

СИСТЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ ЯК РЕСУРС ГНУЧКОСТІ ДЛЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Запропоновано підхід до оцінювання систем накопичення електричної енергії як ресурсу гнучкості для електричних систем із високою часткою відновлюваних джерел енергії. Показано, що ефективність BESS визначається не лише встановленою потужністю та ємністю, а й місцем приєднання, алгоритмом керування, глибиною циклів, режимом взаємодії з ВДЕ, навантаженням і ринковими механізмами. Обґрунтовано необхідність розмежування функцій накопичувачів у зменшенні небалансів електричної енергії та в наданні допоміжних послуг з регулювання частоти. Сформовано критерії доцільного застосування BESS для підвищення гнучкості, живучості та керованості електроенергетичних систем.

Ключові слова: системи накопичення енергії, BESS, відновлювані джерела енергії, гнучкість енергосистеми, небаланси, балансування, допоміжні послуги, керування навантаженням.

Abstract

An approach to assessing battery energy storage systems as a flexibility resource for power systems with a high share of renewable energy sources is proposed. It is shown that BESS efficiency is determined not only by installed power and energy capacity, but also by connection point, control algorithm, cycle depth, interaction with renewable generation, load, and market mechanisms. The need to distinguish between the functions of storage systems in reducing electricity imbalances and in providing ancillary services for frequency regulation is substantiated. Criteria for the appropriate application of BESS to increase flexibility, survivability, and controllability of power systems are formulated.

Keywords: energy storage systems, BESS, renewable energy sources, power system flexibility, imbalances, balancing, ancillary services, demand-side management.

Зростання частки сонячної та вітрової генерації змінює характер задач оперативного керування електроенергетичною системою. ВДЕ зменшують паливну залежність і викиди, однак їх виробіток має стохастичний характер, залежить від погодних умов і супроводжується прогнозними похибками. У результаті зростає потреба у ресурсах, здатних швидко змінювати потужність, зміщувати електроенергію в часі, обмежувати пікові навантаження та зменшувати обсяги небалансів.

В Україні правові передумови розвитку установок зберігання енергії були сформовані Законом України №2046-ІХ, яким внесено зміни до законодавства щодо розвитку установок зберігання енергії [1]. Проте сам факт появи нормативної бази не вирішує інженерну задачу вибору параметрів накопичувача. Для енергосистеми важливо не просто встановити BESS, а визначити, яку саме функцію він має виконувати: зменшення небалансів, обмеження перетоків, згладжування графіка ВДЕ, покриття вечірнього піка, підвищення надійності локального вузла або участь у ринку допоміжних послуг.

Технічне оцінювання накопичувачів повинно спиратися на стандартизовані параметри. ДСТУ EN IEC 62933-2-1:2022 визначає загальні технічні вимоги до параметрів систем накопичення електричної енергії та методів їх випробувань [2]. Для практичних розрахунків ключовими є встановлена потужність, енергетична ємність, діапазон допустимого стану заряду, ККД циклу заряд–розряд, допустима глибина розряду, швидкодія перетворювача, ресурс циклів і обмеження за температурним режимом. Саме поєднання цих параметрів визначає, чи може накопичувач бути ефективним для короткочасного

згладжування похибок прогнозу, внутрішньодобового перенесення енергії або резервного живлення відповідальних споживачів.

Принципова помилка під час обґрунтування BESS полягає у зведенні його ролі тільки до «балансування». Насправді накопичувач може одночасно виконувати кілька функцій, але кожна з них має інші технічні та ринкові вимоги. У контексті балансуючого ринку накопичувач може зменшувати небаланси електричної енергії, компенсуючи відхилення фактичної генерації або споживання від заявленого графіка. Натомість участь у регулюванні частоти та підтриманні активної потужності належить до сфери допоміжних послуг і потребує окремих вимог до сертифікації, доступної потужності, швидкодії та готовності ресурсу.

За матеріалами IEA, батарейні технології стають одним із ключових елементів безпечного енергетичного переходу, оскільки забезпечують гнучкість, необхідну для інтеграції зростаючих обсягів сонячної та вітрової генерації [3]. Проте цінність BESS для енергосистеми не є сталою величиною. Вона залежить від структури генерації, графіка навантаження, рівня мережних обмежень, точності прогнозування, вартості небалансів, наявності маневрової генерації та правил участі накопичувачів у ринку.

Для систем з ВДЕ доцільно виділяти три базові режими використання BESS. Перший — короткочасне згладжування швидких змін потужності, коли накопичувач компенсує різкі коливання генерації сонячної або вітрової електростанції. Другий — внутрішньодобове перенесення енергії, коли надлишкова генерація накопичується в години низького попиту або низької ціни та використовується в години дефіциту. Третій — локальне підвищення надійності, коли BESS підтримує електропостачання критичних споживачів, зменшує навантаження на мережу та може працювати у складі мікромережі.

Особливої актуальності для України набуває локальний рівень застосування накопичувачів. Через пошкодження мережевої та генеруючої інфраструктури важливо не лише нарощувати загальносистемну маневровість, а й формувати енергетичні вузли, здатні частково підтримувати власний баланс. У таких вузлах BESS може працювати спільно з СЕС, вітровою генерацією, дизельними або газопоршневими установками, керованим навантаженням і системами автоматичного керування. Це підвищує живучість електропостачання, зменшує залежність критичних споживачів від зовнішньої мережі та створює технічну основу для роботи локальних енергетичних кластерів.

Разом з тим BESS не є універсальною заміною маневрової генерації. Його ефективність обмежується енергетичною ємністю, ресурсом циклів, вартістю деградації та режимом заряджання. Якщо накопичувач постійно використовується для глибоких циклів, його економічний ресурс витрачається швидше. Тому алгоритм керування має враховувати не лише поточну ціну електроенергії або величину небалансу, а й залишковий ресурс батареї, очікуваний прогноз генерації ВДЕ, імовірність дефіциту в наступні години та необхідність збереження резерву стану заряду.

У звіті IEA щодо інтеграції сонячної та вітрової генерації підкреслено, що системна інтеграція ВДЕ потребує не одного окремого інструмента, а комплексу заходів: розвитку мереж, гнучкої генерації, накопичувачів, керування попитом, цифровізації та вдосконалення ринкових правил [4]. Це означає, що BESS повинен розглядатися як частина ширшої системи гнучкості, а не як ізольований технічний пристрій.

Європейська практика балансування також демонструє, що гнучкі ресурси мають оцінюватися за здатністю надавати конкретні продукти в межах визначених часових інтервалів. ENTSO-E Balancing Report 2024 розглядає розвиток балансуючих платформ і продуктів балансуючої енергії, пов'язаних із резервами відновлення частоти та заміщення [5]. Для України важливим є адаптування цих підходів з урахуванням власної структури генерації, стану мережі, наявності ВДЕ та потреб післявоєнної відбудови.

Науково-технічне обґрунтування застосування BESS має базуватися на багатокритеріальному підході. До основних критеріїв доцільно віднести: очікуване зменшення небалансів, обсяг уникнутого обмеження генерації ВДЕ, зменшення пікового навантаження, вплив на режим напруги в точці приєднання, можливість резервування критичних споживачів, економічний ефект від участі в ринках, вартість

деградації батареї та екологічні вимоги до життєвого циклу. IRENA підкреслює, що оцінювання накопичувачів має враховувати не одну послугу, а сукупну системну цінність, яку вони створюють для мережі, ринку та споживача [6].

Отже, перспективність BESS у системах з ВДЕ визначається не самим фактом встановлення накопичувача, а правильним узгодженням його параметрів із режимною задачею. Для сонячної генерації першочерговим часто є перенесення енергії з денного максимуму виробітку до вечірнього піку споживання. Для вітрової генерації важливішими можуть бути компенсація прогнозних похибок і згладжування швидких змін потужності. Для локальних енергетичних кластерів критичним є забезпечення резерву стану заряду для підтримання живлення відповідальних споживачів. Тому універсального співвідношення потужності та ємності BESS не існує; воно має визначатися на основі графіків генерації, навантаження, ринкових сигналів і вимог до надійності.

Висновки

Системи накопичення електричної енергії є одним із ключових ресурсів гнучкості для електричних систем з відновлюваними джерелами енергії. Їх застосування дозволяє зменшувати небаланси, переносити енергію в часі, знижувати обмеження генерації ВДЕ, підтримувати локальні енергетичні вузли та підвищувати живучість електропостачання. Разом з тим BESS не слід розглядати як універсальний засіб вирішення всіх режимних проблем. Його ефективність визначається місцем приєднання, співвідношенням потужності та ємності, алгоритмом керування, ресурсом циклів, вартістю деградації та можливістю одночасного надання кількох послуг. Для України найбільш доцільним є багатофункціональне використання BESS у поєднанні з ВДЕ, керованим попитом, локальними енергетичними кластерами та ринковими механізмами балансування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Про внесення змін до деяких законів України щодо розвитку установок зберігання енергії : Закон України від 15.02.2022 № 2046-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2046-20>.
2. ДСТУ EN IEC 62933-2-1:2022. Системи накопичення електричної енергії (EES). Частина 2-1. Параметри EES та методи випробувань. Загальні технічні вимоги (EN IEC 62933-2-1:2018, IDT; IEC 62933-2-1:2017, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.
3. Batteries and Secure Energy Transitions. International Energy Agency, 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions>.
4. Integrating Solar and Wind: Global Experience and Emerging Challenges. International Energy Agency, 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/integrating-solar-and-wind>.
5. ENTSO-E Balancing Report 2024. European Network of Transmission System Operators for Electricity, 2024. URL: https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/nc-tasks/240628_ENTSO-E_Balancing_Report_2024.pdf.
6. Electricity Storage Valuation Framework: Assessing System Value and Ensuring Project Viability. International Renewable Energy Agency, 2020. URL: <https://www.irena.org/publications/2020/Mar/Electricity-Storage-Valuation-Framework>.

Дубовий Роман Геннадійович — студент групи 2ЕСМ-226 факультету електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Вишневецький Святослав Янович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця. e-mail: svyato.vish.ua@gmail.com

Dubovyi Roman H. — student, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Sviatoslav Ya. Vyshnevskiy — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. e-mail: svyato.vish.ua@gmail.com