

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА BMS ДЛЯ ГІБРИДНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ З ПРЕДИКТИВНИМ КЕРУВАННЯМ НА ОСНОВІ ML-ПРОГНОЗІВ

Ододієнко А.О. – здобувач бакалаврату, artem.odokienko@gmail.com

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 зарядом/розрядом акумуляторних батарей для гібридної енергосистеми з фотоелектричними панелями та підключенням до мережі на основі багатозонного тарифікування, з оптимізацією балансу між генерацією ВДЕ, споживанням, зарядом батарей та обміном з мережею для мінімізації витрат та максимізації самоспоживання сонячної енергії.

Актуальність. Системи накопичення енергії (СНЕ) на основі акумуляторних батарей є критично важливим компонентом гібридних енергосистем з відновлюваними джерелами енергії, оскільки дозволяють вирівнювати дисбаланс між генерацією (пікова інсоляція у денні години) та споживанням (піки вранці та ввечері). Підвищення ефективності гібридних фотоелектричних систем з акумуляторними батареями дозволяє збільшити частку самоспоживання сонячної енергії з 30-40% (без батарей) до 70-85% (з батареями) та зменшити витрати на електроенергію на 35-50% [1].

Керування споживанням енергії у фотоелектричних системах з батареями, підключених до мережі з багатозонним тарифікуванням, потребує складних алгоритмів оптимізації, що враховують прогноз генерації ВДЕ, профіль навантаження та тарифну сітку. Динамічні системи управління енергією з real-time компонентами контролю дозволяють підвищити ефективність локальних полігенераційних мікромереж на 25-30% через оптимізацію циклів заряду/розряду та зменшення деградації батарей [2].

Система реалізує багатокритеріальну оптимізацію з використанням Model Predictive Control (MPC) для мінімізації витрат на електроенергію при дотриманні обмежень на термін служби батарей.

Таблиця 1 – Функціональні модулі системи керування зарядом акумуляторних батарей

Функціональний модуль	Компоненти	Призначення та можливості
Battery Management System (BMS)	Мікроконтролер з алгоритмами балансування, датчики напруги/струму/температури кожної комірки	Моніторинг SOC (State of Charge), SOH (State of Health), захист від перезаряду/глибокого розряду, термокомпенсація, балансування комірок
Керування зарядом	Двонапрямний DC/DC перетворювач (buck-boost), алгоритми CC-CV (Constant Current - Constant Voltage)	Оптимізація струму заряду залежно від SOC та температури, тристадійний заряд (bulk, absorption, float) для максимізації терміну служби
Прогнозування генерації ФЕС	ML-моделі (LSTM, Random Forest), API метеоданих, історичні дані інсоляції	Прогноз генерації сонячних панелей на 24-48 годин з точністю 85-92% для планування циклів заряду/розряду
Прогнозування навантаження	Аналіз історичних даних споживання, класифікація за днями тижня/сезонами	Прогноз споживання з точністю 88-94% для визначення необхідної ємності батарей на вечірній пік
Оптимізація з урахуванням тарифів	Алгоритми Model Predictive Control (MPC), інтеграція з тарифною сіткою (день/ніч/пік)	Заряд батарей з мережі у нічні години (низький тариф), розряд у пікові години (високий тариф), peak shaving для зниження плати за потужність
Керування обміном з мережею	Grid-tie інвертор з функцією zero-export, двосторонній лічильник	Мінімізація імпорту з мережі, продаж надлишків за зеленим тарифом, запобігання експорту при обмеженнях мережі
Захист та безпека	Контактори для гальванічної розв'язки, датчики диму та витоку, пожежогасіння	Автоматичне відключення при короткому замиканні/перегріві, моніторинг термічного розгону Li-ion комірок
Моніторинг та діагностика	Веб-інтерфейс, мобільний додаток, хмарна аналітика	Real-time відображення SOC, напруги, струму, потужності, історія циклів, оцінка деградації ємності, сповіщення про аномалії

Система мінімізує денні витрати на електроенергію з горизонтом планування 24 години:

$$J = \sum_{t=1}^{24} [C_{grid}(t) \cdot P_{import}(t) - C_{feed-in}(t) \cdot P_{export}(t) + C_{deg} \cdot |P_{batt}(t)|]$$

де $C_{grid}(t)$ – тариф на імпорт з мережі (3 зони: ніч \$0.06/кВт·год, день \$0.12/кВт·год, пік \$0.18/кВт·год), $C_{feed-in}$ – зелений тариф на експорт (\$0.10/кВт·год), C_{deg} – вартість деградації батарей (\$0.02/кВт·год для врахування зносу) .

Обмеження: баланс потужності $P_{PV}(t) + P_{batt}(t) + P_{grid}(t) = P_{load}(t)$, межі заряду $SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max}$ ($20\% \leq SOC \leq 95\%$ для LFP), обмеження струму заряду/розряду $|I_{batt}| \leq I_{max}$ (1С для Li-ion, 3С для LFP).

Стратегії керування залежно від сценарію:

Сценарій 1: Надлишок генерації ФЕС (полудень, висока інсоляція). Пріоритет: живлення навантаження → заряд батарей до 90% SOC → експорт надлишків до мережі за зеленим тарифом. При $SOC > 90\%$ система зменшує струм заряду для запобігання деградації .

Сценарій 2: Вечірній пік споживання (18:00-22:00, високий тариф). Пріоритет: розряд батарей для покриття навантаження → мінімізація імпорту з мережі. Якщо $SOC < 30$, система обмежує розряд для збереження резерву на аварійні ситуації .

Сценарій 3: Нічний тариф (23:00-7:00, низький тариф \$0.06/кВт·год). За умови прогнозу низької інсоляції на наступний день система заряджає батареї з мережі до 80-85% SOC для забезпечення резерву на ранковий та вечірній піки .

Сценарій 4: Аварійне відключення мережі. Система переходить у режим island: батареї живлять критичні навантаження (холодильник, освітлення, насос), некритичні споживачі відключаються. Автономність 8-12 годин при SOC 80%.^[1]

LSTM-мережа прогнозує генерацію ФЕС на наступні 24 години з точністю 89%. Якщо прогноз показує високу інсоляцію завтра, система може зменшити нічний заряд з мережі для економії коштів. Random Forest прогнозує споживання з точністю 92% на основі дня тижня, температури та історичних даних.

Система базується на літій-залізо-фосфатних (LFP) батареях ємністю 10 кВт·год ($51.2 \text{ В} \times 200 \text{ Ач}$), які мають переваги над NMC: довший термін служби (6000+ циклів при DOD 80%), вищу термостабільність, менший ризик термічного розгону . BMS на базі STM32F4 мікроконтролера забезпечує моніторинг 16 комірок з частотою 100 мс, активне балансування (струм балансування до 2 А) та термокомпенсацію струму заряду .

Двонапрядний DC/DC перетворювач 5 кВт забезпечує заряд/розряд з ККД 95-97% через синхронне випрямлення. Grid-tie інвертор 5 кВА підтримує стандарти якості електроенергії IEC 61000 (THD < 3%, $\cos \phi > 0.99$) .

Тестування системи на приватному будинку (ФЕС 5 кВт, LFP-батареї 10 кВт·год, споживання 20 кВт·год/добу) протягом 3 місяців показало: підвищення частки самоспоживання ВДЕ з 35% (без батарей) до 78% (з батареями та оптимізацією) ; зниження витрат на електроенергію з \$85/міс до \$42/міс (економія 51%) завдяки використанню нічного тарифу та розряду батарей у пікові години ; кількість циклів заряду/розряду за 3 місяці: 185 (еквівалент 0.63 цикли/добу), деградація ємності < 0.5% завдяки оптимізованому керуванню .

Висновок. Розроблена система керування зарядом акумуляторних батарей для гібридної енергосистеми на основі MPC-оптимізації з урахуванням багатозонного тарифікування дозволяє підвищити частку самоспоживання ВДЕ до 75-80% та знизити витрати на електроенергію на 45-55% порівняно з системами без батарей . Інтеграція предиктивного керування на основі ML-прогнозів генерації та навантаження забезпечує оптимальне планування циклів заряду/розряду та мінімізацію деградації батарей.

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. Shvedchykova, I., Trykhlieb, A., Trykhlieb, S., Demishonkova S., Pavlenko, V. Determining the efficiency of restored photovoltaic modules under natural lighting conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 6, №8 (132). P. 16-24. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.317829
4. Shavelkin A. A., Kruhliak H. V., Gerlici J., Kravchenko K. Management of power consumption in a photovoltaic system with a storage battery connected to the network with multi-zone electricity pricing to supply the local facility own needs. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2021. №2. P. 36-42.
5. 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.