

О РАСЧЕТЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

А.Н. Михайлов, С.Е. Иконников

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева
Тел. 88342-47-86-91, e-mail: mih-an@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается вопрос применимости алгоритма Голдберга-Тарояна Push-Relabel к расчету пропускной способности электрической сети, приводятся данные компьютерного эксперимента.

Ключевые слова: алгоритм, электрическая сеть, фидер, граф, поток.

Современный диспетчерский центр по управлению электрическими сетями городского или районного масштаба осуществляет непрерывный контроль за состоянием объектов – линиями электропередач, трансформаторными подстанциями, распределительными и секционирующими пунктами. Информация об этом в графической форме наглядно экспонируется автоматизированной мнемосхемой электросети на мониторы компьютеров и панно из жидкокристаллических панелей.

Реляционная объектная модель графа электрической сети [1] универсальным образом учитывает топологию и технологические свойства составляющих ее объектов. Расширить функциональность этой модели определением пропускной способности сегмента электрической сети можно за счет специальных топологических алгоритмов.

В центре диспетчерского управления часто приходится принимать решение об оперативном переключении в сети электроснабжения. Информация о пропускной способности электрической сети необходима для принятия решения о присоединении к ней новой мощности, т.е. о допустимости оперативного подключения - передачи части нагрузки с одного участка сети на другой.

Сегмент сети или фидер – это множество объектов сети, электрически соединенных в данный момент времени. Пропускная способность фидера – это максимальное значение силы тока, который данный сегмент сети может пропустить для потребителей электрической энергии. Пропускная способность фидера ограничивается пропускной способностью элементов сети.

Если производить подключение потребителя или оперативное переключение без расчета пропускной способности электрической сети, то это может привести к аварийному выходу из строя ее элементов. Обычно для предотвращения аварии ставят защитные элементы. Но даже их срабатывание приводит к длительному отсутствию электричества у потребителей.

Возьмем для примера сегмент электрической цепи с тремя трансформаторными подстанциями (ТП) под номерами 33, 532, 533 (рис. 1).

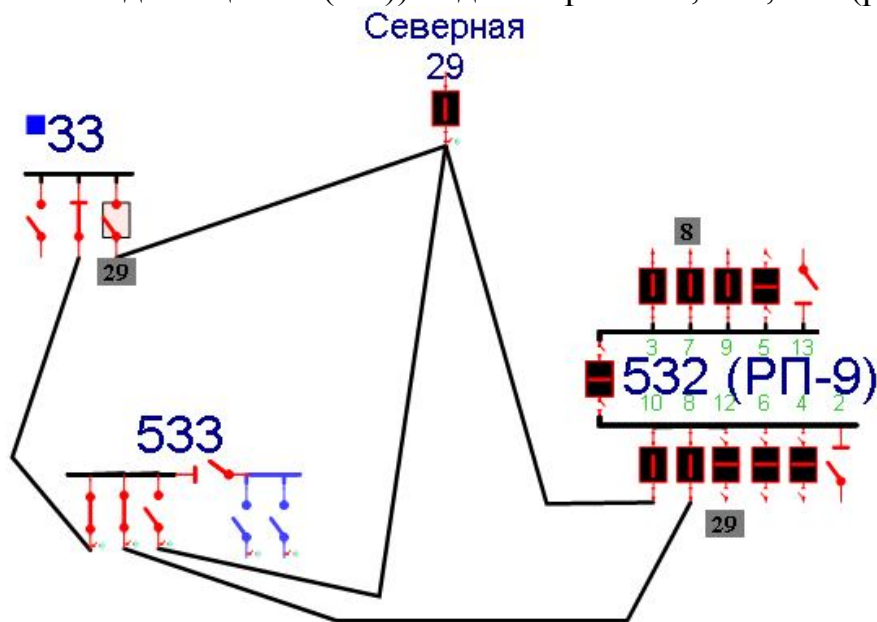


Рис. 1 – Пример участка электрической цепи

Источником электроэнергии для них является центр питания (ЦП) «Северная». ТП и ЦП соединены посредством ЛЭП, изображенных на рисунке в виде ломаных прямых. В каждом из ТП имеется силовой трансформатор напряжения. К нему подключаются потребители электроэнергии. Ячейка и ЛЭП являются составными объектами. Их пропускная способность будет равна минимальной пропускной способности составных элементов.

Представленный фрагмент электрической сети есть не что иное, как фидер. Конфигурация сети при переключениях постоянно трансформируется, поэтому фидер должен динамически изменяться.

Если представить фидер в виде направленного графа (рис. 2), то задачу расчета пропускной способности сети можно свести к задаче нахождения максимального потока.

Задача о максимальном потоке изучается сравнительно недавно. Интерес к ней обусловлен широким практическим применением – на коммуникационных, транспортных, электрических сетях, при моделировании различных процессов физики и химии, в некоторых операциях над матрицами, для решения родственных задач теории графов и даже для поиска Web-групп в Internet. Алгоритмы Диница и Карзанова, как и исследования Форда и Фалкерсона, внесли огромный вклад в решение данной проблемы. На основе их методов 15 лет достигались наилучшие оценки быстродействия алгоритмов. В 1986 г. появился новый метод, который был разработан А.В. Голдбергом и Р.Е. Таряном и получил название Push-Relabel. Для нахождения максимального потока, он использует предпотоки и метки, изменяемые во время работы алгоритма. Push-Relabel алгоритмы очень эффективны, и исследуются до сих пор. В 1997 г. А.В. Голдберг и С. Рао предложили алгоритм, присваивающий дугам неединичную длину. Это самый современный из алгоритмов.

Асимптотическая оценка его быстродействия превзошла $O(nm)$, где n и m – количество вершин и ребер соответственно [2]. Этот алгоритм может быть использован для расчета пропускной способности фидера, если определенным образом модифицировать топологию его графа.

Вершинам графа сопоставлены ЦП и ТП, ребрам – совокупность объектов. В ребро могут быть включены в разных ситуациях ячейки, ЛЭП и трансформаторы. Например, в ребро 1–2 будут входить ЛЭП и ячейка, принадлежащая ТП-33. Каждому ребру назначена пропускная способность, равная минимальной из его элементов. Граф является направленным, и позиция обозначения пропускной способности определяет направление ребра. Значение пропускной способности в одном направлении может отличаться от значения в обратном.

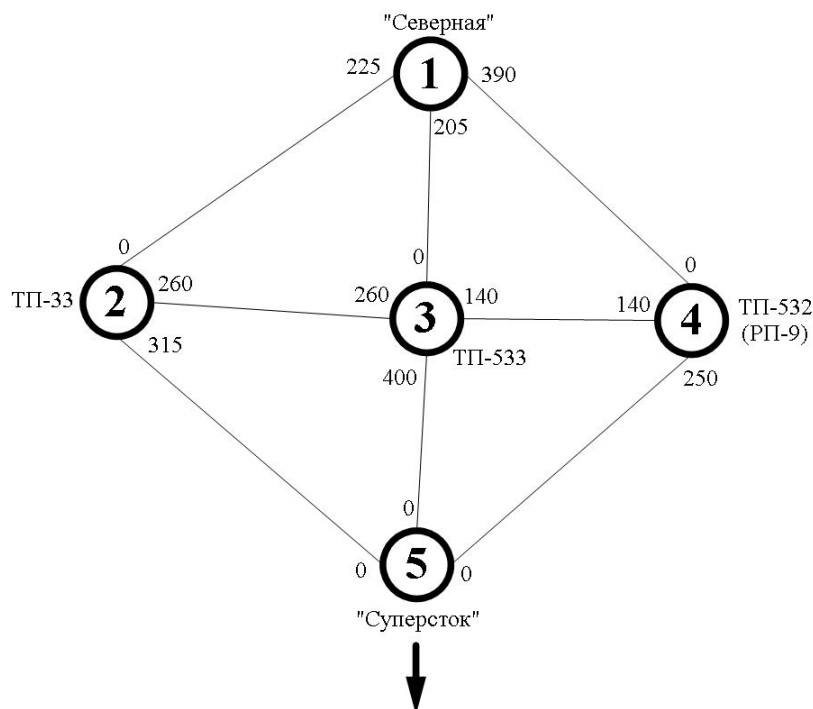


Рис. 2 – Представление электрической сети в виде графа

Необходимо дополнить данный граф еще одной вершиной – суперстоком, и добавить ребра от стоков в новой вершине. В данном примере понятие суперстока эквивалентно понятию потребителя.

Обычно ребрам, которые идут от стоков к суперстоку, присваивается пропускная способность, равная ∞ , чтобы они не влияли на результат, но в данном случае правильней назначить им пропускную способность, равную мощности трансформаторов, так как именно они являются конечными элементами в цепочке от источника к суперстоку. После перечисленных топологических преобразований задача нахождения максимального потока, которая определяет оптимальную пропускную способность (т.е. максимальный поток) между источником и стоком (в нашем случае суперстоком) модифицирована для расчета максимальной пропускной способности. Задача с несколькими источниками электрического тока сводится к данной путем добавления одного общего суперисточника.

Алгоритм Push-Relabel ищет сквозные пути от источника к стоку. Каждый найденный сквозной путь обладает пропускной способностью. Найденный поток «вычитается» из графа в прямом направлении и «прибавляется» в обратном. Тем самым получается остаточный граф. Далее поиск осуществляется уже по остаточному графу до тех пор, пока сквозных потоков уже не останется. Особо интересен момент, когда алгоритм доходит до тупиковой вершины, из которой перейти дальше нельзя. Приходится возвращаться назад. Таким образом, алгоритм может вернуться в самый исток. Именно тогда он и прекратит свою работу.

Программная реализация алгоритма осуществлена с использованием универсальной объектной модели графа электрической сети [1]. Введен новый класс TMaxFlowProcessor. У данного класса единственный видимый метод - он возвращает значение максимального потока. График зависимости скорости алгоритма от количества вершин и дуг представлен на Рис. 3.

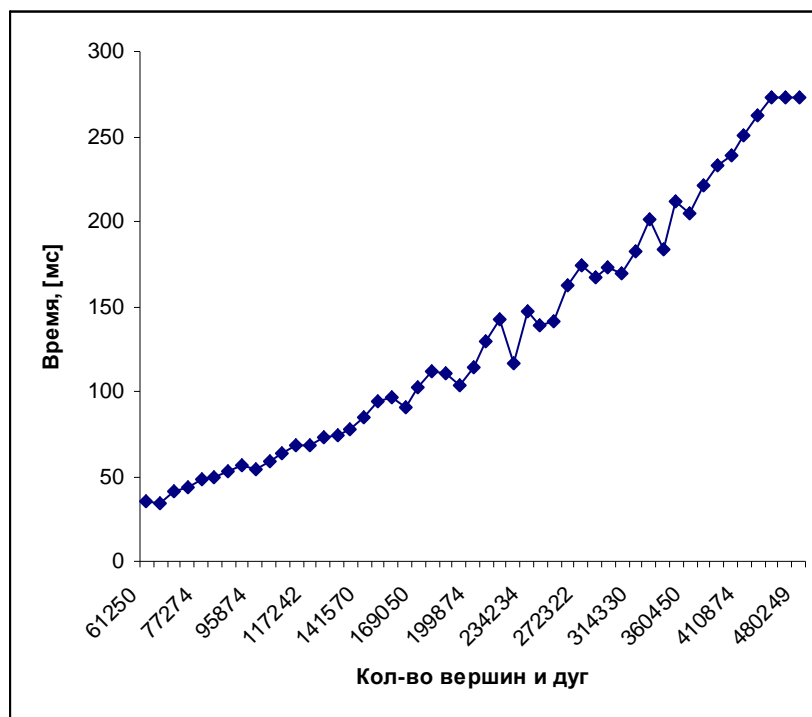


Рис. 3 – Скорость работы алгоритма

Данное испытание проводилось на плотном графе, т.е. каждая вершина была связана со всеми остальными. Веса дугам присваивались случайным образом в диапазоне от 1 до 1000. Количество вершин и дуг постепенно увеличивалось в цикле. По оси абсцисс откладывается произведение количества дуг и количества вершин. Для каждого из значений по оси абсцисс испытание проводилось сто раз, и на графике отображено среднее значение времени, которое было затрачено алгоритмом на вычисление максимального потока. Как видно из графика, скорость возрастает линейно, что соответствует асимптотической оценке производительности $O(nm)$.

По оси ординат обозначено время в миллисекундах. Результаты записывались в базу данных, откуда импортировались в Microsoft Excel, в котором строился данный график.

Выводы

1. Алгоритм Push-Relabel для расчета пропускной способности сегмента электрической сети обеспечивает быстроедействие, необходимое для его применения в автоматизированных системах управления городской диспетчерской службы распределения электроэнергии.

2. Реализация алгоритма в виде шаблона объектной модели электрической сети обеспечивает ее расширяемость и масштабируемость.

Список использованной литературы

1. Михайлов А. Н. Разработка универсальной объектной модели графа посредством тестирования / А. Н. Михайлов, С. А. Ф. Федосин // Материалы XIII Научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов Морд. гос.ун-та им. Н. П. Огарева. В 2 ч. – Саранск, 2008. – Ч.2: Естеств. науки. – С. 289 – 296.

2. Алгоритмы нахождения максимального потока. – URL: <<http://algotlist.ru/maths/graphs/maxflows/>>

3. Сик Дж. С++ Boost Graph Library. Библиотека программиста: пер. с англ. / Дж. Сик, Л. Ли, Э. Ламсдэйн. – СПб.: Питер, 2006. – 304 с.

Сведения об авторах

Михайлов Андрей Владимирович, аспирант кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева, тел. 88342-47-86-91, e-mail: mih-an@yandex.ru.
Научный руководитель – к.т.н., профессор Федосин С.А.

Иконников Сергей Евгеньевич – доцент кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева, тел. 88342-24-66-70, e-mail: ise@mesk.ru