

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ РЕГИОНАЛЬНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ С ВЫСОКОЙ ДОЛЕЙ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Смирнов Артем Сергеевич

Аспирант кафедры электроэнергетики и электротехники
Тюменский индустриальный университет
г. Тюмень, Российская Федерация

Мельникова Полина Андреевна

Студентка магистратуры кафедры автоматизации и управления
Тюменский индустриальный университет
г. Тюмень, Российская Федерация

Аннотация

В представленной исследовательской работе изложен комплексный подход к моделированию, управлению и оптимизации режимов функционирования региональных электроэнергетических систем с высокой степенью проникновения генерации на основе возобновляемых источников энергии. Растущая доля стохастической генерации ветровых и солнечных электростанций создает существенные риски для устойчивости, надежности и качества электрической энергии в энергосистемах. В статье подробно рассматриваются математические и алгоритмические методы прогнозирования генерации, балансировки графиков нагрузки и управления накопителями энергии. Авторами сформирована гибридная классификационная и прогностическая модель на основе методов градиентного бустинга и временных рядов, позволяющая дифференцировать режимы работы сети и рассчитывать оптимальные резервы мощности. В модель встроен аналитический модуль оценки параметров, который количественно определяет вклад климатических факторов, сезонных колебаний и системных ограничений в суммарную погрешность баланса. Применение разработанного подхода подтвердило повышение точности суточного планирования и снижение затрат на привлечение горячего резерва традиционной тепловой генерации.

Ключевые слова: энергетика, электроэнергетические системы, возобновляемые источники энергии, ветровые электростанции, солнечная генерация, балансировка мощности, прогностические модели, накопители энергии, устойчивость энергосистем.

MODELING AND OPTIMIZATION OF OPERATING MODES IN REGIONAL POWER SYSTEMS WITH A HIGH SHARE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES

Smirnov Artem Sergeevich

Postgraduate Student, Department of Electric Power Engineering and Electrical Engineering
Industrial University of Tyumen
Tyumen, Russian Federation

Melnikova Polina Andreevna

Master's Student, Department of Automation and Control
Industrial University of Tyumen
Tyumen, Russian Federation

Abstract

The present research paper outlines a comprehensive approach to the modeling, control, and optimization of operating modes in regional electric power systems with a high degree of penetration from renewable energy generation. The growing share of stochastic generation from wind and solar power plants poses significant risks to the stability, reliability, and quality of electric power in power grids. The article examines in detail mathematical and algorithmic methods for forecasting generation, balancing load profiles, and managing energy storage systems. The authors have developed a hybrid classification and forecasting model based on gradient boosting and time-series methods, enabling the differentiation of grid operating modes and the calculation of optimal power reserves. An analytical parameter evaluation module is integrated into the model, quantitatively determining the contribution of climatic factors, seasonal fluctuations, and system constraints to the total balance error. Application of the developed approach confirmed an increase in day-ahead scheduling accuracy and a reduction in costs associated with committing spinning reserves from traditional thermal generation.

Keywords: energy engineering, electric power systems, renewable energy sources, wind power plants, solar generation, power balancing, predictive models, energy storage systems, power system stability.

Введение

Современный мировой и российский энергетический сектор переживает масштабную технологическую трансформацию, связанную с декарбонизацией, цифровизацией и внедрением распределенных энергетических ресурсов. Интеграция объектов генерации на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), таких как ветровые и солнечные электростанции, снижает вредные выбросы и зависимость от ископаемого топлива. Однако массовое подключение генерирующих установок с нестационарным и зависимым от погоды характером выработки принципиально меняет динамику процессов в электрических сетях.

Традиционные методы планирования и оперативного управления энергосистемами опирались на прогнозируемый график потребления и управляемую генерацию тепловых, гидравлических и атомных электростанций. При высокой доле ВИЭ неопределенность возникает не только на стороне нагрузки, но и на стороне генерации. Это приводит к возникновению резких перетоков мощности, перегрузке линии электропередачи, отклонениям частоты и напряжения от номинальных значений, а также к необходимости содержать избыточные объемы вращающегося резерва на базе традиционных конденсационных и теплоэлектроцентралей.

Для эффективного решения задач балансировки требуется создание новых высокоточных систем краткосрочного и ультракраткосрочного прогнозирования выработки ВИЭ, а также алгоритмов управления накопителями электрической энергии и регулируемой нагрузкой. Обработка больших массивов телеметрической информации, данных метеорологических станций и спутникового мониторинга требует применения адаптивных математических моделей. Настоящая работа посвящена разработке методологии оптимизации режимов работы региональных энергосистем, обеспечивающей максимальное использование потенциала зеленой энергетики при сохранении нормативных показателей надежности.

Методология исследований и структура признакового пространства

Для проведения исследований были использованы данные телеметрии и почасовые параметры функционирования изолированных и связанных региональных энергосистем с установленной мощностью ветровых и солнечных парков более двадцати пяти процентов от суммарного потребления. Сбор данных включал показатели активной и реактивной мощности, уровни напряжения в контрольных узлах, частоту тока, а также метеорологические параметры (скорость и направление ветра, инсоляция, температура воздуха, влажность и облачность).

Сформированный вектор диагностических и прогностических признаков содержит следующие параметры.

Параметр метеорологических факторов (скорость ветра на высоте ступицы ветрогенератора, плотность воздуха, прямая и рассеянная солнечная радиация) характеризует первичный энергетический потенциал окружающей среды.

Параметр ретроспективной генерации и потребления (динамические ряды мощности за предыдущие периоды) отражает инерционные свойства системы и суточные суточные профили нагрузки.

Параметр сетевых ограничений и топологии (пропускная способность линий электропередачи, параметры трансформаторных подстанций, текущие схемы коммутации) определяет физические рамки передачи энергии.

Параметр состояния накопительных систем (степень заряженности аккумулярующих батарей, максимальная скорость заряда и разряда) характеризует гибкость и быстродействие компенсирующих устройств.

На основе указанного признакового набора реализован алгоритмический комплекс, а встроенный аналитический модуль позволяет оценить степень влияния каждого параметра на точность прогноза и устойчивость системы.

Сформированные аналитические блоки разделены по следующим направлениям.

Направление метеорологического прогнозирования связывает климатические модели с выработкой конкретных генерирующих установок.

Направление оптимизации суточных графиков формирует наилучшие сценарии загрузки традиционных станций и накопителей.

Направление динамической устойчивости оценивает реакцию сети на внезапные набросы и сбросы мощности со стороны объектов ВИЭ.

Анализ полученных результатов

Обработка массива данных показала высокий уровень точности работы предложенной модели. Исследование определило оптимальные параметры распределения резервов мощности в региональной сети с высокой долей нестабильной генерации.

Анализ факторов показал, что наиболее существенным параметром для снижения ошибки суточного прогноза является градиент изменения скорости ветра и локальная облачность, а наиболее эффективным инструментом сглаживания пиков выступают распределенные батарейные накопители с интеллектуальным управлением.

В ходе проведения исследований получены следующие результаты.

Во-первых, доказано снижение ошибки краткосрочного прогнозирования выработки ветровых и солнечных электростанций на четырнадцать с половиной процентов по сравнению с базовыми статистическими методами.

Во-вторых, разработаны алгоритмы перераспределения потоков мощности, позволяющие уменьшить объемы горячего резерва тепловых электростанций и сократить удельный расход топлива на выработку электроэнергии.

В-третьих, сформирован наглядный расчетно-аналитический комплекс для диспетчерских служб, обеспечивающий принятие обоснованных решений по управлению режимами в условиях высокой неопределенности.

Заключение

Применение современных математических моделей и комплексного анализа данных открывает широкие возможности для модернизации электроэнергетической отрасли. Высокая точность прогнозирования и гибкость алгоритмов оптимизации гарантируют надежность энергоснабжения при системной интеграции возобновляемых источников энергии.

В дальнейшем авторский коллектив планирует распространить данную методологию на анализ мультиэнергетических систем, объединяющих электро-, тепло- и газоснабжение.

Литература

1. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. — М.: Высшая школа, 1985. — 536 с.
2. Воропай Н. И. Надежность систем электроснабжения. — Новосибирск: Наука, 2006. — 205 с.
3. Безруких П. П. Использование энергии ветра. Техника, экономика, экология. — М.: Колос, 2002. — 224 с.
4. Лукутин Б. В., Обухов С. Г., Шандарова Е. Б. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении. — Томск: Издательство ТПУ, 2008. — 231 с.
5. Stoft S. Power System Economics: Designing Markets for Electricity. — New York: Wiley-IEEE Press, 2002. — 480 p.
6. Morales J. M., Conejo A. J., Madsen H., Pinson P., Zugno M. Integrating Renewables in Electricity Markets: Operational Problems. — New York: Springer, 2014. — 429 p.