

УДК 519.8

Д.Е. Шапошников, М.Н. Ушакова

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ  
НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ ИЕРАРХИЧЕСКИХ  
РАСПРЕДЕЛЕННЫХ КАНАЛЬНЫХ СИСТЕМ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева

Целями разработки моделей и методов принятия решений являются формирование концепции электроэнергетических сетей, то есть иерархических распределенных канальных систем (ИРКС) в электроэнергетике; применение и адаптация сетевых потоковых моделей для моделирования ЭЭС при планировании, анализе и эксплуатации. В статье предлагаются обоснованные математические модели и вычислительные процедуры для планирования нагрузки электроэнергетической сети. Методы и алгоритмы основаны на сетевых потоковых моделях и методах оптимизации. Результаты работы могут быть применены в отрасли энергетики при планировании нагрузки и оценки эффективности работы электроэнергетической сети.

*Ключевые слова:* электрические распределенные сети, графовые модели, сетевые потоковые модели, линейное программирование.

В современной научной литературе отмечается, что изменение организационных форм собственности и формирование рыночных условий обусловили возникновение для энергетических компаний новой системы требований стейкхолдеров (акционеров, законодателей, регулирующих органов, потребителей, общественных и экологических организаций), суть которых состоит в повышении надежности электроснабжения, снижении операционных издержек, повышении доходов инвесторов, снижении численности персонала и др. [1].

С другой стороны, развиваются и принципиально новые подходы, в которых ведущая роль отводится ядру электроэнергетической системы – электрической сети как структуре, обеспечивающей надежность и эффективность связи генерации и потребителя. Современные технические средства корректировки параметров электрических сетей вместе с новыми системами сбора, передачи и обработки информации, быстродействующими программами оценки состояния (текущего режима) и прогнозирования будущих узких мест энергосистемы, а также гибкой системой управления (сочетание централизованного и локального управления) всеми ее элементами способны вывести электроэнергетику на качественно новый уровень. Реализация этой концепции существенно повысит надежность и экономичность функционирования и развития ЭЭС России, улучшит качество обслуживания потребителей электрической энергии при удешевлении поставляемой электроэнергии и сопутствующих услуг [2].

В настоящее время важной задачей является создание интегрированной, саморегулируемой, распределенной системы электроснабжения, обеспечивающей автоматическое управление электросетями и объединяющей энергетические, информационные и финансовые потоки в едином канале по силовым цепям.

Основной концептуальной чертой данного подхода является использование сетевых потоковых моделей для моделирования работы электроэнергетической сети, а также для управления её конфигурацией и развитием. Сетевые потоковые модели предназначены для моделирования системы доставки потребительского ресурса (электроэнергии) по системе географически распределенных каналов и узлов от источников (генераторов) к потребителям (абонентам). Описывая в данном случае электроэнергетическую сеть в виде математического графа, состоящего из множества вершин (узлов) и дуг (каналов), можно построить систему математических моделей распределенной электроэнергетической сети для оптимизации её структуры и организации работы.

Распределенная электроэнергетическая сеть является многоуровневой в зависимости от распределяемой мощности и напряжения [2]. В распределительной сети первого уровня узлы нагрузки представляют собой распределительные пункты 20 кВ, а в сети второго уровня узлы являются подстанциями 220 кВ, третий уровень – 500 кВ и выше.

Наиболее подходящей концепцией для потокового моделирования многоуровневых электроэнергетических сетей является концепция иерархических распределенных канальных систем (ИРКС), основные характеристики которой заключаются в следующем.

1. *ИРКС состоит из узлов и каналов передачи ресурса (электроэнергии).* В электроэнергетических сетях узлы и каналы предназначены для преобразования и передачи электрической мощности соответственно.

2. *Каждый узел сети может иметь несколько потребителей ресурса (абонентов).* Абоненты, которые присоединены к узлу, имеют известные потребности в ресурсах.

3. *Каждый узел может иметь несколько входящих и/или исходящих каналов.* Направление движения ресурса в канале может меняться в процессе управления сетью, в том числе, в реальном времени.

4. *Каждый узел может иметь соединение с узлом вышестоящего уровня.* В электроэнергетических сетях это означает, что теоретически каждый узел может соединяться каналом передачи электроэнергии с вышестоящим уровнем иерархии, который выступает в данном случае в роли генератора (источника электроэнергетической мощности).

5. *Общее количество входящих и исходящих каналов в каждом узле не может превышать трех.* В это количество включается и канал от вышестоящего уровня, если он присутствует.

6. *Каждый канал обладает ограничениями на пропускную способность (минимальная и максимальная передаваемая электрическая мощность),* при этом, в частности, минимально допустимая мощность может отсутствовать, то есть быть равной нулю.

ИРКС можно представить в виде структуры, в которой сеть каждого напряжения представлена в виде плоскости. В случае распределенных электрических сетей плоскости имеют соединения в узлах нагрузки 500/220/20 кВ.

Общая схема графа, моделирующего ИРКС, представлена на рис. 1.

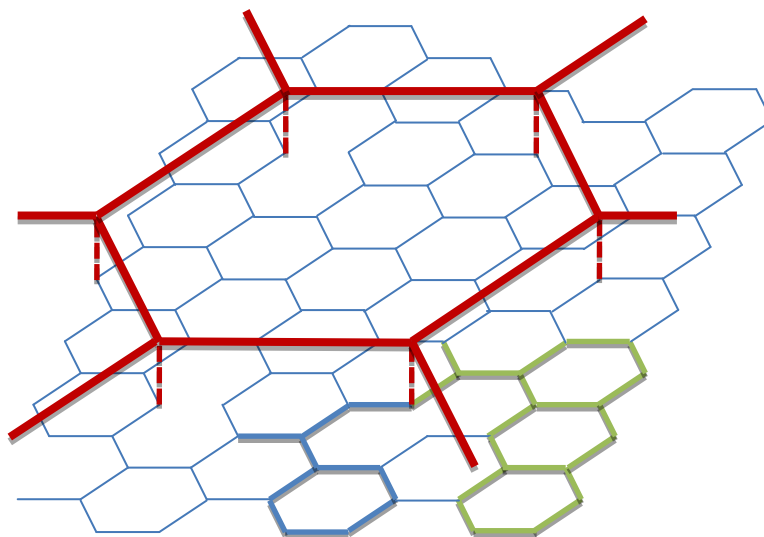


Рис. 1. Общая схема графа, моделирующего ИРКС

Таким образом, ИРКС представляет собой многослойный граф, подграфы каждого слоя в котором являются (чаще всего) планарными, что повышает их иллюстративность и соответствует реальной конфигурации сети, географически распределенной по некоторой

ограниченной территории. Планарность не является сколько-нибудь обязательным требованием, так как реально граф ИРКС планарным не является даже в теории.

В силу перечисленных особенностей, необходимо рассматривать и осуществлять раздельное планирование и управление функционированием сети для каждого слоя иерархии. Кроме, как уже было отмечено, каналы ИРКС в общем случае принадлежат разным владельцам с различными интересами и являются различными по длине, стоимости и характеристикам. Все это необходимо учитывать при распределении нагрузки на них.

Будем рассматривать ориентированный граф  $G(V, E)$ , описывающий иерархическую сетевую каналную систему. Граф  $G(V, E)$  представляет собой мультиграф с несколькими иерархическими подграфами (слоями)  $G^s(V^s, E^s)$ ,  $s = 1, \dots, S$ .

Потребители узла являются:

- конечными потребителями (в последнем слое иерархии  $s = S$ );
- потребителями нижележащего слоя иерархии  $s = 1, \dots, S - 1$ .

Последнее свойство позволяет анализировать и оптимизировать слои ИРКС независимо.

Дуги в данной модели могут быть ненаправленными и т передавать ресурс в двух направлениях (зависит от текущего состояния сети). При этом везде в сети соблюдается баланс количества генерируемого, передаваемого и потребляемого ресурса

Введем следующие обозначения:

- генераторы (интерфейсы к верхнему уровню):
  - $G_i, i = 1, \dots, m$ , – генераторы (интерфейсы);
  - $g_i, i = 1, \dots, m$ , – количество генерируемой мощности;
- узлы передачи / потребления:
  - $N_j, j = 1, \dots, n$ , – узлы передачи и потребления;
  - $c_j, j = 1, \dots, n$ , – потребление абонентов в данном узле;
- каналы передачи (дуги в графе):
  - $D_k, k = 1, \dots, K$ , – канал передачи ресурса;
  - $d_k, k = 1, \dots, K$ , – нагрузка на канал передачи ресурса;
- соединение канала и узла:
  - $D_+(N_j)$  – множество каналов-поставщиков ресурса в узел;
  - $D_-(N_j)$  – множество транзитных каналов узла.

Пример топологии и обозначений приведен на рис. 2.

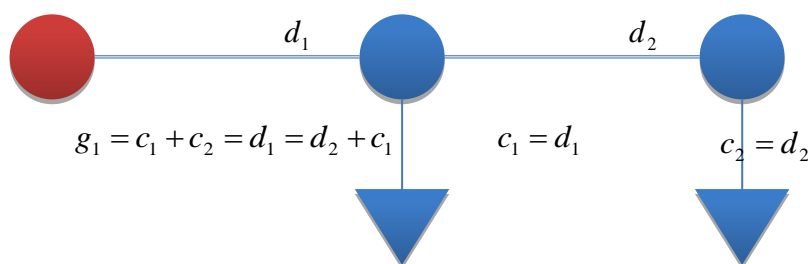


Рис. 2. Пример топологии и обозначений

Ограничения области допустимых значений в данной модели включают следующие соотношения.

1. Ограничения на пропускную способность канала:

$$d_k \leq d_k^+, k = 1, \dots, K.$$

2. Уравнение общего баланса генерации-потребления по всей сети:

$$\sum_{i=1}^m g_i = \sum_{j=1}^n c_j.$$

То есть количество генерируемого (вводимого на данный иерархический уровень) ресурса должно полностью потребляться присоединенными к данной сети абонентами.

3. Уравнение баланса узла:

$$\sum_{k \in D_+(N_j)} d_k = \sum_{l \in D_-(N_j)} d_l + c_j$$

или

$$\sum_{k \in D_+(N_j)} d_k - \sum_{l \in D_-(N_j)} d_l - c_j = 0.$$

То есть, количество поставляемого в узел ресурса равно потреблению в узле и транзиту из узла.

Показатели работы сети и нагрузки на сеть имеют следующий вид.

1. Общая нагрузка на сеть.

Нагрузку на сеть характеризует вектор  $d = (d_1, \dots, d_K)$ . Данный векторный показатель является интегральным, то есть, характеризующем всю сеть в совокупности.

2. Загрузка отдельного узла  $j \in \{1, \dots, n\}$ .

Данный показатель представляет собой характеристику загрузки узла и равен количеству ресурса, проходящего через узел в единицу времени (транзитная мощность плюс местное потребление):

$$t_j = \sum_{k \in D_+(N_j)} d_k = \sum_{l \in D_-(N_j)} d_l + c_j.$$

3. Загрузка канала  $k \in \{1, \dots, K\}$ .

Представляет собой величину  $d_k$ .

4. Загрузка генератора (интерфейса)  $i \in \{1, \dots, m\}$ .

Представляет собой величину  $g_i$ .

Общая нагрузка на сеть – характеристика, важная с точки зрения административного деления. Показатель загрузки узла важен с точки зрения характеристики оборудования. Загрузка канала является величиной, определяющей финансовый доход владельцев канала.

Важной системной характеристикой, определяющей взаимодействие и сочетание взаимнопротиворечивых интересов владельцев каналов может служить предпочтительность пропуска ресурса через канал  $k$ , которую обозначим через  $z_k$ . Оценка предпочтительности может определяться стоимостью, длиной, сложностью, предпочтительностью, мощностью, современностью или другими характеристиками. Данная оценка и все стоимости являются внешними и неизменными величинами с точки зрения математической модели.

Цель макроэкономической системы – распределить возможность получения доходов от транзита ресурса в интересах каждого субъекта экономической деятельности (в данном случае – операторов-владельцев):

$$d_i \rightarrow \max_{d \in D_d}.$$

Один из обоснованных методов такого распределения – равномерность получения доходов владельцам каналов при функционировании системы (критерий Гермейера):

$$\max_{d \in D_d} \min_{1 \leq j \leq n} d_j.$$

Система может также должна учитывать экономические интересы и технические требования вышестоящего уровня – равномерность нагрузки на генераторы. Это может быть также реализовано при помощи максиминного критерия:

$$\max_{d \in D_d} \min_{1 \leq i \leq m} t_i.$$

Как известно, максимизация с использованием данного обобщенного критерия оптимальности приводит к эффективному решению (Подиновский, Ногин, 1982).

В случае применения  $z_i$  как оценки предпочтительности пропуска ресурса через канал  $k$  целью макроэкономической системы будет являться распределение возможности получения доходов от транзита ресурса в интересах каждого субъекта экономической деятельности (в данном случае – операторов-владельцев):

$$d_i / z_i \rightarrow \max_{d \in D_d}.$$

Один из обоснованных методов такого распределения – равномерность получения доходов владельцам каналов при функционировании системы (критерий Гермейера):

$$\max_{d \in D_d} \min_{1 \leq j \leq n} d_i / z_i.$$

Величины (коэффициенты)  $1/z_i$  могут быть использованы в качестве весовых коэффициентов в обобщенном критерии оптимальности.

Как известно, максимизация с использованием данного обобщенного критерия оптимальности также приводит к эффективному решению [3].

При предположении, что:

- 1) ограничения снизу на нагрузку каналов отсутствуют;
- 2) все каналы являются направленными,

решение данной задачи может быть получено при решении следующей задачи линейного программирования:

$$\max v;$$

$$d_k / z_k \geq v, k = \overline{1, K};$$

$$\sum_{k \in D_+(N_j)} d_k = \sum_{l \in D_-(N_j)} d_l + c_j, j = \overline{1, n};$$

$$\sum_{i=1}^m g_i = \sum_{j=1}^n c_j;$$

$$d_k \geq 0, k = \overline{1, K};$$

$$g_i \geq 0, i = \overline{1, m}.$$

В случае, если для некоторых  $k \in K' \subseteq K$  ограничения сверху на нагрузку каналов не выполняются:

$$d_k > d_k^+, k \in K',$$

то для решения исходной задачи можно применить следующий алгоритм.

#### Алгоритм 1

1. Решаем исходную задачу без ограничений на пропускную способность каналов (дуг).
2. Если при этом нагрузка всех каналов удовлетворяет ограничениям сверху, то задача решена (конец работы алгоритма).
3. Выбираем произвольный  $k' \in K'$ .
4. К ограничениям задачи 1 добавляем ограничение  $d_{k'} = d_{k'}^+$ .
5. Из ограничений задачи 1 исключаем ограничение  $d_{k'} / z_{k'} \geq v$ .
6. Переходим к п. 1 (повторно решаем задачу).

Данные модели и методы были применены для решения задач анализа и планирования нагрузки на электрическую распределенную сеть и показали эффективность методик и применимость подходов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (ГК № 16.516.11.6063 от 28.04.2011 г.).*

#### Библиографический список

1. **Кобец, Б.Б.** Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid / Б.Б. Кобец, И.О. Волкова. – М.: ИАЦ Энергия, 2010. – 208 с.
2. **Соснина, Е.Н.** Топология городских распределенных интеллектуальных электрических сетей 20 кВ // Е.Н. Соснина, А.Б. Лоскутов, А.А. Лоскутов // Промышленная энергетика. 2012. №5. – С. 11–17.
3. **Подиновский, В.В.** Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: Наука, 1982. – 256 с.
4. **Лазарев, Е.А.** Генетические алгоритмы оптимизации сети передачи данных / Е.А. Лазарев, Д.Е. Шапошников, П.В. Мисевич // Системы управления и информационные технологии, 2011, №4 (46). С. 59–63.

*Дата поступления  
в редакцию 05.10.2012*

**D.E. Shaposhnikov, M.N. Ushakova**

#### **ELECTRICAL DISTRIBUTION NETWORKS MODELLING BASED ON THE CONCEPT OF HIERARCHICAL DISTRIBUTION CHANNEL SYSTEM**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

**Purpose:** The development of decision-making models and methods are the concept power networks formation.

**Design / Methodology / Approach:** The conception of the hierarchically distributed channel systems in electric power industry, application and adaptation of the network flow models for simulation of Electric power networks in planning, analysis and exploitation.

**Findings:** The mathematical models and computational procedures for capacity planning of the power grid. The methods and algorithms are based on network flow models and methods of optimization.

**Originality/value:** Findings of this work can be used in the area of commercial electrical power distribution, generation and metering in the planning and evaluation of load efficiency. This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, as part of government contract from October 11 2011, № 16.526.12.6016The results can be applied to the energy sector in the planning and evaluation of load efficiency power grid.

*Key words:* electrical distribution network graph models, network flow models, linear programming.