

УЧЕТ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ В РАСЧЕТАХ ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Канд. техн. наук Ю. Н. ВЕПРИК

Гомельский политехнический институт

Расчеты потокораспределения выполняются, как правило, многократно при изменениях нагрузки в узлах сети и коммутационных изменениях схемы для проверки надежности и экономичности ее работы. Выполнение таких многократных расчетов для одной и той же энергосистемы при изменениях в конфигурации сети и нагрузок узлов может быть осуществлено одним из двух возможных способов. Первый — расчет потокораспределения для каждой конфигурации сети и для каждого уровня нагрузок каждый раз заново, второй — использование при каждом новом расчете результатов, полученных в предыдущих расчетах для других нагрузок или для другой конфигурации сети. Второй путь при наличии соответствующих алгоритмов представляется более целесообразным. Причем в основе таких алгоритмов, особенно при коммутационных изменениях сети, должен быть учет топологических свойств сети.

Целесообразность применения метода Гаусса и его модификаций для решения линейризованных уравнений сети на каждом шаге итерационных методов расчета потокораспределения можно считать общепризнанной [1, 2]. Однако эффективность этого метода при применении к расчетам электрических сетей снижается из-за того, что при исключении неизвестных или приведении слабозаполненной матрицы коэффициентов узловых или контурных уравнений к треугольному виду появляются новые ненулевые элементы [3]. Попытки снизить их количество приводят к усложнению алгоритма. Преодоление этих трудностей также представляется возможным на основе учета топологических свойств сети.

Топологическими свойствами и характеристиками графа электрической сети, о необходимости учета которых будет идти речь в дальнейшем, являются число связанности (количество независимых контуров), дерево и хорды графа. Граф электрической сети содержит, как правило, разомкнутую, т. е. не содержащую контуров, часть («висячие» ветви) и замкнутую. Для учета этих свойств графа при выполнении алгоритма исключения Гаусса необходимо провести топологический анализ с целью выделения разомкнутой и замкнутой части графа сети, а в замкнутой части — хорд графа. На основе результатов такого анализа матрицу узловых проводимостей сети можно представить в виде

$$Y = Y_1 + \Delta, \quad (1)$$

где Y — матрица узловых проводимостей сети;

Y_1 — матрица узловых проводимостей этой же сети после удаления из нее всех хорд (дерево схемы);

Δ — матрица, содержащая все хорды графа электрической сети.

Топологический анализ одновременно с выделением дерева и хорд графа позволяет установить также порядок исключения неизвестных и выполняется в следующей последовательности.

1. Подсчитывается число ветвей, примыкающих к каждому из N узлов сети (количество ненулевых элементов в каждом столбце матрицы Y), и из этих чисел формируются соответствующий массив размерностью N .

2. Намечается порядок исключения узлов разомкнутой части схемы (начиная с «висячих» ветвей).

3. В оставшейся после удаления всех «висячих» ветвей замкнутой части схемы удаляется одна из ветвей (хорда) и намечается порядок исключения всех «висячих» ветвей, образовавшихся при размыкании соответствующего контура.

4. Действия п. 3 повторяются до тех пор, пока не будут удалены все хорды.

В результате выполнения операций пп. 1—4 выделяются дерево и хорды схемы (матрицы Y_1 и Δ) и формируется массив, определяющий порядок исключения неизвестных при решении уравнений с матрицей (1) методом Гаусса. Описанный алгоритм топологического анализа схемы сети более прост и менее трудоемок, чем алгоритмы определения оптимального порядка исключения неизвестных [3] без размыкания контуров.

Выражение (1) можно представить также в виде

$$Y = Y_1 (E + Y_1^{-1} \Delta), \quad (2)$$

где E — единичная матрица;

Y_1^{-1} — матрица, обратная для Y_1 .

Тогда матрица, обратная для Y , может быть найдена по формуле

$$Y^{-1} = (E + Y_1^{-1} \Delta)^{-1} Y_1^{-1}. \quad (3)$$

Решение исходной системы узловых уравнений электрической сети

$$YU = J \quad (4)$$

при этом получает вид

$$U = (E + Y_1^{-1} \cdot \Delta)^{-1} Y_1^{-1} J. \quad (5)$$

Принимая во внимание, что узловые уравнения и решение для разомкнутой схемы (с удаленными хордами) имеют при тех же заданных токах вид (соответственно)

$$Y_1 U_1 = J; \quad (6)$$

$$U_1 = Y_1^{-1} J, \quad (7)$$

уравнение (5) можно записать

$$U = (E + Y_1^{-1} \cdot \Delta)^{-1} U_1, \quad (8)$$

где U_1 — вектор напряжений в узлах, полученный решением уравнений (6) разомкнутой сети;

U — вектор напряжений в узлах, соответствующий решению исходной системы узловых уравнений (4).

При расчете потокораспределения итерационными методами, например методом Ньютона — Рафсона, на каждом шаге итерационного процесса вместо уравнения (4) решаются линеаризованные уравнения баланса мощностей в узлах. Матрица Якоби при этом имеет ту же структуру, что и матрица Y , поэтому все сказанное выше о матрице узловых проводимостей Y в полной мере относится и к матрице Якоби.

Таким образом, решение линеаризованной системы уравнений произвольной сложноразомкнутой сети на каждом шаге итерационного процесса можно получать следующим образом: решить систему уравнений (7) для соответствующей разомкнутой сети, затем полученный вектор узловых напряжений U разомкнутой сети умножить на матрицу, обратную для $(E + Y_1^{-1} \Delta)$ в соответствии с (8).

На этом пути отпадает необходимость в поиске оптимального порядка исключения неизвестных методом Гаусса для минимизации числа новых ненулевых элементов матрицы Y . Тем более, что поиск оптимального порядка исключения неизвестных настолько трудоемок, что в наиболее широко эксплуатируемых в настоящее время программах расчета потокораспределения не реализован. В то же время при расчете разомкнутой сети порядок исключения определяется просто — начиная с узлов, соответствующих «висячим» ветвям, а новые ненулевые элементы при этом вообще не появляются.

Что же касается матрицы $(E + Y_1^{-1} \Delta)$, то при определении обратной для нее матрицы не возникает каких-либо затруднений при соответствующей организации вычислительного процесса и учете особенностей ее структуры. Последние заключаются в том, что ненулевые элементы в этой матрице имеются только на диагонали (единицы) и в нескольких столбцах, количество которых определяется количеством разомкнутых контуров в исходной схеме. Применение алгоритма Гаусса к матрице такой структуры также не приводит к появлению новых ненулевых элементов. При использовании для обращения матрицы Y_1 разомкнутой сети алгоритмов факторизации нужные столбцы матрицы Y_1^{-1} легко можно получить, пользуясь элементами матриц-сомножителей. Алгоритм расчета матрицы

$$(E + Y_1^{-1} \cdot \Delta)^{-1}$$

на каждом шаге можно сделать еще более простым, если переход от разомкнутой сети к замкнутой выполнять, замыкая контуры по одному.

Описанный алгоритм легко модифицируется для учета результатов предыдущих расчетов при изменении схемы, нагрузок сети. В основе расчета лежит формула (8) с той лишь разницей, что в качестве U_1 в этом случае используется вектор напряжений в сети до коммутации, Y_1 — матрица узловых проводимостей сети до коммутации, а Δ — матрица, отражающая изменения в схеме при коммутации.

Основные положения изложенного выше алгоритма учета топологических свойств сети реализованы в виде программы для ЦВМ на алгоритмическом языке Фортран. Опыт расчетов с использованием программы подтверждает целесообразность применения этого алгоритма.

Положительный эффект, достигаемый при внедрении топологического анализа в расчете потокораспределения, сводится в основном к следующему: отпадает необходимость в определении оптимального порядка исключения неизвестных при решении уравнений со слабозаполненными матрицами методом Гаусса; при размыкании контуров легко определяется такой порядок исключения неизвестных, при котором новые ненулевые элементы в слабозаполненной матрице коэффициентов разомкнутой сети вообще не появляются, обеспечивается возможность учета результатов предыдущих расчетов при коммутационных изменениях в схеме.