

ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗПОДІЛУ ЕНЕРГІЇ В МІКРОМЕРЕЖАХ З ІНТЕГРАЦІЄЮ ВДЕ

Іванченко А.М. – магістрант, eee25-a.ivanchenko@nubip.edu.ua

Павленко В.М. – к.т.н., доцент, v.pavlenko@nubip.edu.ua

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Метою роботи є розробка інтелектуальної системи керування розподілом електроенергії в мікромережах з інтеграцією відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) на основі алгоритмів оптимізації, машинного навчання та предиктивної аналітики для забезпечення балансу попиту-пропозиції, мінімізації витрат та підвищення надійності енергопостачання.

Актуальність дослідження. Мікромережі (microgrids) є ключовим елементом сучасної енергетичної інфраструктури, що дозволяє інтегрувати розподілені джерела генерації, зокрема відновлювані (сонячні, вітрові), системи накопичення енергії та керовані навантаження у єдину систему, здатну працювати як у режимі підключення до основної мережі, так і в автономному (острівному) режимі. Використання блокчейну та штучного інтелекту для децентралізованого управління енергією дозволяє підвищити ефективність розподілу ресурсів та забезпечити прозорість енергетичних транзакцій [1].

Основною проблемою інтеграції ВДЕ у мікромережі є стохастичний характер генерації (залежність від погодних умов) та необхідність забезпечення миттєвого балансу між виробленням та споживанням електроенергії. Підвищення ефективності гібридних фотоелектричних систем з акумуляторними батареями дозволяє збільшити частку генерації електроенергії до мережі та покращити економічну ефективність локальних об'єктів [2, 3].

Дослідження показують, що впровадження динамічних систем управління енергією з real-time компонентами контролю дозволяє підвищити ефективність локальних полігенераційних мікромереж на 25-40%. Інтеграція відновлюваних джерел енергії в розподільні мережі потребує комплексного підходу до балансування навантаження та забезпечення стабільності роботи енергосистеми [4, 5].

Система реалізує багатокритеріальну оптимізацію з використанням гібридного підходу, що поєднує Model Predictive Control (MPC) для короткострокового керування та метаевристичні алгоритми для довгострокового планування. Функціональні модулі інтелектуальної системи керування мікромережею наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Функціональні модулі інтелектуальної системи керування мікромережею

Функціональний модуль	Компоненти	Призначення та можливості
Моніторинг генерації ВДЕ	Лічильники фотоелектричних систем (ФЕС), вітрогенераторів, датчики метеоумов, МРРТ-контролери	Real-time вимірювання генерації сонячних та вітрових джерел, прогнозування генерації на 24-48 годин на основі погодних даних, максимізація виходу через МРРТ
Управління накопичувачами	Літій-іонні батареї (LFP), суперконденсатори, BMS-контролери, інвертори зберігання	Оптимізація циклів заряду/розряду батарей, peak shaving (зрізання піків навантаження), аварійне резервування при збоях мережі, підтримка частоти та напруги
Керування навантаженнями	Розумні лічильники, контактори керованих навантажень, системи Demand Response	Класифікація навантажень (критичні/некритичні), автоматичне відключення некритичних споживачів при дефіциті потужності, зміщення навантажень на години низьких тарифів
Прогнозування та аналітика	ML-моделі (LSTM, Random Forest), метеодані API, історичні дані споживання	Прогноз генерації ВДЕ з точністю 85-92%, прогноз навантаження з точністю 88-94%, виявлення аномалій у споживанні, оптимізація планування на добу вперед
Оптимізація розподілу енергії	MPC-контролер, метаевристичні алгоритми (PSO, GWO), MILP-solver	Мінімізація операційних витрат, балансування попиту-пропозиції, оптимальний dispatch генераторів, керування обміном з основною мережею (buy/sell)
Режими острівного керування	Модуль islanding detection, системи захисту, автоматичне перемикання	Швидка ізоляція від основної мережі при збоях (<100 мс), підтримка балансу потужності в автономному режимі, плавна ресинхронізація при відновленні мережі
Інтеграція з основною мережею	Grid-tie інвертори, PMU (фазометричні вимірювачі), протоколи V2G	Двосторонній обмін енергією з мережею, участь у програмах Demand Response, продаж надлишків ВДЕ за "зеленим" тарифом, підтримка якості електроенергії
Кібербезпека та надійність	Шифрування даних (AES-256), системи виявлення вторгнень, резервування контролерів	Захист SCADA-системи від кібератак, моніторинг цілісності даних, резервування критичних компонентів для відмовостійкості

Модуль машинного навчання використовує ансамбль моделей LSTM (Long Short-Term Memory) для прогнозування генерації ВДЕ та Random Forest для прогнозування споживання. LSTM-мережа аналізує історичні дані генерації сонячних панелей за останні 2 роки разом з метеопараметрами (хмарність, температура, швидкість вітру) для створення прогнозу на 24-48 годин з

точністю 89%. Random Forest класифікує навантаження на основі дня тижня, сезону, температури та спеціальних подій (свята) з точністю 92% [1].

Model Predictive Control (MPC) вирішує задачу оптимізації кожні 15 хвилин з горизонтом прогнозування 4 години. Цільова функція мінімізує [4]:

$$J = \sum_{t=1}^T (C_{grid}(t) \cdot P_{grid}(t) + C_{gen}(t) \cdot P_{gen}(t) + C_{batt} \cdot |P_{batt}(t)| + C_{shed} \cdot P_{shed}(t))$$

де C_{grid} – вартість імпорту/експорту з мережі, P_{grid} – потужність обміну з мережею, C_{gen} – вартість генерації керованих джерел, C_{batt} – знос батарей, P_{shed} – потужність відключеного навантаження.

Обмеження включають: баланс потужності $\sum P_{gen} + P_{grid} + P_{batt} = P_{load}$, межі заряду батарей $SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max}$, рампи генераторів $|P_{gen}(t) - P_{gen}(t - 1)| \leq \Delta P_{max}$.

Для довгострокового планування (тиждень/місяць) система використовує Particle Swarm Optimization (PSO) або Grey Wolf Optimizer (GWO) для знаходження глобально-оптимальної стратегії керування. Алгоритми оптимізують розклад технічного обслуговування генераторів, планування закупівлі енергії з мережі за динамічними тарифами та стратегію участі у Demand Response програмах [4].

При детектуванні збою основної мережі (падіння напруги $>15\%$ або відхилення частоти >0.5 Гц) система переходить у режим islanding протягом 80-100 мс. У цьому режимі пріоритетом є підтримка критичних навантажень (лікарні, дата-центри, системи безпеки) через відключення некритичних споживачів. Grid-forming інвертори забезпечують формування напруги та частоти $50 \text{ Гц} \pm 0.2 \text{ Гц}$ у автономній мережі [2, 3].

Центральний контролер базується на промисловому ПЛК з вбудованими модулями MPC. Система збирає дані від 50-200 точок вимірювання (розумні лічильники, датчики) через протоколи Modbus TCP/IP та IEC 61850 з частотою 1-10 Гц [4].

Прогнозні моделі машинного навчання виконуються на edge-сервері з GPU для прискорення обчислень нейронних мереж. Оновлення прогнозів відбувається кожні 15 хвилин на основі нових метеоданих та даних з локальних метеостанцій.^[1]

Захист системи від кібератак реалізується через багаторівневі механізми безпеки, включаючи шифрування даних та моніторинг несанкціонованого доступу [2].

Моделювання мікромережі кампусу університету (5 МВт пікового навантаження, 2 МВт ФЕС, 500 кВт вітрогенератори, 1.5 МВт·год батареї) протягом року показало: зниження операційних витрат на 32% (з \$850k до \$578k/рік) завдяки оптимізації купівлі-продажу енергії ; підвищення частки самоспоживання ВДЕ з 42% до 78% через оптимальне керування батареями ; зниження пікового навантаження з мережі на 45% завдяки peak shaving; стабільність напруги $\pm 1.2\%$ у острівному режимі протягом 8-годинного тесту.

Висновок. Розроблена інтелектуальна система керування розподілом електроенергії в мікромережах на основі гібридного підходу MPC та метаевристичної оптимізації забезпечує зниження операційних витрат на 30-35%, підвищення частки самоспоживання ВДЕ до 75-80% та надійність енергопостачання у автономному режимі. Інтеграція машинного навчання для прогнозування генерації та навантаження дозволяє досягти точності 89-94%, що критично важливо для ефективного планування та балансування мікромереж з високою часткою інтермітентних ВДЕ.

Список використаних джерел:

1. Pavlenko, V., Ponomarenko, I., Morhulets, O., Ponomarenko, D., Danylchenko, D. Synergy of Blockchain and Artificial Intelligence for Decentralized Smart Energy Management. In: Smart Innovations in Energy and Mechanical Systems. SIEMS 2025. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1480. Springer, Cham, 2025. DOI: 10.1007/978-3-031-95191-6_18
2. Shavolkin O., Shvedchykova I., Demishonkova S., Pavlenko V. Increasing the efficiency of hybrid photoelectric system equipped with a storage battery to meet the needs of local object with generation of electricity into grid. Przegląd Elektrotechniczny. 2021. Vol. 97, №11.
3. Pavlenko, V., Volianyk, O. Research of technical solutions for cybersecurity of power systems with integrated renewable energy sources // Електромеханічні та інформаційні системи: матеріали конф. КНУТД. 2024. Вип. 8. С. 93-94. URL: <http://ser.knutd.edu.ua/handle/123456789/28968>
4. Kaplun V., Kruhliak H., Makarevych S., Kulibaba Y. Dynamic energy management system with real time component control to increase the efficiency of local polygeneration microgrid. Przegląd Elektrotechniczny. 2023. №9.
5. Petrenko A., Kruhliak H., Lyktei V., Ivanchenko A. Електроенергетичні системи на основі відновлюваних джерел енергії, інтегровані в розподільні мережі. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2025. №6. С. 5-14. DOI: 10.31548/energiya676.2024.005