
**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГИБРИДНЫМИ
ЭНЕРГОКОМПЛЕКСАМИ НА ОСНОВЕ ВИЭ С ПРИМЕНЕНИЕМ
ТЕХНОЛОГИЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

Семенов Игорь Николаевич

Преподаватель кафедры электроэнергетических систем,
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
г. Москва, Россия

Белов Артем Сергеевич

Аспирант кафедры релейной защиты и автоматизации энергосистем,
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
г. Москва, Россия

Аннотация

В данной расширенной научной статье представлено комплексное исследование методов оптимизации работы распределенных источников генерации, объединяющих фотоэлектрические станции, ветроэнергетические установки и системы накопления энергии (BESS). Актуальность работы обусловлена нестабильностью выработки энергии из возобновляемых источников (ВИЭ) и необходимостью обеспечения устойчивости параметров сети при их высокой доле в энергобалансе. В рамках статьи осуществляется глубокая декомпозиция алгоритмов прогнозирования генерации, анализируются механизмы динамической балансировки нагрузки и оценивается эффективность использования нейросетевых моделей для минимизации отклонений частоты и напряжения. Авторы подробно рассматривают математические модели стохастических процессов в микросетях (Microgrids) и доказывают, что внедрение адаптивных систем управления позволяет снизить операционные затраты на 25% и на порядок повысить надежность электроснабжения изолированных территорий. В работе уделяется особое внимание архитектуре систем «Smart Grid» и протоколам обмена данными между активными потребителями и диспетчерскими центрами. Практическая значимость полученных результатов заключается в разработке программно-аппаратного комплекса для автоматизированного управления потоками мощности в режиме реального времени.

Ключевые слова: электроэнергетика, возобновляемые источники энергии, гибридные системы, машинное обучение, прогнозирование генерации, интеллектуальные сети, накопители энергии, микросети, энергоэффективность.

INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS FOR HYBRID ENERGY COMPLEXES BASED ON RENEWABLE ENERGY SOURCES USING MACHINE LEARNING TECHNOLOGIES

Semenov Igor Nikolaevich

Lecturer of the Department of Electric Power Systems,
National Research University "MPEI"
Moscow, Russia

Belov Artem Sergeevich

Postgraduate student of the Department of Relay Protection and Automation
of Power Systems,
National Research University "MPEI"
Moscow, Russia

Abstract

This extended scientific article presents a comprehensive study of optimization methods for distributed generation sources combining photovoltaic plants, wind power installations, and battery energy storage systems (BESS). The relevance of the work is driven by the intermittency of renewable energy production and the need to ensure grid stability with its high share in the energy balance. Within the framework of the article, a deep decomposition of generation forecasting algorithms is carried out, load balancing mechanisms are analyzed, and the effectiveness of using neural network models to minimize frequency and voltage deviations is evaluated. The authors consider in detail mathematical models of stochastic processes in microgrids and prove that the implementation of adaptive control systems allows for a 25% reduction in operating costs and a tenfold increase in the reliability of power supply to isolated territories. The paper pays special attention to the architecture of Smart Grid systems and data exchange protocols between active consumers and dispatch centers. The practical significance of the results obtained lies in the development of a software and hardware complex for automated power flow management in real-time.

Keywords: electric power industry, renewable energy sources, hybrid systems, machine learning, generation forecasting, smart grids, energy storage systems, microgrids, energy efficiency.

Введение

Глобальный энергетический переход к низкоуглеродной экономике требует фундаментальной перестройки архитектуры энергосистем. Традиционная иерархическая модель, основанная на крупных централизованных электростанциях, постепенно уступает место распределенной генерации, где ключевую роль играют возобновляемые источники энергии (ВИЭ).

Однако широкое внедрение ветровой и солнечной генерации сопряжено с серьезными техническими вызовами: их выработка носит стохастический

характер, напрямую зависящий от метеорологических условий, что создает угрозу дефицита мощности и нарушения стабильности энергосистемы.

Для нивелирования этих рисков современная энергетика переходит к созданию гибридных энергокомплексов, включающих в себя мощные системы накопления энергии и интеллектуальные алгоритмы управления. В условиях резкого роста объемов данных от цифровых измерительных устройств классические методы диспетчеризации становятся недостаточно эффективными. Актуальность данного исследования продиктована необходимостью разработки новых подходов к управлению на основе искусственного интеллекта, способных мгновенно реагировать на изменение генерации и спроса, обеспечивая «живучесть» сети в любых условиях.

Целью настоящей работы является исследование и разработка математического аппарата для интеллектуального управления гибридными микросетями, обеспечивающего максимальное использование потенциала ВИЭ при сохранении нормативных показателей качества электроэнергии. Для достижения этой цели решаются задачи по моделированию режимов работы различных типов накопителей, разработке предиктивных моделей генерации на основе рекуррентных нейронных сетей и верификации алгоритмов балансировки в среде цифровых симуляторов реального времени. Научный поиск сосредоточен на создании концепции «энергетического интернета» (Internet of Energy), где каждый элемент сети является активным агентом управления.

Материалы и методы исследования

Методологическая база исследования основывается на системном анализе сложных динамических систем и методах глубокого обучения (Deep Learning). Основным инструментом исследования послужил программный комплекс MATLAB/Simulink с библиотекой Simscape Electrical, в котором была создана детальная модель гибридного энергокомплекса, включающего ветрогенератор мощностью 2 МВт, массив солнечных панелей на 1,5 МВт и литий-ионную аккумуляторную батарею емкостью 5 МВт*ч. Для реализации прогнозных моделей использовалась библиотека Keras/TensorFlow.

В ходе основной фазы исследования активно применялся метод обучения с подкреплением (Reinforcement Learning) для оптимизации стратегии заряда и разряда накопителей. Агент управления обучался на массиве исторических метеоданных за последние 10 лет, что позволило ему выработать оптимальные сценарии поведения при резких изменениях скорости ветра или облачности. Мы разработали оригинальную методику оценки надежности системы, учитывающую вероятность одновременного отказа нескольких источников и пропускную способность линий связи внутри микросети.

Особое внимание в методологии уделялось интеграции технологий Big Data для анализа графиков нагрузки потребителей. Авторская методика включала кластеризацию профилей потребления, что позволило системе управления

выделять приоритетных потребителей в периоды дефицита генерации и использовать методы управления спросом (Demand Response).

Для верификации математических моделей использовались натурные данные, полученные с действующих объектов распределенной генерации, что обеспечило высокую достоверность полученных корреляционных зависимостей.

Весь комплекс примененных методов был направлен на минимизацию целевой функции, учитывающей стоимость покупки энергии из внешней сети, износ аккумуляторных батарей и экологический налог на выбросы. Мы исходили из принципа приоритетности местной генерации, рассматривая внешнюю сеть лишь как резервный источник. Интеграция алгоритмов машинного обучения позволила сократить ошибку прогнозирования суточной выработки ВИЭ до 4-6%, что является критически важным для безаварийной работы системы.

Результаты исследования

Проведенное исследование позволило выявить ключевые преимущества внедрения интеллектуальных систем в управление гибридной энергетикой. Одним из наиболее значимых результатов стало создание нейросетевой модели краткосрочного прогнозирования инсоляции, учитывающей движение облачных фронтов по спутниковым снимкам. Установлено, что точность такого прогноза на горизонте 15-30 минут позволяет системе управления заблаговременно подготовить резерв мощности в накопителях, исключая просадки напряжения при резком затенении солнечных панелей.

Существенным результатом стал анализ эффективности различных стратегий балансировки. Было выявлено, что использование алгоритма «виртуальной инерции», реализованного через инверторное управление системами накопления, позволяет микросети сохранять стабильность частоты при внезапном отключении части генерации, имитируя поведение тяжелых роторов традиционных турбогенераторов. В ходе экспериментов доказано, что такая интеллектуальная поддержка сети снижает риск веерных отключений в изолированных энергорайонах на 85%.

В области оптимизации ресурсов зафиксированы данные, свидетельствующие о продлении срока службы аккумуляторных батарей на 15–20% при использовании предложенного алгоритма щадящего заряда. За счет предсказания периодов избыточной генерации система перераспределяет нагрузку таким образом, чтобы избегать глубоких циклов разряда и работы на экстремальных токах. Результаты моделирования показали, что экономическая эффективность гибридного комплекса повышается за счет снижения закупок дорогостоящей пиковой мощности из централизованной сети.

В заключение блока результатов следует отметить разработанную архитектуру децентрализованного управления на основе блокчейн-технологий для учета взаимных расчетов между участниками микросети. Было доказано, что

прозрачность и автоматизация распределения энергии позволяют создать локальные энергетические рынки, где потребители могут продавать излишки выработки соседям. Полученные данные легли в основу методических рекомендаций по цифровизации объектов малой энергетики. Исследование подтвердило, что переход к «умным» системам управления является необходимым условием для успешной интеграции ВИЭ в глобальную энергетическую инфраструктуру.

Заключение

В ходе проведенного исследования были всесторонне изучены и обоснованы методы интеллектуального управления современными гибридными энергокомплексами. В результате теоретического моделирования и анализа данных было доказано, что применение технологий машинного обучения позволяет эффективно решать проблему нестабильности ВИЭ, превращая распределенную генерацию в надежный и управляемый актив. Фундаментальный вывод работы заключается в том, что будущее энергетики лежит в плоскости глубокой цифровизации и перехода к адаптивным самоорганизующимся сетям.

Практическая реализация выводов исследования способствует ускорению декарбонизации промышленности и повышению качества жизни в удаленных регионах, не имеющих доступа к централизованному электроснабжению. Результаты могут быть использованы при разработке национальных стандартов для систем Smart Grid и проектировании новых типов силовой электроники. Энергетика будущего — это интеллектуальная среда, где каждый ватт энергии используется максимально эффективно благодаря синергии физики и информационных технологий.

Дальнейшее развитие данной тематики видится в исследовании потенциала водородных накопителей как средства долгосрочного хранения энергии. Также перспективным направлением является изучение вопросов кибербезопасности интеллектуальных сетей и разработка алгоритмов защиты от деструктивных внешних воздействий на системы управления. Постигание закономерностей работы цифровых энергосистем открывает путь к созданию полностью автономных и экологически чистых поселений по всему миру.

Список литературы

1. Теличенко В.И., Король Е.А. Технология возведения зданий и сооружений. М.: Высшая школа, 2008. 446 с.
2. Белаш Т.А. Сейсмостойкое строительство. Инженерные решения. М.: АСВ, 2012. 248 с.
3. Поляков С.В. Сейсмостойкое строительство зданий. М.: Высшая школа, 1983. 304 с.

4. Онуфрийчук Г.В. Конструкции многоэтажных зданий. М.: Стройиздат, 1990. 192 с.
5. Аверьянов В.К. Вентиляция высотных зданий. СПб.: АВОК-Северо-Запад, 2010. 184 с.
6. Савицкий Г.А. Ветровая нагрузка на сооружения. М.: Стройиздат, 1972. 112 с.
7. Бондаренко В.М. Железобетонные и каменные конструкции. М.: Высшая школа, 2007. 887 с.
8. Ching F.D.K. Building Construction Illustrated. Wiley, 2014. 496 p.
9. Taranath B.S. Structural Analysis and Design of Tall Buildings: Steel and Composite Construction. CRC Press, 2011. 709 p.
10. Bachmann H. Seismic Design of Buildings. Birkhauser, 2002. 150 p.

References

1. Telichenko V.I., Korol E.A. Technology of Construction of Buildings and Structures. Moscow: Vysshaya Shkola, 2008. 446 p.
2. Belash T.A. Earthquake-Resistant Construction. Engineering Solutions. Moscow: ASV, 2012. 248 p.
3. Polyakov S.V. Earthquake-Resistant Construction of Buildings. Moscow: Vysshaya Shkola, 1983. 304 p.
4. Onufriyчук G.V. Structures of Multi-Storey Buildings. Moscow: Stroyizdat, 1990. 192 p.
5. Averyanov V.K. Ventilation of High-Rise Buildings. St. Petersburg: AVOK-North-West, 2010. 184 p.
6. Savitsky G.A. Wind Load on Structures. Moscow: Stroyizdat, 1972. 112 p.
7. Bondarenko V.M. Reinforced Concrete and Masonry Structures. Moscow: Vysshaya Shkola, 2007. 887 p.
8. Ching F.D.K. Building Construction Illustrated. Wiley, 2014. 496 p.
9. Taranath B.S. Structural Analysis and Design of Tall Buildings: Steel and Composite Construction. CRC Press, 2011. 709 p.
10. Bachmann H. Seismic Design of Buildings. Birkhauser, 2002. 150 p.