

МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ПОТОКАМИ ПОТУЖНОСТІ ГІБРИДНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ НА ОСНОВІ ДИНАМІЧНОГО ПРОГРАМУВАННЯ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Дослідження присвячено розв'язанню задачі оптимального керування потоками потужності в гібридних енергетичних системах (PV+BESS). Побудовано математичну модель процесу накопичення та віддачі енергії, яку формалізовано як задачу багатокрокової оптимізації. Запропоновано алгоритм прийняття рішень на основі методу динамічного програмування (рівняння Беллмана), критерієм ефективності якого обрано максимізацію економічного прибутку від арбітражних операцій на ринку "на добу наперед" (DAM). Проведено чисельне моделювання роботи системи з урахуванням технічних обмежень (SOC, degradation, grid limits), яке підтвердило ефективність запропонованої стратегії порівняно з жадібними алгоритмами.

Ключові слова: системний аналіз, динамічне програмування, системи накопичення енергії (BESS), фотоелектричні станції, оптимальне керування, ринок «на добу наперед», ціновий арбітраж, рівняння Беллмана, State of Charge (SOC).

Abstract

The study addresses the problem of optimal power flow control in hybrid energy systems (PV+BESS). A mathematical model of energy storage and discharge processes is constructed and formalized as a multi-stage optimization problem. A decision-making algorithm based on Dynamic Programming (Bellman equation) is proposed, with the efficiency criterion being the maximization of economic profit from arbitrage operations on the Day-Ahead Market (DAM). Numerical simulation of the system operation, considering technical constraints (SOC, degradation, grid limits), confirmed the effectiveness of the proposed strategy compared to greedy algorithms.

Keywords: system analysis, dynamic programming, Battery Energy Storage Systems (BESS), photovoltaic power stations, optimal control, Day-Ahead Market (DAM), price arbitrage, Bellman equation, State of Charge (SOC).

Вступ

Інформаційні технології відіграють ключову роль у сучасній енергетиці, особливо у сфері керування відновлюваними джерелами енергії. Інтеграція стохастичних джерел відновлюваної енергії (ВДЕ), зокрема фотоелектричних станцій, створює проблему балансування генерації та попиту. Системи накопичення енергії (BESS) виступають демпфером, що дозволяє вирівнювати графік навантаження. Ефективність фотоелектричних станцій (ФЕС) суттєво залежить від можливості балансування генерації та споживання, що реалізується через системи накопичення енергії (BESS). Однак ефективність використання BESS критично залежить від стратегії керування зарядом/розрядом.

Актуальність роботи полягає у необхідності розробки адаптивних алгоритмів керування, здатних знаходити глобальний екстремум цільової функції (прибутку) в умовах високої волатильності ринкових цін. Методи математичної оптимізації відкривають нові можливості для побудови стратегій, що дозволяють накопичувати енергію в періоди низьких цін або надлишкової генерації та реалізовувати її під час пікового попиту. Одним із найбільш ефективних підходів для вирішення таких задач є метод динамічного програмування (DP), який дозволяє знайти глобально оптимальну траєкторію стану заряду (SOC) батареї на заданому горизонті планування. Об'єктом дослідження є процес функціонування BESS у складі сонячної електростанції. Предметом дослідження є методи динамічної оптимізації режимів роботи акумуляторних батарей.

Оптимізація роботи BESS

Задача оптимізації формалізована як пошук оптимальної траєкторії стану заряду $SOC(t)$ на дискретному часовому інтервалі T . Стан системи в момент часу t описується рівнем енергії в акумуляторі. Цільова функція

J визначається як сума прибутків на кожному кроці, мінус витрати на амортизацію. Для розв'язання задачі застосовано рекурентне співвідношення Беллмана, що дозволяє декомпозувати задачу на послідовність простіших підзадач.

Для проведення моделювання було використано дані про годинну генерацію ФЕС та погодинні ціни на електроенергію (Day-Ahead Market). Програмна реалізація виконана у середовищі Google Colab з використанням бібліотек Pandas та NumPy для обробки даних.

Алгоритм optimize_bess базується на створенні матриці станів, де кожен вузол відповідає певному рівню заряду батареї (SOC) у конкретний момент часу. Основними параметрами моделі виступили:

- Ємність системи: 32 000 кВт*год.
- Потужність: 8 000 кВт.
- Ефективність циклу (RTE): 0.88.
- Економічні чинники: комісії трейдера та тарифи на передачу (TSO).

На рисунку 1 представлено візуалізацію роботи алгоритму для випадкового 24-годинного періоду.

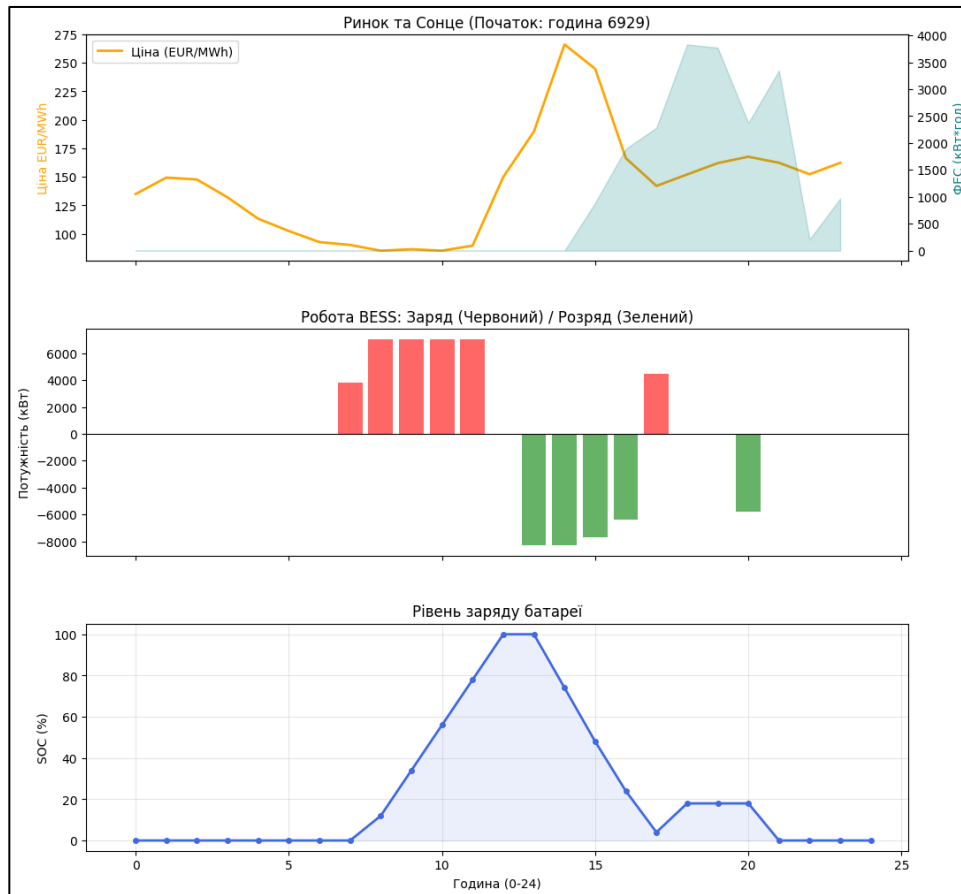


Рисунок 1. Візуалізація роботи алгоритму

З графіків видно, що система автоматично обирає періоди для заряду, коли ціна на ринку мінімальна або спостерігається надлишок сонячної генерації. Розряд батареї (зелені стовпці на графіку потужності) відбувається у години максимальних цін, що забезпечує отримання максимального доходу

Аналіз стану заряду (SOC) демонструє стабільну роботу алгоритму: батарея не виходить за межі встановленої ємності, а переходи між станами відбуваються з урахуванням фізичних обмежень потужності та ККД

Для кращого розуміння роботи алгоритму на рисунку 2 представлено блок схему алгоритму.

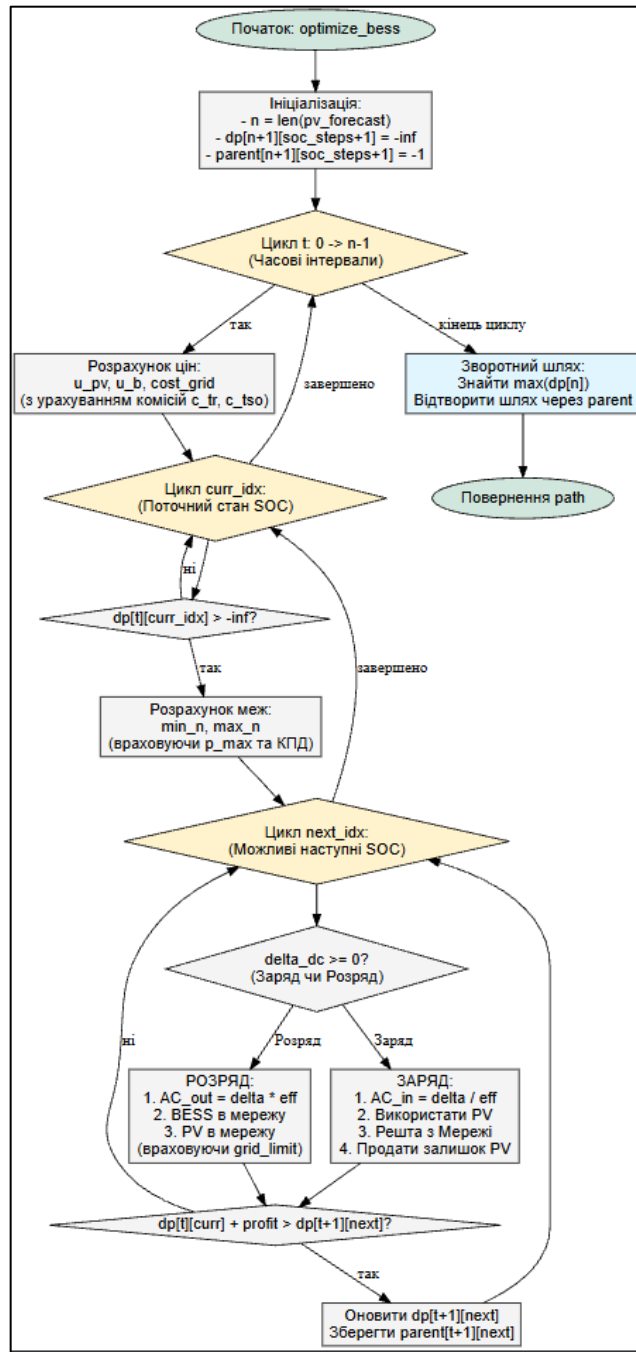


Рисунок 2 Блок схема алгоритму

Висновки

Формалізовано задачу керування BESS як задачу дискретної оптимізації. Визначено простір станів та переходів системи з урахуванням фізичних обмежень (ККД циклу, ліміти інвертора, ємність).

Розроблено та імплементовано алгоритм на базі динамічного програмування, який, на відміну від евристичних методів, гарантує знаходження глобального оптимуму на заданому горизонті планування.

Чисельний експеримент на реальних даних генерації та ринкових цін показав, що застосування розробленої стратегії дозволяє збільшити прибутковість станції за рахунок ефективного цінового арбітражу (купівля в години провалу цін, продаж у піки).

Виявлено, що ефективність стратегії критично залежить від точності прогнозів цін та врахування операційних витрат (комісій). Отримані результати можуть бути використані для проектування інтелектуальних систем керування промисловими накопичувачами енергії з метою підвищення їх економічної окупності та енергетичної стабільності мережі. Подальший розвиток методу передбачає перехід від детермінованого підходу до стохастичного динамічного програмування для врахування ймовірнісного характеру прогнозу погоди.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1.Pandas Documentation. URL.: <https://pandas.pydata.org/docs/>
- 2.Matplotlib Pyplot Documentation. URL.: https://matplotlib.org/stable/api/pyplot_summary.html
- 3.Bellman R. Dynamic Programming. Princeton University Press. 1957. 342 p. URL: <https://press.princeton.edu/books/hardcover/9780691079516/dynamic-programming>

Пілат Іван Віталійович – студент групи СА-23б, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця. e-mail: keppte@gmail.com

Жуков Сергій Олександрович– к.т.н., доцент кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, Вінницький національний технічний університет, e-mail: sazhukov@gmail.com

Pilat Ivan Vitaliyovych – student of group SA-23b, Faculty of Intellectual Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. e-mail: keppte@gmail.com

Zhukov Serhii O. - Ph.D., Assistant Professor of the Department of System Analysis and Information Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: sazhukov@gmail.com