

ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ ЭНЕРГООБЪЕДИНЕНИЯ БОЛЬШОЙ РАЗМЕРНОСТИ

АВТОРЫ:

М.А. РАБИНОВИЧ,
Д.Т.Н.,
ООО «КАСКАД-НТ»

С.П. ПОТАПЕНКО,
К.Т.Н.,
ООО «КАСКАД-НТ»

С.К. КАКОВСКИЙ,
ООО «КАСКАД-НТ»

Е.Н. ТРЕГУБОВ,
ООО «КАСКАД-НТ»

Современные электро-энергетические системы содержат большое количество разнообразных элементов, обладают многообразными внутренними и внешними связями. Это означает, что описание, анализ и контроль состояний и режимов работы таких систем требуют обработки большого объема разнородной информации, которая возможна на основе современных методов цифрового моделирования.

Ключевые слова: модель энергосистемы; магистральные сети; режим ЭЭС; распределительные сети; реальное время; гибридная модель; мониторинг; оптимизация режима.

Цифровой переход в электроэнергетике позволяет существенно повысить эффективность традиционной энергетической системы



* Часть работы была выполнена в Центре системного моделирования АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

ВВЕДЕНИЕ

Электрические сети можно разделить по функциональному назначению на сети МЭС, включая региональные сети с уровнем напряжения 35 кВ и выше, и сети РЭС с напряжением 20 кВ и ниже. Первый тип сети предназначен, главным образом, для передачи электроэнергии на большие расстояния от источника ее генерации до мест (подстанций) распределения. Второй тип сети служит для доставки электроэнергии потребителям. Это сети РЭС, как правило, радиального типа.

Сети 35 кВ и выше обычно содержат кольцевые связи, что приводит к необходимости применения матричных методов для их расчета. Эти методы требуют значительных вычислительных затрат (пропорциональных квадрату количества узлов в сети) даже с учетом слабой заполненности матрицы Якоби.

Распределительные сети (20 кВ и ниже), напротив, имеют радиальный характер, что значительно снижает вычислительные затраты при их расчете.

Несколько десятков сетей РЭС могут быть подключены к одной сети МЭС. При этом в расчетах не учитывается влияние отдельных сетей РЭС и отдельных фидеров друг на друга (через сети МЭС), а также изменение режима сетей МЭС в зависимости от изменения потребления в сетях РЭС. Это влияние особенно проявляется в задачах оптимизации режима по напряжению — реактивной мощности, вариантных расчетах, советах диспетчера и ряде других задач. Учесть эффект взаимного влияния можно, объединив схемы МЭС и всех РЭС в единую расчетную схему (которую мы назовем гибридной). Это непростая задача, если учесть, что размерность схемы МЭС составляет несколько тысяч узлов, а размерность подключаемых к этой

схеме всех питаемых схем РЭС достигает нескольких сотен тысяч узлов.

Потребность в совместном расчете режимов МЭС и РЭС весьма велика. Ниже приведена ограниченная выборка задач оперативного управления, качество решения которых существенно зависит от полноты расчетных схем, которая обеспечивается объединением схем МЭС и РЭС в единую расчетную схему.

Отметим, что обычно под гибридными моделями электрических сетей подразумевают смешанные цифро-аналоговые модели энергосистем. В настоящей статье под гибридными моделями мы будем понимать модели, которые выполняют расчет магистральных, распределительных и смешанных электрических сетей.

Рост размерности расчетных схем приводит к значительному росту вычислительных затрат. Так, если расчет схемы 2000 узлов занимает 1 с, то расчет схемы в 200 тыс. узлов (при формировании общей расчетной схемы) будет при использовании традиционных методов расчета (Ньютон, Гаусс) в 10 тыс. раз больше (т. е. несколько часов), что совершенно недопустимо для многих задач оперативного управления.

Вычислительные затраты для расчета схем МЭС пропорциональны квадрату числа узлов, в то время как подобные затраты для расчета схем РЭС растут только пропорционально количеству узлов. Несмотря на то, что общее число РЭС на порядок больше, затраты на расчет их схем сравнительно невелики. Это дает возможность отдельного расчета этих двух типов сетей, взаимной балансировки их режимов, и в итоге приводит к сравнительно небольшому росту времени вычислений.

В рассматриваемой модели развит [1, 2] известный подход на основе

функциональных характеристик граничных узлов, основные положения которого состоят в обмене информацией между схемами МЭС и РЭС внутри итерационного процесса их расчета. Применение этой методики позволяет получать режим полной сети при допустимых вычислительных затратах.

Принцип отдельного расчета сетей разных классов напряжений и функционального назначения наиболее близок к их иерархическому разделению и декомпозиции, который существенно снижает требуемые вычислительные затраты и упрощает диспетчерский мониторинг всей сети.

В настоящее время расчет этих двух основных типов электрических сетей выполняется отдельно. И это несмотря на то, что магистральные и региональные, а также распределительные сети влияют друг на друга, поскольку подчиняются одним и тем же законам физики и имеют общие точки (в центрах питания). Распределительные сети содержат большое число сетей РЭС и отдельных фидеров, которые также могут взаимодействовать между собой через региональные сети.

ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ

Режим одновременного расчета режима сетей всех типов необходим для анализа и повышения надежности энергоснабжения, снижения потерь в сети, оптимизации режимов по активной и реактивной мощности и решения ряда других задач.

Рассмотрим несколько важных задач оперативного управления, в которых актуален расчет режима в гибридных моделях большой размерности.

1. **Задача оптимизации режима.** Принципиально важной является

задача оптимизации режима по напряжению и реактивной мощности. Ее решение в значительной мере зависит от полноты расчетной схемы и представления в ней средств компенсации реактивной мощности (СКРМ), трансформаторов с РПН и т. д. Попытки решения этой задачи по частям, на наш взгляд, малоперспективны, поскольку оптимизация режима в одной части расчетной схемы существенным образом влияет на режим в остальных ее частях. По этой причине данную задачу необходимо решать для получения полной расчетной схемы.

2. **Мониторинг режима и топологии сети.**

В этой задаче оценку параметров целесообразно получать по полной расчетной схеме, которая включает сети всех контролируемых классов напряжений. Применение в расчетах эквивалентирования трудоемко и может в отдельных случаях приводить к серьезным ошибкам. Вопрос представления режимной информации оперативному персоналу относится к вопросам, решаемым системой отображения.

3. **Советчик диспетчера по ведению режима.**

Существует множество вариантов решения этой задачи, которые отличаются постановкой и функционалом. Но, как правило, все задачи такого типа используют результаты расчета текущего (или прогнозного) режима. Как упоминалось выше, точность расчета существенно зависит от полноты расчетной схемы, и в гибридных моделях она выше.

Методы расчета магистральных сетей в советчиках диспетчера разработаны и широко известны [1, 4, 6]. Это классические методы Гаусса, Ньютона и их модификации. Вызывают проблемы большие вычислительные затраты (пропорциональные квадрату числа узлов в сети) и органи-

зация вычислений в режиме реального времени. Обычно такие модели (RASTR, RastrWin, Каскад-НТ и др.) обеспечены развитой системой управления и отображения режимной информации.

Фрагмент магистральной сети с кольцевыми связями между узлами в советчике диспетчера представлен на рис. 1. На панораме показана часть расчетной магистральной сети и состав регионов (районов) совместно с панорамой всей сети.

4. **Тренажер диспетчера сетевой компании.**

Режимный тренажер диспетчера с контролем переключений требует расчета режима по схеме МЭС и выполнения коммутационных операций, как правило, по схемам РЭС. В задаче вычисляется режим, а коммутационные операции выполняются в полной коммутационной схеме с контролем топологии всей сети. Задание сценария тренировки и сценарии ПА можно задавать непосредственно по схеме (ре-

жимной и коммутационной) всего энергообъединения. Схемы МЭС и РЭС могут задаваться на фоне карты местности, и управление топологией сети можно проводить непосредственно по схеме. Каждая распределительная сеть (рис. 2 на с. 71) содержит, как правило, только радиально построенные фрагменты схемы, что позволяет оценивать ее режим относительно простыми методами без применения матричной тематики. Кольцевые связи таких сетей нормально разомкнуты.

ПРОБЛЕМЫ АНАЛИЗА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Сети РЭС имеют узлы присоединения (обычно через трансформаторы) к узлам магистральной сети. Расчет таких сетей, как правило, выполняют отдельно от расчета магистральных при сравнительно небольших вы-

числительных затратах. При расчете подобных сетей учитывается их радиальный характер.

Основной проблемой при задании схем РЭС является достоверность и полнота исходных данных, причем узловые нагрузки, как правило, неизвестны. Их значения находят косвенными методами по узловым графикам нагрузки или по значениям мощностей трансформаторов присоединения. Оптимизация распределительных сетей сводится к их структурной оптимизации, вариантным расчетам при возникновении аварийных ситуаций и подключении систем компенсации реактивной мощности (СКРМ).

В отдельных случаях радиальная структура РЭС может нарушаться при подключении таких сетей в нескольких узлах присоединения к основной сети или при возникновении кольцевых связей. Отметим, что по правилам эксплуатации подобная ситуация встречается крайне редко. В этих случаях для расчета таких сетей применяют классические методы для всей расчетной схемы или для ее отдельных частей с резким ростом вычислительных затрат.

При раздельном решении задач расчета сетей МЭС и РЭС необходимые затраты растут, главным образом, пропорционально размерности распределительной сети и в настоящее время являются приемлемыми, но при этом страдает качество решения в силу указанных выше причин (неучета взаимного влияния режимов рассматриваемых сетей).

МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

В предлагаемой работе используются специализированный алгоритм и программа расчета, которая позволяет ускорить расчеты элек-

трических сетей путем применения гибридной модели на несколько порядков. Возможности такого ПК позволяют использовать его в задачах реального времени, что в отечественных программных комплексах пока недостижимо при расчетах схем большой размерности.

Обычный метод расчета установившегося режима состоит сначала в формировании полной расчетной схемы, а затем в выполнении классического расчета одним из широко применяемых методов. В этом случае расчетные схемы могут быть любой конфигурации (с кольцевыми и радиальными фрагментами сети). Однако и время расчета растет пропорционально квадрату размерности сети. В то же время только сети с кольцевыми фрагментами требуют применения для расчетов строгих методов (Гаусс, Ньютон и т. д.). Доля таких фрагментов в полных сетях составляет около 2–3 %. Основной частью подобных сетей являются радиальные распределительные сети.

Для совмещения кольцевых и радиальных расчетов сетей при их раздельном вычислении требуется проводить многократную итерационную процедуру вычислений, при которой после получения установившегося режима и значений напряжений в точках присоединения радиальных распределительных сетей необходимо выполнить их расчет и получить новые значения мощностей и напряжений в узлах присоединения, т. е. провести повторный расчет кольцевой части сети. Эту последовательную процедуру следует проводить многократно, до достижения заданной точности сходимости к решению.

Хотя такой раздельный последовательный метод расчета значительно более экономный по сравнению с классическим (когда всю расчетную схему формируют через матрицу проводимости или матрицу Якоби),

общие вычислительные затраты оказываются очень большими.

В представленном методе расчета полных электрических сетей предлагается совместить оба процесса — расчет кольцевых и расчет радиальных сетей — в одной общей процедуре без их объединения в единую электрическую сеть. Это значит, что оба расчета выполняются раздельно, и обмен информацией в узлах присоединений распределительных сетей выполняется по мере ее готовности (например, при окончании любой итерации в кольцевой схеме). Таким образом, выполняется объединение схем МЭС и РЭС в единую расчетную схему.

Сходимость такой расчетной модели к решению происходит достаточно быстро [1, 2] за счет коррекции режима после каждой итерации (а не только после получения промежуточного установившегося режима (УР)). Отметим, что расчет режима в сетях МЭС и РЭС можно проводить параллельно, а обмен информацией в граничных узлах сети — по мере ее готовности.

Обычно расчет схемы РЭС происходит достаточно быстро, значительно быстрее времени выполнения одной итерации в основной сети. Таким образом, обмен узловой информацией между двумя схемами расчета можно выполнять после окончания любой итерации в схеме МЭС.

Если за время итерации в магистральной сети происходят несколько уточняющих расчетов распределительной сети, то в этом нет проблемы, просто очередная инъекция мощности в узлы замыкания (граничные узлы) будет рассчитана с большей точностью. Главное — проводить коррекцию параметров основной расчетной схемы МЭС между ее итерациями. Ускорения вычислительного процесса можно достигнуть путем

ФРАГМЕНТ МАГИСТРАЛЬНОЙ СЕТИ

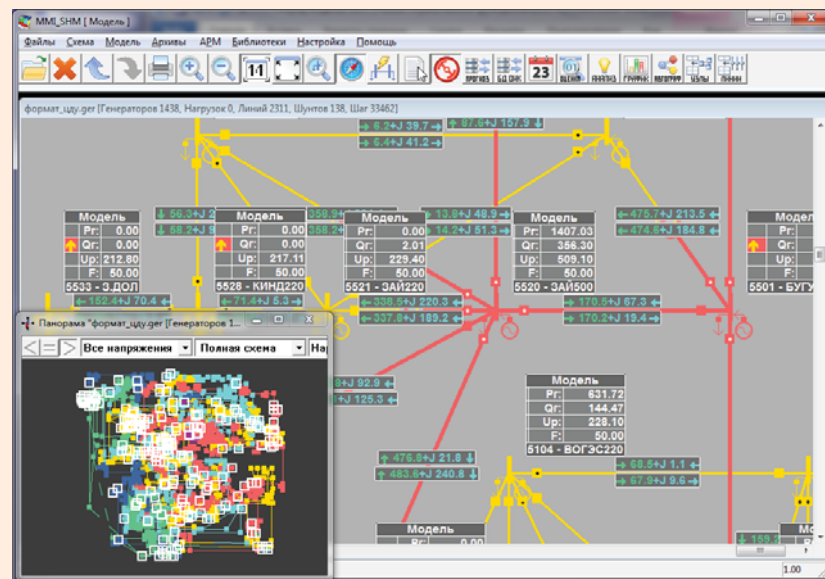


Рис. 1

РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ

Структура распределительной сети определяется назначением сети. Так, сети СН 110–220 кВ выполняются воздушными линиями электропередачи, включают электрические подстанции районного назначения и электростанции малой мощности. Сети низкого напряжения 380–35 000 В выполняются кабельным и воздушным способами и предназначены для распределения и доставки электроэнергии отдельным предприятиям, городам, поселкам и более мелким населенным пунктам.

Распределительные сети низкого напряжения (НН) напряжением 380–10 000 В, являются самыми массовыми. В пределах одного сетевого предприятия может насчитываться не одна сотня трансформаторных подстанций и пунктов. Именно поэтому в таких сетях используются недорогие трансформаторы без автоматики регулирования напряжения.

применения отдельного (второго) процессора специально для расчета распределительных сетей. Тогда эти две основные задачи не будут тормозить друг друга, а обмен информацией в узлах примыкания можно будет выполнять по мере ее готовности. Таким образом, обмен информацией между двумя типами расчетных схем состоит в передаче значений напряжения в узлы примыкания распределительных сетей и мощностей потребления из этих же узлов радиальных сетей в соответствующие узлы основной расчетной схемы.

Приведенная методика применима и для расчета динамики схемы МЭС.

Обмен информацией в узлах примыкания в этом случае необходимо выполнять как между итерациями УР, так и между шагами интегрирования уравнений динамики.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ НЕСКОЛЬКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Рассматриваемый алгоритм совместного расчета схем МЭС и одной схемы РЭС легко расширяется при наличии нескольких схем РЭС, примыкающих к одной МЭС. В этом случае параллельно (или последовательно) могут считаться все распределительные схемы, и после окончания их расчета выполняется коррекция схемы МЭС.

При параллельном расчете сетей РЭС для каждой задачи необходимо выделить определенный (достаточно большой) фрагмент оперативной памяти, так что для всех сетей РЭС может потребоваться большая оперативная память. В этом случае результаты расчета всех сетей РЭС одновременно будут доступны пользователю.

При последовательном расчете схемы РЭС можно использовать единое оперативное пространство, в которое загружается и рассчитывается очередная схема РЭС. При этом пользователю в каждый момент времени доступны результаты расчета только одной (актуальной) схемы РЭС и полные результаты расчета схемы МЭС. В этом варианте расчета полной сети отметим некоторую неполную функциональность при отображении расчетной информации. Кроме того, такой вариант расчета потребует значительно большего времени на дополнительную загрузку схем РЭС в оперативную память

для выполнения последовательных расчетов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Представленная методика проверена на контрольных примерах для схемы ЕЭС России (1964 узла и 3300 ветвей). Полное время расчета УР этой схемы (с загрузкой из базы данных, формированием матрицы проводимостей, решением уравнений и т. д.) занимает примерно 3–4 с. Время расчета УР двух схем РЭС (примерно по 3 и 4 тысячи узлов) занимает менее 1 с каждая). Общее время расчета по приведенной методике достигает 6 с. Дальнейшее наращивание числа схем РЭС, присоединяемых к схеме МЭС, приводит к линейному росту затрат.

Если же выполнить объединение указанных двух схем РЭС и схемы МЭС в единую расчетную схему (всего порядка 9000 узлов), то это приведет к росту вычислительных затрат на порядок (примерно до 52 с).

Дальнейшее наращивание числа подключаемых схем РЭС даст еще более значительный выигрыш в вычислительных затратах по предлагаемой методике.

Часто приводимое сравнение указанной выше методики с возможностями широко известной программы RAST с меньшим временем вычислений схем указанной размерности выполняется не всегда корректно, а именно только для расчета режима после очередной коммутации схемы. Такое вычисление может быть проведено значительно быстрее начального пуска системы, которое выполнялось в контрольных испытаниях.

В перспективе целесообразно рассмотреть возможность расчета сети всех схем МЭС и всех схем

ФРАГМЕНТ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

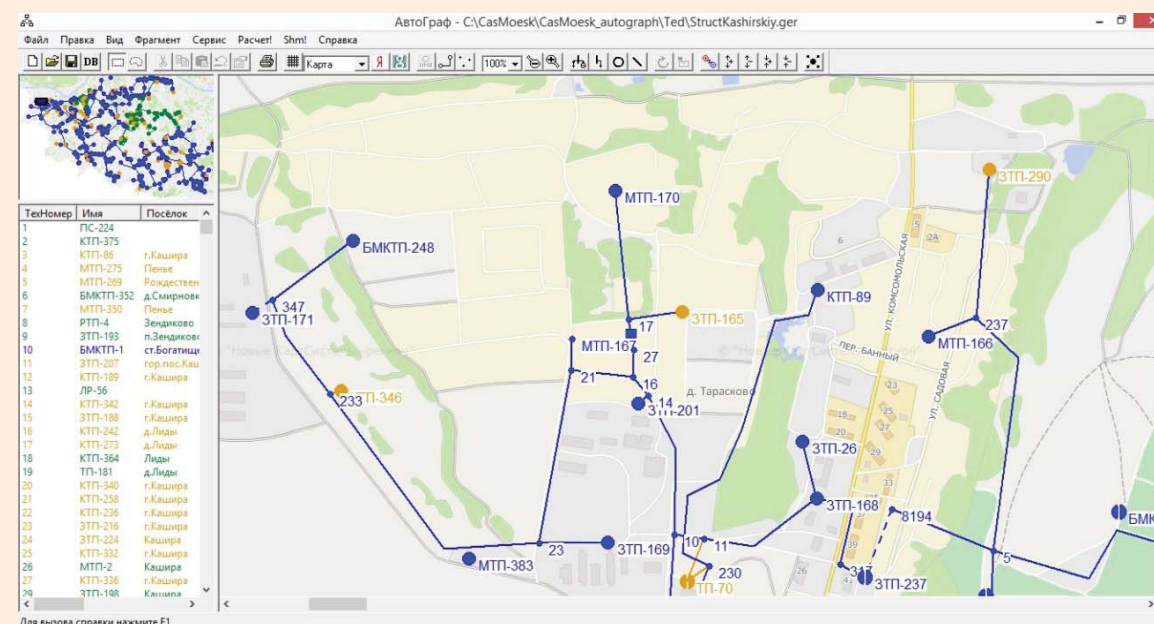


Рис. 2

РЭС по стране в целом. Эта задача потребует объединения в единую схему нескольких сотен тысяч узлов (вплоть до 1 млн). Время такого расчета по указанной методике может достигать нескольких десятков минут, что на несколько порядков меньше времени решения этой задачи с помощью традиционной методики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлена методика моделирования электрических сетей большой размерности с помощью гибридной модели ЭЭС, охватывающей широкий диапазон напряжений сети. Рассмотрен простой алгоритм расчета таких сетей, который позволяет на 1–2 порядка и более сократить необходимые вычислительные затраты в зависимости от соотношения количества узлов в схеме МЭС и общего количества узлов схем РЭС. Точность расчета

схем на основе гибридной модели совпадает с точностью расчета на основе полной модели единой расчетной схемы.

Авторами создан пилотный проект из схемы ОЭС Центра (аналог МЭС) и двух схем РЭС, который подтвердил основные технические решения для создания гибридной модели.

В предлагаемой статье реализован алгоритм и программа решения задачи расчета режима больших схем энергообъектов с достаточно низкими вычислительными затратами. После внедрения указанного комплекса программ в эксплуатацию ожидается экономический эффект, многократно превышающий затраты на разработку и внедрение.

Предлагаемая методика найдет применение в ряде важных для диспетчерского управления задач. При этом возникает возможность

решать ранее недоступные задачи в режиме реального времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Суханов О.А., Шаров Ю.В. Иерархические модели в анализе и управлении режимами электрических систем. М.: Изд. дом МЭИ, 2007.
2. Макеечев В.А., Суханов О.А. Экспериментальное исследование распределенной системы расчета режимов больших энергообъединений // Энергия единой сети. 2015. № 4. С. 61–69.
3. Челаэнов А.А., Наумкин И.Е. и др. Программное обеспечение анализа нормальных и аварийных режимов в электроэнергетике // Энергоэксперт. 2016. № 6.
4. Рабинович М.А. Цифровая обработка информации для задач оперативного управления в электроэнергетике. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2001.
5. Рабинович М.А. Цифровая обработка, анализ и отображение оперативной информации в задачах АСДУ энергосистем и энергообъединений. М.: 2005. Автореф. дисс.
6. Идельчик В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. М.: Энергоатомиздат, 1988.