

Моделирование электрических распределительных сетей на основе концепции иерархических распределенных канальных систем

Шапошников Д. Е., канд. физ.-матем. наук, Ушакова М. Н., магистрант

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Показана необходимость разработки моделей и методов принятия решений для формирования концепции электроэнергетических сетей как иерархических распределенных канальных систем (ИРКС), а также применения и адаптации сетевых потоковых моделей для моделирования ЭЭС при планировании, анализе и эксплуатации. Предложены обоснованные математические модели и вычислительные процедуры с целью планирования нагрузки электроэнергетической сети. Методы и алгоритмы основаны на сетевых потоковых моделях и методах оптимизации. Результаты могут быть применены в электроэнергетике при планировании нагрузки и оценке эффективности работы сетей.

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

Изменение организационных форм собственности и формирование рыночных условий обусловили возникновение для энергетических компаний новой системы требований стейкхолдеров (заинтересованных сторон: акционеров, законодателей, регулирующих органов, потребителей, общественных и экологических организаций), суть которых состоит в повышении надежности электроснабжения, снижении операционных издержек, повышении доходов инвесторов, уменьшении численности персонала и др. [1].

Одновременно развиваются 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 ин-

формации, быстродействующими программами оценки состояния (текущего режима) и прогнозирования будущих узких мест энергосистемы, а также с 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 при удешевлении поставляемой электроэнергии и сопутствующих услуг [2]. Реструктуризация электроэнергетики, рыночные условия ее функционирования вносят свои особенности и требуют создания клиентно-ориентированной отрасли, обеспечения более надежного электроснабжения потребителей, привлечения последних к участию в процессе управления режимами работы энергосистемы. Электрическая сеть из пас-

сивного элемента транспорта и распределения электроэнергии должна превратиться в активный элемент с параметрами и характеристиками, изменяющимися в зависимости от режимов работы энергосистемы.

Сегодня важной задачей является создание интегрированной, саморегулируемой распределительной системы электроснабжения, обеспечивающей автоматическое управление электросетями и объединяющей энергетические, информационные и финансовые потоки. Основная концептуальная черта данного подхода — использование сетевых потоковых моделей для моделирования работы электроэнергетической сети, а также для управления ее конфигурацией и развитием. Эти модели предназначены для моделирования системы доставки потребительского ресурса (в данном случае — электроэнергии) по системе географически распределенных каналов и узлов от источников (генераторов) к потребителям (абонентам). Описывая электроэнергетическую сеть в виде математического графа, состоящего из множества вершин (узлов) и дуг (каналов), можно построить систему математических моделей распределенной электроэнергетической сети для оптимизации ее структуры и организации работы.

Распределительная электроэнергетическая сеть является многоуровневой (в зависимости от распределяемой мощности и напряжения) [2]. В сети первого уровня узлы нагрузки представляют собой распределительные пункты 20 кВ, в сети второго уровня — подстанции 220 кВ, в сети третьего уровня — подстанции 500 кВ и выше.

Наиболее подходящей 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 энергии соответственно.

2. *Каждый узел сети может иметь несколько потребителей (абонентов)* с известными потребностями в ресурсах.

3. *Каждый узел может иметь несколько входящих и/или исходящих каналов.* Направление движения ресурса в канале может изменяться 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 иерархическим уровнем, который выступает в данном случае в роли “генератора”.

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

6. *Каждый канал обладает ограничениями по пропускной способности (минимальной и максимальной передаваемой электрической энергии).* При этом, в частности, ограничение по минимально допустимой энергии может отсутствовать.

ИРКС можно представить как структуру, в которой сеть каждого напряжения представлена в виде плоскости. В случае распределительных электрических сетей плоскости имеют соединения в узлах нагрузки 500/220/20 кВ. Таким образом, ИРКС представляет собой многослойный граф, подграфы каждого слоя в котором чаще всего планарны, 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 не планарен даже в теории.

В связи с отмеченными особенностями необходимо рассматривать и осуществлять раздельное планирование и управление функционированием сети для каждого слоя иерархии. Кроме того, каналы ИРКС в общем случае принадлежат разным владельцам с различными интересами и отличаются по длине, стоимости и другим характеристикам. Все это следует учитывать при распределении между ними нагрузки.

Рассмотрим ориентированный граф $G(V, E)$, описывающий иерархическую сетевую канальную систему. Он представляет собой мультиграф с несколькими иерархическими подграфами (слоями) $G^s(V^s, E^s)$, $s = 1, \dots, S$. Потребители узла:

конечные потребители (в последнем слое иерархии $s = S$);

потребители нижележащего слоя иерархии ($s = 1, \dots, S - 1$).

Это позволяет анализировать и оптимизировать слои ИРКС независимо.

Дуги в данной модели могут быть ненаправленными, т. е. передавать ресурс в двух

направлениях (в зависимости 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 энергии;

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 каналов и узла:

$D_+(N_j)$ — множество каналов — поставщиков ресурса в узел;

$D_-(N_j)$ — множество транзитных каналов узла.

Ограничения области допустимых значений в данной модели включают следующие соотношения:

1. Ограничения по пропускной способности канала

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

2. Уравнение общего баланса генерации-потребления по всей сети

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

показывает, что количество генерируемого (вводимого на данный иерархический уровень) ресурса должно полностью потребляться присоединенными к данной сети абонентами.

3. Уравнение баланса узла

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

или

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

т. е. 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 $d = (d_1, \dots, d_K)$.

Данный векторный показатель является интегральным, т. е. показателем, характеризующим нагрузку на всю сеть в совокупно-

сти. Обозначим через D_d множество допустимых значений этого вектора нагрузки. Структура D_d определяется всеми вышеописанными ограничениями модели.

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

Этот показатель равен количеству ресурса, проходящего через узел в единицу времени (транзитная мощность плюс местное потребление):

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

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

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

Нужно отметить, что 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 его владельцев.

Важной системной характеристикой, определяющей взаимодействие и сочетание взаимно-противоречивых интересов владельцев каналов служит предпочтительность пропуска ресурса через канал k , которую обозначим через z_k . Оценка предпочтительности может определяться стоимостью, длиной, сложностью, мощностью, современностью или другими характеристиками. Эта оценка и все стоимости являются внешними и неизменными величинами для математической модели.

Цель макроэкономической системы — распределить возможность получения доходов от транзита ресурса в интересах каждого субъекта экономической деятельности (в данном случае — операторов-владельцев). Каждый владелец канала (инвестор) стремится максимизировать получение дохода от пропуска ресурса (электроэнергии) в условиях функционирования всей распределительной системы:

$$d_k \rightarrow \max_{d \in D_d}, \quad k = 1, \dots, K.$$

Один из обоснованных методов такого распределения нагрузки между операторами при функционировании системы — равномерность получения доходов владельцами каналов (критерий Гермейера) $\max_{d \in D_d} \min_{1 \leq k \leq K} d_k$.

Система также должна учитывать экономические интересы и технические требования вышестоящего уровня — равномерность нагрузки на генераторы. Это может быть также

реализовано при помощи максиминного критерия $\max_{d \in D_d} \min_{1 \leq i \leq m} g_i$.

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

При применении z_k как оценки предпочтительности пропуска ресурса через канал k целью макроэкономической системы является распределение возможности получения доходов от транзита ресурса в интересах каждого субъекта экономической деятельности (в данном случае — операторов-владельцев):

$$d_k/z_k \rightarrow \max_{d \in D_d}, \quad k = 1, \dots, K.$$

Аналогично равномерность взвешенных значений доходов также может характеризоваться критерием Гермейера, поскольку коэффициенты $1/z_k$ могут быть использованы в качестве шкалирующих коэффициентов в обобщенном критерии оптимальности $\max_{d \in D_d} \min_{1 \leq k \leq K} d_k/z_k$.

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

При предположениях: 1) — ограничения снизу на нагрузку каналов отсутствуют и 2) — все каналы являются направленными решение исходной задачи может быть получено при решении следующей задачи линейного программирования:

$$\begin{aligned} & \max v; \\ & d_k/z_k \geq v, \quad k = 1, \dots, K; \\ & \sum_{k \in D_+(N_j)} d_k = \sum_{l \in D_-(N_j)} d_l + c_j, \quad j = 1, \dots, n; \\ & \sum_{i=1}^m g_i = \sum_{j=1}^n c_j; \end{aligned}$$

$$d_k \geq 0, \quad k = 1, \dots, K;$$

$$g_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, m.$$

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

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

для решения исходной задачи можно применить следующий алгоритм:

1) решаем исходную задачу без ограничений по пропускной способности каналов (дуг);

2) если при этом нагрузка всех каналов удовлетворяет ограничениям сверху, то задача решена (конец алгоритма);

3) выбираем произвольный $k' \in K'$;

4) к ограничениям исходной задачи добавляем ограничение $d_{k'} = d_{k'}^+$;

5) из ограничений исходной задачи исключаем ограничение $d_{k'}/z_{k'} \geq v$;

6) переходим к п. 1 — повторно решаем задачу.

Рассмотренные модели и методы были применены для решения задач анализа и планирования нагрузки на электрическую распределенную сеть. Результаты показали их эффективность.

Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью предполагает наличие централизованной системы управления для контроля функционирования и управления параметрами ее работы при участии в управлении и учете интересов потребителей и владельцев сети. Данный подход позволяет, с одной стороны, обеспечить равномерность нагрузки на сеть и, следовательно, снизить перегрузки и предаварийные ситуации, а с другой стороны, — учесть интересы владельцев сети как корпоративного сообщества и повысить интерес к инвестированию в сетевую инфраструктуру.

Список литературы

1. Кобец Б. Б., Волкова И. О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. — М.: ИАЦ “Энергия”, 2010.
2. Соснина Е. Н., Лоскутов А. Б., Лоскутов А. А. Топология городских распределенных интеллектуальных электрических сетей 20 кВ. — Промышленная энергетика, 2012, № 5.
3. Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. — М.: Наука, 1982.

shaposhnikov@unn.ru