УДК 621.311

Н. В. Радоман, аспирант (БГТУ)

МЕТОД РАСЧЕТА ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В СЛОЖНОЙ СЕТИ С ПОМОЩЬЮ СЛАБОЗАПОЛНЕННЫХ МАТРИЦ

В статье рассмотрены вопросы построения алгоритмов для преобразования структуры топологических матриц, применяющихся для расчета потокораспределения в сложных энергосистемах. Приведено описание двух алгоритмов, использующих различные методы уплотнения разреженных матриц. Первый алгоритм использует перебор нумерации ветвей и узлов, начиная с внешнего контура и выделяя в качестве базисного узел с максимальным числом ветвей. Второй алгоритм построен на основании оптимального перебора нумерации узлов с сохранением первоначального базисного узла. Алгоритмы были использованы для топологического исследования схемы высоковольтных линий электропередач Белорусской энергосистемы.

The paper considers questions of the construction of algorithms to transform the structure of topological matrixes, which are used to calculate the flow distribution calculation in complex electric power systems. The description of two algorithms using different methods of the consolidation of sparse matrixes is provided. The first algorithm uses search of numbering of lines and nodes, begins with an external contour and allocates as basic the node with the maximum number of lines. The second algorithm is built on the basis of optimum search of numbering of nodes with preservation of the initial basic node. Algorithms were used for topological research of ehe scheme of high-voltage power lines of the Belarusian electric power system.

Введение. Развитие современных энергосистем требует разработки новых методов их расчета и анализа, поскольку прежние способы уже непригодны по причине качественных и количественных изменений параметров. Для анализа сложных электрических сетей наиболее часто требуется выполнение расчетов режимов, которые применяются при краткосрочном и долгосрочном планировании работы электростанций и энергоемких промышленных предприятий, играющих роль потребителей-регуляторов, эксплуатации и управлении, оценке надежности в случае отключения какого-либо элемента, а также при определении режимов, оптимальных по технико-экономическим критериям. Кроме того, расчеты электрических режимов выполняются для исследования аварийных режимов, в том числе статической и динамической устойчивости, выбора настраиваемых параметров системной автоматики, токов короткого замыкания и т. д.

Однако применение обращенных форм нелинейных уравнений установившихся режимов электроэнергетических систем требует предварительного определения топологических матриц узловых сопротивлений или контурных проводимостей, значительно ускоряющих итерационный процесс расчета режима. Особенно это проявляется при проведении многократного расчета параметров схемы электрической сети при их вариации. В то же время при расчете схем большой размерности эти топологические матрицы по своей структуре содержат большое число нулевых элементов и являются слабозаполненными (разреженными). Во многих случаях слабозаполненные матрицы можно преобразовать и привести к квазидиагональному (ленточному) виду [1]. Если рассматриваемая электроэнергетическая система включает в себя большое количество узлов потребления и производства электроэнергии, то во время записи информации о схеме возникают прямоугольные матрицы размерности $[n \times n]$ или $[(n-1) \times m]$ (n – количество узлов, m – ветвей), многие элементы которых равны нулю. С помощью преобразования записи информации о схеме сети (изменение нумерации узлов и ветвей) возможно проведение концентрации ненулевых элементов разреженной матрицы вблизи главной диагонали, что повысит эффективность, а также скорость расчетов.

Основная часть. Для проведения вычислений необходимо построить граф электроэнергетической системы. Граф может быть описан матрицей соединений (первой матрицей инциденций). Она составляется с помощью перечня узлов и соединяющих их ветвей и имеет прямоугольный размер (число строк соответствует числу узлов, а число столбцов равно числу ветвей в электрической сети) [2]. При выделении базисного (опорного) узла можно составить редуцированную матрицу соединений узлов и ветвей, которая не содержит строки, соответствующей этому узлу.

Рассмотрим один из алгоритмов для приведения информации о схеме к наиболее желаемому виду (k-алгоритм). Для этого узлы и ветви электрической сети должны быть пронумерованы соответствующим образом.

1. В рассматриваемой схеме выбираем опорный узел и присваиваем ему номер 1. В исследуемой схеме выделяем внешний контур, который

будет состоять из наибольшего числа ветвей. Если этот узел не входит во внешнюю цепь, то находим ветвь, которая непосредственно связывает этот узел и внешнюю цепь.

2. Нумерацию внешней цепи нужно начинать с выбранного ранее узла. При этом номера присваиваются поочередно как по часовой стрелке, так и против нее, увеличивая номер узла на одну или две единицы (если схема содержит большое количество узлов, то разность между узлами можно увеличить). В ходе нумерации желательно прийти к такому варианту, чтобы максимальный и минимальный номер входили во внешнюю цепь.

3. Если в схеме есть соединения в виде «звезды», то в центре должен находиться наименьший номер узла из тех, которые находятся в вершинах, при этом они не должны отличаться более чем на три единицы. Также выделяем в схеме узлы, образующие ветви «треугольника» или «многоугольника», при этом нумерация не должна отличаться более чем на три-четыре единицы (для больших схем – разница может быть больше).

4. После того, как все узлы пронумерованы, необходимо пронумеровать ветви. Для этого необходимо, чтобы увеличение суммы номеров, с которыми связана ветвь, соответствовало увеличению нумерации ветвей, при этом должна соблюдаться закономерная последовательность чередования меньшей суммы и нескольких больших.

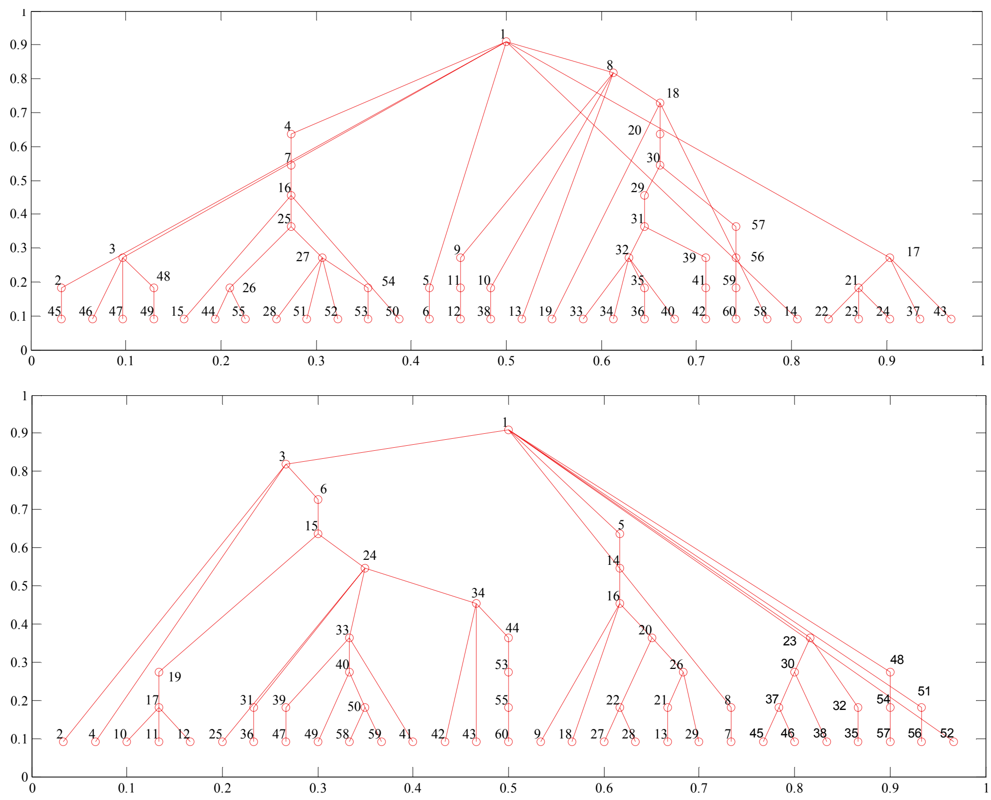
В улучшенном алгоритме, назовем его γ-алгоритмом, для получения слабозаполненной матрицы соединений с группировкой элементов вокруг главной диагонали необходимо пронумеровать узлы и ветви электрической сети следующим образом.

1. Необходимо присвоить базисному узлу номер один, выделить внешний контур электроэнергетической системы, при необходимости связать его с опорным узлом.

2. Сгруппировать все узлы на схеме в области, определить количество узлов в каждой из них и выделить соответствующее число номеров.

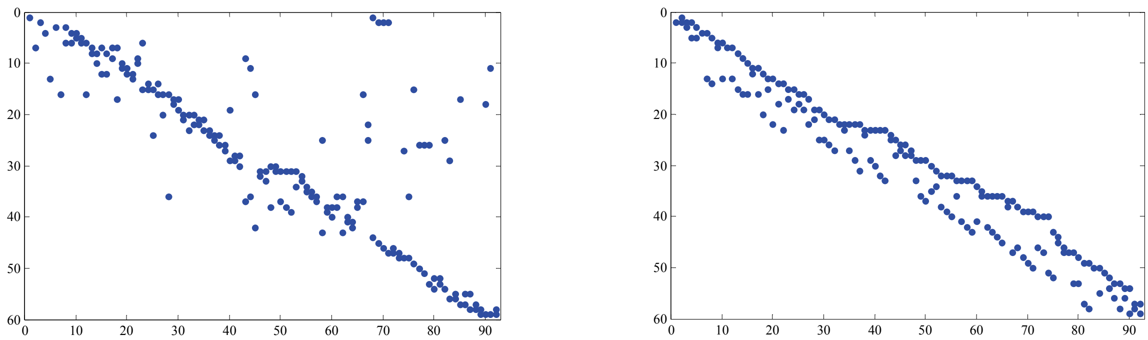
3. Области необходимо нумеровать последовательно, начиная и заканчивая теми, которые связаны с базисным узлом максимальным количеством ветвей, так как этот узел является с математической точки зрения связанным, и соответствующая строка в матрице инциденций редуцируется. При этом выделяются узлы из разных секторов, которые связаны ветвями между собой. Для этих узлов из выделенных множеств номеров для разных областей следует выбрать наиболее близкие.

4. После того, как всем узлам был присвоен определенный номер, необходимо пронумеровать ветви. Они нумеруются в зависимости от того, какие узлы они связывают, от минимального номера к максимальному.



а, *б*

Рис. 1. Граф эквивалентированной электроэнергетической системы:
а – при использовании *k*-алгоритма; *б* – при использовании γ-алгоритма



а *б*

Рис. 2. Визуализация распределения элементов первой матрицы инциденций:
а – при использовании *k*-алгоритма; *б* – при использовании γ-алгоритма

Но прилегающим к базисному узлу ветвям присваивается не первый номер, а один из тех, в которых минимальным является противоположный узел.

После эквивалентирования схемы Белорусской энергосистемы информация о результирующей сети была преобразована следующим образом. Схема сложно-замкнутой сети состоит из 60 узлов и 92 ветвей, территориально расположенных как в Республике Беларусь, так и в Российской Федерации, на Украине и в Литве. В рамках Белорусской энергосистемы выделено 44 основных узла и 67 ветвей. На рис. 1 представлен граф электроэнергетической системы при использовании двух представленных алгоритмов, а на рис. 2 – визуализация распределения элементов результирующей матрицы соединений узлов и ветвей.

Таким образом, топологические матрицы приводятся к специальному виду для повышения эффективности и скорости расчета. Далее рассмотрим методику оперативного расчета потокораспределения в сложно-замкнутой сети, разработанную с использованием полученных преобразованных матриц коэффициентов распределения. Приведенный способ расчета режима электрической сети представляет собой алгоритмизацию классического метода наложения основного потокораспределения мощностей на распределение дополнительных потоков от потерь, разнесенных по концам участков. Уравнения приведены в обращенной форме с помощью матрицы коэффициентов распределения потоков C:

$$I = CJ + YE, \qquad (1)$$

где I – столбцовая матрица токов в ветвях схемы; J – вектор-столбец узловых токов; Y – комплексная матрица узловых собственных и взаимных проводимостей схемы замещения электрической сети; E – вектор-столбец ЭДС в ветвях схемы; а также с помощью матрицы узловых сопротивлений Z:

$$U_{\Delta} = ZJ + DE, \qquad (2)$$

где U_{Δ} – столбцовая матрица напряжений в узлах схемы относительно базисного; D – матрица коэффициентов распределения напряжений.

Поскольку $D = C^{*}$, а кроме того,

$$Y = (CM + 1)diagY_b,$$

где M – первая матрица инциденций; $diagY_b$ – диагональная матрица проводимостей ветвей, то формулы (1) и (2) преобразуются следующим образом:

$$I = CJ + (CM + 1)diagY_b E; \qquad (3)$$

$$U_{\Delta} = ZJ + C^{*}E. \qquad (4)$$

Заключение. При использовании теоретических методов были получены топологические матрицы, приведенные к квазидиагональному (ленточному) виду. Учет слабой заполненности узловых и контурных матриц собственных и взаимных сопротивлений позволит создать более эффективные алгоритмы для расчета потокораспределения в сложной электроэнергетической системе. Разработанные алгоритмы были использованы для моделирования графа реальной высоковольтной сети Белорусской энергосистемы.

Литература

1. Тьюарсон, Р. Разреженные матрицы / Р. Тьюарсон. – М.: Мир, 1977. – С. 190.

2. Брамеллер, А. Слабозаполненные матрицы: анализ электроэнергетических систем / А. Брамеллер, Р. Аллан, Я. Хэмэм. – М.: Энергия, 1979. – С. 192.

Поступила 07.03.2013