Математическая модель эквивалентирования электрической сети произвольной структуры

Александров О.И.; Радоман Н.В.; Каракулько П.К.
Кафедра автоматизации производственных процессов и электротехники
Белорусский государственный технологический университет
Минск, Республика Беларусь
e-mail: sanoleg@mail.ru, feli-n@mail.ru, paulxiii@tut.by

***Аннотация.*—В докладе рассмотрены проблемы эффективного эквивалентирования сложной электрической сети с многоконтурной структурой в зависимости от условий и целей расчета режимов. Дана постановка и расчетные формулы для преобразования многоугольника в эквивалентную многолучевую звезду. Предложены конкретные формулы, позволяющие получить реальные результаты для практического использования в режимных расчетах потокораспределения в электрической сети большой сложности.**

Ключевые слова: эквивалентирование, конфигурация, энергетическая система, контуры проводимости ядер, определитель узла, определитель контуров, висячая ветвь

I. Введение

При разработке алгоритмов и программ для оперативного расчета установившегося режима электроэнергетической системы (ЭЭС) необходимо обеспечить возможность быстрого учета изменений независимых режимных параметров в проэквивалентированной части схемы.

Рассматриваются три способа эквивалентирования:

1) выбирается конфигурация ЭЭС, для которой составляется расчетная схема с учетом всех основных факторов, существенно влияющих на искомый результат;

2) представление схемы упрощенной расчетной моделью при сильном влиянии отдельных узлов на оставшуюся эквивалентную часть;

3) принимается схема, для которой любые изменения оказывают настолько малое влияние на конечный результат, что ими можно пренебречь.

В соответствии с этими способами выделяют три зоны эквивалентирования, которые можно назвать соответственно *внутренней*, *промежуточной* и *внешней*. Сам выбор границы зон зависит от целенаправленности постановки и исследования решаемых задач. В сложной ЭЭС часто возникают задачи расчета режима с различными коммутационными состояниями. В этом случае наиболее подходящими являются методы эквивалентирования, основанные на использовании обобщенных параметров схем, которых дают полную информацию о структуре сети и ее элементах. При таком соответствии между схемой электрических соединений и схемой замещения электрических соединений и схемой замещения электрической сети матрицы узловых сопротивлений Zy и коэффициентов распределения С позволяют легко учесть все необходимые коммутационные изменения. Изменения сопротивлений, в том числе и из-за изменения частоты переменного тока, влияет на значения элементов матрицы узловых сопротивлений. В таких ситуациях корректируются соответствующие матрицы. В докладе приведен метод приближенного эквивалентирования электрических систем, обеспечивающий приведение любой заданной расчетной схемы электрической сети к простейшей конфигурации многолучевой звезды. Метод обеспечивает в заданном режиме работы электрической сети результат, который может быть использован как приближенный при небольших отклонениях от этого режима.

II. Математическая модель

Эквивалентирование многоконтурных сложных схем питающих электрических сетей выполняется на основе топологических преобразований, определяющих независимые проводимости многоугольника – проводимости ядер. Затем составляются системы контурных уравнений для четного и нечетного количества ребер многоугольника. На основании этих систем были получены обобщенные формулы для нахождения функций определителя каждого контура и любого узла. Полученные обобщенные формулы позволяют реализовать программную реализацию необходимых преобразований любого n-угольника в n-лучевую звезду.

Эффективность алгоритма обеспечивается простотой квазиэквивалентирования контуров, сводящегося к решению небольших систем линейных уравнений специальной структуры. Метод позволяет проводить декомпозицию графа на любые подграфы с последующим квазиэквивалентированием граничных контуров между парами подграфов.

Прямое преобразование многолучевой звезды в полный электрический многоугольник было предложено в работе [1]. Что касается обратного преобразования n-угольника в n-лучевую звезду, то оно возможно лишь при определенных условиях. В докладе предложены формулы для получения постоянных узлов многоугольника [2].

Для нечетного многоугольника выражение будет выглядеть следующим образом:

$$ny_i = D(n) \Big/ d(i,n)\,, \qquad (1)$$

для четного

$$ny_i = \begin{cases} \dfrac{\Delta(n)a_n}{d(i,n-1)}, & i = 1,2,\ldots,n-1 \\ \dfrac{\Delta(n)a_n}{d(i,n+1)}, & i = n \end{cases} \qquad (2)$$

где $D(n)$ – функция определения контура, зависящая от n; $d(i,n)$ – то же, i-го узла контура, зависящая от i и n; $\Delta(n) = D(n-1) + a_n d(n\text{-}1,n\text{-}1)$; a_n – n-я независимая проводимость.

Независимым проводимостям многоугольника – проводимостям ядер присвоены обозначения $a_1,a_2,\ldots,a_n$. В случае нечетного n в качестве ядра удобно выбрать контур $a_1,a_2,\ldots,a_n$, при прохождении которого по часовой стрелке последовательно встречаются 1-й, 2-й,…, n-й лучи эквивалентной звезды, как показано на рис. 1, а. Для четного n целесообразно использовать контур из $(n-1)$ ветвей и висячую ветвь a_n, что иллюстрирует рис. 1, б.

С учетом (1) и (2) в простейшем случае (при $n = 3$) можно записать:

$$\begin{cases} a_1 = y_1 y_3 / y_\Sigma\,, \\ a_2 = y_1 y_2 / y_\Sigma\,,, \\ a_3 = y_2 y_3 / y_\Sigma\,, \end{cases} \qquad (3)$$

где $y_\Sigma = y_1 + y_2 + y_3$.

III. Топологические преобразования

Решив систему (3) относительно y_1, y_2, y_3, получим:

$$\begin{cases} y_1 = D(3)/a_3\,; \\ y_2 = D(3)/a_1\,;\,, \\ y_3 = D(3)/a_2\,, \end{cases}$$

где $D(3) = a_1a_3 + a_2a_1 + a_3a_2$.

Для $n = 7$ (опуская выкладки):

$$\begin{cases} y_1 = D(7)/(a_3a_5a_7); & \\ y_3 = D(7)/(a_5a_7a_2); & y_2 = D(7)/(a_4a_6a_1); \\ y_5 = D(7)/(a_7a_2a_4); & y_4 = D(7)/(a_6a_1a_3); \\ y_7 = D(7)/(a_2a_4a_6), & y_6 = D(7)/(a_1a_3a_5); \end{cases}$$

где $D(7) = a_1a_3a_5a_7 + a_2a_4a_6a_1 + a_3a_5a_7a_2 + a_4a_6a_1a_3 + a_5a_7a_2a_4 + a_6a_1a_3a_5 + a_7a_2a_4a_6$.

$D(7)$ состоит из n слагаемых, каждое из которых представляет собой $(n-1)/2$ сомножителей, причем первому множителю соответствуют последовательные проводимости с индексами от 1 до n.

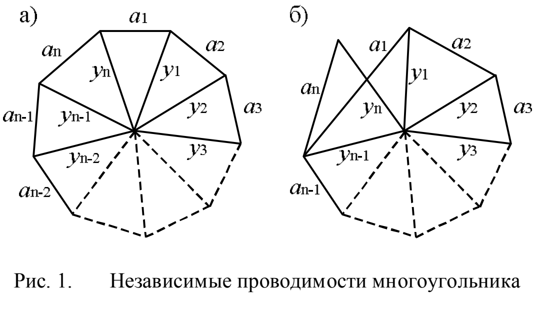

Рис. 1. Независимые проводимости многоугольника

Что касается остальных $(n-1)/2$ сомножителей, то каждый последующий индекс множителя больше предыдущего на 2. Это будет в том случае, когда номер полученной проводимости не превышает n. Если же последующий индекс превышает n, то множителю присваивается индекс, увеличенный по сравнению с предыдущим на $(2-n)$. На основании этих соображений получена обобщенная формула для нахождения функции определителя контура:

$$D(n) = \left(\sum_{k=1}^{n} a_k \prod_{x=1}^{\frac{(n-1)}{2}} a_x \right), \qquad (4)$$

где $x = \begin{cases} k + 2p - 1, & k \le n - 2p + 1, \\ k + 2p - 1 - n, & k > n - 2p + 1. \end{cases}$

Определитель i-й $d(i,n)$, как видно из рассмотренных случаев, представляет собой только одно слагаемое, состоящее из произведения $(n-1)/2$ сомножителей, причем номер первого сомножителя, то есть индекс проводимости равен $(i+2)$ если $(i+2) \le n$, а при $(i+2) > n$ индексу присваивается значение $(i+2-n)$. Номер каждого последующего сомножителя (как и в случае с $D(n)$) будет больше на две единицы. Для данного индекса выполняются такие же условия. Из этих рассуждений можно записать обобщенную формулу для нахождения функции определителя i-го узла:

$$d(i,n) = \prod_{z=1}^{\frac{(n-1)}{2}} a_z\,, \qquad (5)$$

где $z = \begin{cases} i + 2q, & i \le n - 2q; \\ i + 2q - n, & i > n - 2q. \end{cases}$

С помощью полученных формул (4) и (5), а так же (1) и (2) без труда программно реализуется преобразование многоугольника в n-лучевую звезду.

При расчете потокораспределения в сложной ЭЭС был предложен упрощенный метод использующий процедуру размыкания контуров. На основе этой процедуры был построен безитерационный алгоритм с использованием узловых и контурных матричных уравнений [3]. Предложенные методы были программно реализованы и могут быть использованы для экавивалентирования электрической сети произвольной структуры.

[1] A. Rozen, “A new network theorem,” Journal of the Institution of Electircal Engineers, Vol. 62, London, pp. 33–39, 1924.

[2] О. И. Александров, А. А. Петрович. Исследование топологических формул для преобразования электрического многоугольника в эквивалентную звезду. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. Мн.: Энергетика. – 2000. – № 3, С. 40 – 48.

[3] О. И. Александров. Исключеник контуров в безытеративном расчете потокораспределения. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. Мн.: Энергетика. – 1993. – № 1 – 2, С. 36 – 44.