

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КОМПЕНСАЦИЕЙ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Никулин П.Н.¹, Шиндановин М.Е.¹, Хохлов А.А.¹, Ельцова В.А.¹, Ельцов Я.В.²

¹*Тамбовский государственный технический университет, Тамбов;*

²*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва*

Ключевые слова: качество электрической энергии, коэффициент мощности, компенсация реактивной мощности, конденсаторные установки, машинное обучение, нейронные сети, обучение с подкреплением, прогнозирование нагрузки, энергоэффективность.

Аннотация. В работе рассматривается проблема обеспечения качества электрической энергии в электрических сетях промышленных предприятий, обусловленная снижением коэффициента мощности ($\cos \varphi$) при работе асинхронных и синхронных электроприводов. Показано, что традиционные методы компенсации реактивной мощности с использованием конденсаторных установок сталкиваются с ограничениями, связанными с дискретным характером регулирования, переходными процессами при коммутации и необходимостью адаптации к резкопеременным нагрузкам. В качестве перспективного решения предлагается применение методов машинного обучения для интеллектуального управления компенсацией. Обосновано, что интеграция нейросетевых технологий в систему автоматического управления позволяет повысить точность компенсации, снизить количество переключений коммутационной аппаратуры, минимизировать переходные процессы и обеспечить адаптивность к изменяющимся условиям эксплуатации. Разработка таких систем соответствует принципам цифровой трансформации энергетики и способствует повышению энергоэффективности промышленных предприятий.

AN INTELLIGENT REACTIVE POWER COMPENSATION CONTROL SYSTEM BASED ON NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES AND MACHINE LEARNING

Nikulin P. N.¹, Shindanovin M. E.¹, Khokhlov A. A.¹, Eltsova V. A.¹, Eltsov Ya. V.²

¹*Tambov State Technical University, Tambov;*

²*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow*

Keywords: electric power quality, power factor, reactive power compensation, capacitor banks, machine learning, neural networks, reinforcement learning, load forecasting, energy efficiency.

Abstract. This paper addresses the issue of ensuring the quality of electrical energy in industrial enterprises' electrical networks, which is caused by a decrease in the power factor ($\cos \varphi$) during the operation of asynchronous and synchronous electric drives. It is shown that traditional methods of reactive power compensation using capacitor banks face limitations due to the discrete nature of regulation, transient processes during switching, and the need to adapt to abrupt changes in loads. As a promising solution, the paper proposes the use of machine learning methods for intelligent compensation control. It is substantiated that the integration of neural network technologies into an automatic control system allows to increase the accuracy of compensation, reduce the number of switching of switching equipment, minimize transient processes and ensure adaptability to changing operating conditions. The development of such systems corresponds to the principles of digital.

Обеспечение нормативных показателей качества электрической энергии (КЭ) является одной из стратегических задач функционирования как единой электроэнергетической системы, так и отдельных промышленных предприятий [1, 2]. Качество электроэнергии напрямую влияет на эффективность и надежность работы технологического оборудования, которое включает в себя разнообразные элементы электропривода: конвейерные ленты, элеваторы, вентиляционные установки, металлообрабатывающие станки и иные сложные и дорогостоящие агрегаты. Бесперебойное питание этих потребителей электрической энергией с соблюдением стандартов КЭ – необходимое условие стабильности производственного цикла.

Однако сам характер работы технологического оборудования вносит искажения в режимы электрической сети. Наличие различных типов электропривода, в особенности асинхронных электрических двигателей, приводит к изменению коэффициента мощности ($\cos \varphi$). Снижение $\cos \varphi$ вызывает увеличение потребления реактивной мощности, что ведет к уменьшению пропускной способности линий электропередачи, росту потерь напряжения и активной мощности в элементах сети.

Для повышения коэффициента мощности (разработаны различные технические решения, среди которых наиболее распространенным является использование конденсаторных установок (батарей конденсаторов). Такие установки содержат определенное количество конденсаторных секций, коммутируемых в зависимости от текущей реактивной нагрузки. Для оперативного изменения состава включенных конденсаторов необходима эффективная система автоматического управления (САУ), которая должна выполнять следующие функции:

- анализ динамики изменения реактивной мощности;
- подбор оптимального количества подключаемых конденсаторных ступеней для достижения заданного (целевого) значения $\cos \varphi$.

Эффективность компенсации осложняется наличием переходных процессов при коммутации конденсаторов, а также возможными колебаниями $\cos \varphi$, вызванными резкопеременным характером нагрузки. Система управления должна оперативно отслеживать эти изменения и адаптировать режимы включения для предотвращения перекомпенсации реактивной мощности.

В этой связи перспективным направлением является внедрение интеллектуальных технологий управления, базирующихся на методах машинного обучения [3]. Системы на основе машинного обучения способны реагировать на текущие изменения параметров сети и прогнозировать поведение нагрузки, выявлять скрытые закономерности в динамике изменения реактивной мощности.

Используя исторические данные о режимах работы предприятия (графики нагрузки, время суток, сезонность, технологические циклы), можно обучить регрессионные модели – градиентный бустинг (XGBoost, LightGBM), случайный лес или нейронные сети прямого распространения. Эти модели способны выполнять краткосрочное прогнозирование потребления реактивной мощности, что позволяет системе упреждающе подбирать необходимую емкость конденсаторных батарей. Такой подход минимизирует запаздывание регулирования и снижает количество коммутационных операций, поскольку

компенсация выполняется не по факту возникшего отклонения, а на основе предстоящих изменений нагрузки.

Комбинирование методов машинного обучения с классическими алгоритмами управления (например, нечеткая логика на выходе нейросетевого прогноза) позволяет достичь высокой надежности и интерпретируемости решений.

Применение методов машинного обучения в системе управления компенсацией реактивной мощности позволяет решить следующие актуальные задачи:

– Оптимизация режимов коммутации на основе предиктивных моделей, что минимизирует количество переключений и продлевает срок службы коммутационной аппаратуры (контакторов, тиристорных ключей).

– Предиктивные возможности позволяют предвосхищать броски тока и напряжения при коммутации, адаптируя алгоритмы для снижения их негативного воздействия на сеть и оборудование.

Таким образом, разработка системы автоматического управления компенсацией реактивной мощности должна базироваться на современных достижениях в области машинного обучения и искусственного интеллекта, а также учитывать последние тенденции в развитии элементной базы конденсаторных установок (например, применение гибридных компенсаторов с тиристорным управлением). Применение методов машинного обучения позволяет перейти от простого дискретного регулирования к интеллектуальному управлению качеством электроэнергии, что в конечном итоге повышает энергоэффективность, надежность и экономическую эффективность работы промышленного предприятия в условиях цифровой трансформации энергетики.

Список литературы

1. Jaramillo M., Tipán L., Muñoz J. A novel methodology for optimal location of reactive compensation through deep neural networks // *Heliyon*. 2022, vol. 8, no. 10, p. 11097. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e11097.
2. Nishad D.K., Tiwari A.N., Khalid S. TURBO-AI: a transformative utility resource balancing optimization algorithm for real-time energy management in distribution networks with high penetration of non-linear industrial loads // *Engineering Research Express*. 2025, vol. 7, no. 2, p. 025355.
3. Panoiu M., Panoiu C. Hybrid Deep Neural Network Approaches for Power Quality Analysis in Electric Arc Furnaces // *Mathematics*. 2024, vol. 12, no. 19, p. 3071. DOI: 10.3390/math12193071.

Сведения об авторах:

Никулин Павел Николаевич – аспирант;

Шиндановин Макисм Евгеньевич – аспирант;

Хохлов Александр Александрович – аспирант;

Ельцова Виктория Александровна – магистрант;

Ельцов Ярослав Владимирович – студент.