образом, в случае когда исходная схема является некоммутированной, отключение произвольных трёх ветвей — с точки зрения токораспределения, а также распределения напряжений остальной сети между концами этих ветвей — равноценно принятию определённых фиктивных нагрузок на концах упомянутых ветвей при неизменной исходной схеме.

Аналогичным образом может быть доказана справедливость этого утверждения, когда число отключённых ветвей равно k .

Это значит, что токораспределение любой оперативной схемы может быть достигнуто и при некоммутированной схеме путём приложения фиктивных узловых нагрузок. Из этого следует, что определение последствий любых изменений оперативной схемы (отключение, включение ветвей), а также изменения узловых нагрузок при произвольной неизменной оперативной схеме, не требует знания коэффициентов токораспределения исходной схемы: в вышеупомянутых расчётах могут быть успешно использованы коэффициенты токораспределения *некоммутированной* схемы. Тем самым отпадает необходимость пересчитывания коэффициентов токораспределения, что являлось основным препятствием применения метода коэффициентов токораспределения в условиях диспетчерской службы энергосистем.

4) Заключение

Подытоживая вышесказанное мы можем заключить, что метод коэффициентов токораспределения может быть успешно применён в задачах, возникающих при оперативном управлении энергосистемами, что имеет благоприятное значение с точки зрения применения цифровых вычислительных машин для автоматизации этих задач.

Резюме

Статья занимается поисками математического метода, на основании которого электронные цифровые вычислительные машины могли бы заменить диспетчера энергосистемы в функции оценки последствий изменения оперативной схемы, а также изменения нагрузок узловых точек. В связи с этим, исследуется возможность применения для этой цели метода коэффициентов токораспределения. В статье доказывается, что вышеупомянутый метод может быть успешно использован в задачах оперативного управления энергосистемами. Трудность, связанная с тем, что этот метод основан на знании коэффициентов токораспределения исходной схемы, в то же время оперативная схема энергосистемы не является постоянной, всегда может быть преодолена путём использования при расчётах фиктивных узловых нагрузок.

Литература

1. Венников, В. А., Маркович, И. М., Совалов, С. А., Тафт, В. А., Цукерник, Л. В.: Современное состояние применения вычислительной техники при эксплуатации и проектировании энергосистем; о задачах в области применения вычислительной техники при эксплуатации и проектировании энергосистем. «Электричество» 1960. №№ 11 и 12.
2. Синьков, В. М.: Некоторые перспективы применения вычислительных устройств в энергосистемах. «Электричество» 1960. № 10.
3. Венников, В. А., Цукерник, Л. В.: Разработка методов кибернетического управления объединёнными энергосистемами. Доклад на Втором Международном Конгрессе ИФАК. 1963.
4. ZAVORSKY, JOHN—RITTENHOUSE: Electric power transmission. The power system in the steady state.
5. GESZTI, P. O.: Villamosművek II. Budapest, 1962.
6. Маркович, И. М.: Режимы энергетических систем. Госэнергоиздат. 1957.
7. Глазунов: Электрические сети и системы. Госэнергоиздат. 1960.

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