НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
НАУКА И МИРОВОЗЗРЕНИЕ

УДК-621.31

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В УМНЫХ СЕТЯХ

Савицкий Дмитрий Олегович
Аспирант кафедры электроэнергетических систем и сетей, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

В настоящей исследовательской работе осуществляется развернутый, детальный, глубокий и многоаспектный научно-теоретический анализ принципов математического моделирования, алгоритмической оптимизации и управления потоками мощности в интеллектуальных электроэнергетических системах (Smart Grid). В центре внимания находится исследование нелинейных уравнений установившихся и переходных режимов электрических сетей при массовой интеграции распределенной генерации, возобновляемых источников энергии с высокой стохастической изменчивостью выработки, а также промышленных накопителей электрической энергии. В статье подробно рассматриваются методы численного решения уравнений потокораспределения, алгоритмы мультиагентного децентрализованного управления, модели прогнозирования графиков электрических нагрузок на базе глубоких нейронных сетей и рекуррентных архитектур, а также механизмы обеспечения динамической устойчивости, качества электроэнергии и киберфизической безопасности распределительных сетей. На основе комплексного междисциплинарного синтеза теоретической электротехники, вычислительной математики, теории автоматического управления и информатики формулируются концептуальные основы построения цифровых двойников умных энергетических систем, способных обеспечивать баланс генерации и потребления в реальном времени при минимальных технологических потерях.

Ключевые слова: умные сети, моделирование распределения энергии, потокораспределение, распределенная генерация, возобновляемые источники энергии, накопители энергии, цифровые двойники, машинное обучение, оптимизация режимов, электроэнергетическая система.

Введение

Современная мировая электроэнергетика переживает период фундаментальной структурной трансформации, обусловленной переходом от традиционной централизованной иерархической архитектуры генерации, передачи и распределения электрической энергии к децентрализованным киберфизическим

интеллектуальным системам, получившим в мировой научной литературе наименование умных сетей (Smart Grid). Классическая энергетическая система двадцатого века проектировалась исходя из однонаправленного движения потоков мощности от крупных тепловых, гидравлических и атомных электростанций через повышающие подстанции и высоковольтные линии электропередачи к пассивным распределительным сетям и конечным потребителям. Однако бурное развитие распределенной генерации, массовое внедрение фотоэлектрических солнечных станций и ветроэнергетических установок, распространение зарядной инфраструктуры для электрического транспорта, а также появление активных потребителей-производителей (просьюмеров) коренным образом изменили физику и топологию электрических сетей.

В условиях двунаправленного перетока активной и реактивной мощности, стохастического характера выработки возобновляемых источников и быстрого изменения профилей нагрузки традиционные детерминированные методы расчета и ручного диспетчерского управления утрачивают свою эффективность. Возникают сложные технические проблемы, связанные с нарушением баланса мощности, отклонениями уровней напряжения за пределы нормативных коридоров, перегрузкой силовых трансформаторов и кабельных линий, а также снижением инерционности энергосистемы. В этой связи математическое и компьютерное моделирование процессов распределения энергии в умных сетях приобретает статус ключевого научно-инженерного инструмента, позволяющего прогнозировать поведение энергосистемы в различных эксплуатационных и аварийных режимах, синтезировать оптимальные законы управления и обеспечивать надежное, бесперебойное и экономически эффективное электроснабжение потребителей.

Целью данного масштабного научного исследования является проведение систематического, исчерпывающего и всестороннего анализа математических моделей установившихся и динамических режимов умных электрических сетей, численных методов оптимизации потоков мощности, алгоритмов искусственного интеллекта для управления распределенными энергетическими ресурсами, а также архитектуры цифровых двойников энергетических объектов. Выявление точных количественных закономерностей взаимодействия силового электротехнического оборудования с информационно-управляющими контурами позволяет заложить надежный теоретический и прикладной фундамент для проектирования и эксплуатации интеллектуальных энергосистем двадцать первого века.

Математические основы расчета потокораспределения и оптимизации режимов в активных сетях

Фундаментальной базой моделирования распределения электрической энергии выступает математическая задача расчета установившегося режима (Power Flow или Load Flow), заключающаяся в определении комплексных напряжений во всех

узлах электрической сети и перетоков активной и реактивной мощности по всем ветвям при заданных параметрах генерирующих источников, нагрузок и топологии схемы замещения. В умных сетях данная задача описывается системой нелинейных алгебраических уравнений баланса мощностей в узлах, связывающих модули и фазовые углы узловых напряжений с элементами матрицы узловых проводимостей. Ввиду нелинейного характера этих уравнений их аналитическое решение для разветвленных сетей невозможно, что требует применения итерационных численных методов, среди которых наибольшее распространение в промышленных программных комплексах получили метод Ньютона-Рафсона, метод быстрого разделения потоков и метод прямой-обратной развертки, специально адаптированный для радиальных и слабозамкнутых распределительных сетей среднего и низкого напряжения.

Особую сложность при моделировании активных распределительных сетей представляет учет несимметрии фазных нагрузок и параметров линий электропередачи, характерной для сетей низкого напряжения с однофазными потребителями и микрогенерацией. Это требует перехода от однолинейного представления схемы к полномасштабному трехфазному моделированию с учетом взаимных электромагнитных индуктивных и емкостных связей между фазами и нейтральным проводом. Кроме того, современное моделирование не ограничивается простым расчетом текущего состояния сети, а решает задачу оптимального потокораспределения (Optimal Power Flow, OPF). Математическая постановка OPF представляет собой задачу нелинейного условного программирования, направленную на минимизацию целевой функции — суммарных затрат на генерацию, потерь активной мощности в линиях или выбросов парниковых газов — при строгом соблюдении физических ограничений в форме равенств (уравнения баланса мощности) и неравенств (допустимые пределы напряжений в узлах, пропускная способность линий, пределы регулирования трансформаторов с устройством регулирования под нагрузкой и реактивной мощности инверторов). Для преодоления вычислительной сложности невыпуклых задач OPF в крупных сетях применяются методы выпуклой релаксации, такие как коническое программирование второго порядка и полуопределенное программирование, гарантирующие нахождение глобального оптимума за полиномиальное время.

Стохастическое моделирование возобновляемых источников энергии и систем накопления

Интеграция значительной доли солнечной и ветровой генерации в распределительные сети вносит существенную неопределенность в процессы планирования и балансирования энергетических потоков. Выработка фотоэлектрических модулей зависит от интенсивности солнечной инсоляции, облачности, температуры окружающей среды и угла падения лучей, тогда как мощность ветроэнергетических установок пропорциональна кубу скорости ветрового потока, подверженного турбулентным пульсациям. Детерминированные модели, оперирующие средними значениями генерации, не

способны адекватно оценить риски возникновения дефицита мощности или недопустимого повышения напряжения в узлах подключения распределенной генерации в часы минимального потребления.

Для корректного учета этих факторов в моделировании умных сетей применяются методы стохастического программирования, вероятностного потокораспределения (Probabilistic Power Flow) и робастной оптимизации. Вероятностное моделирование базируется на описании случайных входных параметров с помощью функций плотности распределения вероятностей, таких как распределение Вейбулла для скорости ветра и бета-распределение для солнечной радиации. Расчет статистических характеристик выходных параметров сети — математического ожидания и дисперсии напряжений и перетоков мощности — осуществляется с помощью метода Монте-Карло с применением ускоренных алгоритмов выборки по латинскому гиперкубу или аналитических методов разложения в ряды по ортогональным полиномам Эрмита и Грама-Шарлье.

Критически важным элементом демпфирования стохастических колебаний генерации в модели умных сетей выступают системы накопления электрической энергии (СНЭЭ), включающие литий-ионные аккумуляторные батареи, проточные редокс-батареи, маховиковые накопители и суперконденсаторы. Математическая модель накопителя в системе распределения энергии описывается динамическими уравнениями изменения уровня заряда (State of Charge, SoC) во времени с учетом коэффициентов полезного действия процессов заряда и разряда, ограничений по максимальной мощности инвертора, глубине разряда и деградации емкости в зависимости от количества циклов и температурного режима. Совместная оптимизация графиков работы накопителей и возобновляемых источников позволяет осуществлять выравнивание суточного графика нагрузки, сглаживание пиков потребления, регулирование частоты и напряжения в узлах сети, а также обеспечение бесперебойного питания ответственных потребителей в изолированном (островном) режиме работы микросети.

Алгоритмы машинного обучения и нейросетевое прогнозирование в задачах диспетчеризации

Высокая размерность современных распределительных сетей, оснащенных миллионами интеллектуальных приборов учета и датчиков телеметрии, порождает колоссальные потоки данных (Big Data), обработка которых классическими физико-математическими методами в режиме реального времени сталкивается с дефицитом вычислительных ресурсов. В этой связи в практику моделирования распределения энергии активно внедряются методы искусственного интеллекта, машинного обучения и глубоких нейронных сетей. Одной из важнейших задач является краткосрочное и сверхкраткосрочное прогнозирование электрической нагрузки и выработки возобновляемых источников на горизонте от нескольких минут до нескольких суток.

Для решения задач прогнозирования временных рядов применяются гибридные нейросетевые архитектуры, объединяющие сверточные нейронные сети (CNN), извлекающие пространственные и локальные корреляции из метеорологических данных и календарных признаков, с рекуррентными сетями долгой краткосрочной памяти (LSTM) и архитектурами на базе механизма внимания (Transformers), способными улавливать сложные долгосрочные временные зависимости и сезонные паттерны потребления. Точный прогноз позволяет системам управления заблаговременно формировать оптимальные графики загрузки генерирующего оборудования, планировать режимы заряда накопителей и активировать программы управления спросом (Demand Response), стимулирующие потребителей переносить энергоемкие процессы на часы провала нагрузки.

Помимо прогнозирования, методы машинного обучения, в частности обучение с подкреплением (Reinforcement Learning, RL) и графовые нейронные сети (Graph Neural Networks, GNN), применяются непосредственно для синтеза законов управления потоками мощности. Графовые нейронные сети естественным образом учитывают топологическую структуру электрической сети, представленную в виде графа, где вершинами являются шины и подстанции, а ребрами — линии электропередачи и трансформаторы. Обученные на результатах многовариантных расчетов потокораспределения, такие нейросетевые суррогатные модели способны аппроксимировать решение нелинейных уравнений сети за миллисекунды, что в тысячи раз быстрее классических итерационных решателей. Агенты глубокого обучения с подкреплением, взаимодействуя с цифровой моделью сети, вырабатывают оптимальные стратегии переключения секционирующих выключателей для реконфигурации топологии сети с целью минимизации потерь энергии и локализации аварийных участков.

Заключение

Подводя окончательный, глубоко структурированный, фундаментальный, всеобъемлющий и системный итог проведенному научно-теоретическому исследованию, можно с абсолютной академической и практической уверенностью констатировать, что математическое и компьютерное моделирование распределения энергии является ключевым системообразующим элементом создания и функционирования интеллектуальных электроэнергетических систем нового поколения. Интеграция децентрализованных возобновляемых источников энергии, промышленных накопителей, активных потребителей и зарядной инфраструктуры электротранспорта кардинально усложнила физику процессов в распределительных сетях, потребовав перехода от классических детерминированных расчетов к стохастическим, многокритериальным и адаптивным моделям оптимизации потоков мощности.

Органический синтез фундаментальных законов теоретической электротехники, нелинейной оптимизации, методов машинного обучения, мультиагентного децентрализованного управления и технологий цифровых двойников позволяет

обеспечить надежное балансирование генерации и потребления в реальном времени, минимизировать технологические потери при передаче энергии и повысить устойчивость энергосистем к внешним климатическим и киберфизическим воздействиям. Дальнейшее развитие вычислительных алгоритмов, квантовых вычислений для решения задач комбинаторной оптимизации большой размерности и стандартизация протоколов кибербезопасности откроют новые горизонты для построения полностью автономных, экологически чистых и самовосстанавливающихся энергетических систем будущего.

Литература

1. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. — М.: Высшая школа, 2020. — 478 с.
2. Идельчик В. И. Электрические системы и сети. — М.: Энергоатомиздат, 2019. — 592 с.
3. Воропай Н. И. Интеллектуальные электроэнергетические системы: концепция, состояние, перспективы. — Новосибирск: Наука, 2020. — 368 с.
4. Кобец Б. Б., Волкова И. О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. — М.: ИАЦ Энергия, 2019. — 208 с.
5. Бартоломей П. И., Ерохин П. М. Математические методы оптимизации режимов энергосистем. — Екатеринбург: УрФУ, 2021. — 312 с.
6. Суслов К. В., Солонина Н. Н. Моделирование и оптимизация активных распределительных электрических сетей. — Иркутск: ИРНИТУ, 2020. — 256 с.
7. Wood A. J., Wollenberg B. F., Sheble G. B. Power Generation, Operation, and Control. — Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2020. — 656 p.
8. Momoh J. Smart Grid: Fundamentals of Design and Analysis. — Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2021. — 232 p.
9. IEEE Transactions on Smart Grid. — 2025. — Vol. 16, No. 4. — P. 3120–3148.
10. Applied Energy. — 2026. — Vol. 358. — P. 122–150.