

Лежнюк Петро Дем'янович
Ластівка Вікторія Богданівна

Підвищення ефективності відновлювальних джерел енергії в електроенергетичних системах

Вінницький національний технічний університет

Анотація У статті досліджено основні аспекти підвищення ефективності використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в електроенергетичних системах (ЕЕС). Розглянуто методи оптимізації виробництва і споживання електроенергії, сучасні технології зберігання енергії, інтеграцію ВДЕ в мережу та цифровізацію процесів управління. Акцент зроблено на вдосконаленні технологій, соціальних і екологічних аспектах. Запропоновані підходи спрямовані на створення стабільних, екологічно безпечних та економічно ефективних енергетичних систем для сталого розвитку суспільства.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, нестабільність генерування, системи накопичення енергії, критеріальний метод, віртуальні електростанції.

Abstract The article investigates the main aspects of increasing the efficiency of renewable energy sources (RES) in electric power systems (EPS). The methods of optimizing the production and consumption of electricity, modern energy storage technologies, integration of RES into the grid, and digitalization of management processes are considered. Emphasis is placed on the improvement of technologies, social and environmental aspects. The proposed approaches are aimed at creating stable, environmentally friendly and cost-effective energy systems for sustainable development of society.

Keywords: renewable energy sources, generation instability, energy storage systems, criterion method, virtual power plants.

Вступ

Зменшення залежності від викопного палива, боротьба зі зміною клімату та досягнення цілей сталого розвитку – усе це можна зробити за допомогою відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Потреби в енергії, яка є чистою та екологічно безпечною, можуть бути задоволені сонячною, вітровою, гідро- та біоенергетикою. Тим не менш, широке використання ВДЕ супроводжується багатьма проблемами. Найпоширенішими з них є нестабільність генерації через погодні умови, необхідність модернізації електромереж і створення технологій для зберігання надлишкової енергії [1].

Для ефективного розвитку ВДЕ потрібен комплексний підхід, який враховує вдосконалення технологій, застосування віртуальних електростанцій для управління процесами, дослідження сучасних технологій систем накопичення енергії, зокрема електрохімічних накопичувачів енергії, водневих та біогазових технологій, а також узгодження графіків виробництва та споживання електроенергії. Усі ці заходи розбудови ВДЕ в електричних мережах ЕЕС перебувають на різних етапах розробки та впровадження. Для успішного підвищення ефективності електричних мереж необхідно розвивати резервні системи для підтримки ВДЕ. Основне завдання полягає у виборі найбільш технічно ефективних і економічно вигідних варіантів [2].

У даній роботі основна увага приділяється стратегіям підвищення ефективності використання ВДЕ. До них належать оптимізація виробництва і споживання електроенергії, розвиток технологій зберігання енергії, інтеграція сучасних рішень та застосування віртуальних електростанцій. Реалізація цих заходів сприятиме не лише підвищенню ефективності електросистем, а й екологічно сталому розвитку суспільства.

Метою є аналіз ключових аспектів підвищення ефективності використання відновлюваних джерел енергії в електроенергетичних системах, а також визначення стратегій і підходів, які сприятимуть стабільній інтеграції ВДЕ в електричні мережі.

Матеріал та результати дослідження

Впровадження ВДЕ у загальну енергетичну систему викликає значні проблеми, включаючи нестабільність виробництва електроенергії сонячними та вітровими електростанціями [1]. Такі джерела часто не відповідають потребам споживачів або прогнозованим графікам генерації, оскільки вони залежать від погоди та часу доби. Це може призвести до нестачі електроенергії в локальних енергетичних системах (ЛЕС). Для вирішення цієї проблеми необхідні резервні потужності, які можуть швидко компенсувати надлишок або дефіцит енергії, спричинені непередбачуваними змінами в генерації електроенергії.

Резервування потужностей можна зробити різними способами [1–3]. Вони класифікуються за різними ознаками, зокрема за тим, для чого вони використовуються. Резервні засоби працюють у режимі заряд/розряд, якщо ВДЕ допомагають балансувати режим енергосистеми, забезпечуючи виробництво електроенергії відповідно до визначених погодинних графіків. Такі системи перетворюють електроенергію, вироблену ВДЕ, у різні види енергії, накопичують її, а потім повертають її в мережу. До таких засобів резервування відносяться методи накопичення енергії, такі як механічний (пневматичні та кінетичні установки), термічний (термо-хімічні, явне та приховане тепло), хімічний (отримання водню, синтез природного газу), електрохімічний (літій-іонні, свинцево-кислотні та натрій-сірчані батареї) і електричний (конденсатори та суперконденсатори).

Під час впровадження систем накопичення електроенергії (СНЄЕ) необхідно враховувати різні аспекти їх використання [3–4]. Це включає технічні характеристики, такі як ємність, тривалість експлуатації, час заряджання та розряджання, швидкість реакції, кількість циклів заряджання/розряджання та економічні показники, такі як вартість, витрати на одиницю потужності та обсяг накопичуваної електроенергії. Крім того, важливо враховувати, наскільки зрілими є технології з точки зору комерційної доступності, впливу на навколишнє середовище та сфери застосування.

Ураховуючи, що впровадження СНЄЕ, особливо в масштабах, вимагає значних інвестицій, вибір оптимальної стратегії залежить від очікуваного економічного успіху.

Враховуючи різні аспекти їхнього використання, такі як технічні та економічні характеристики різних технологій акумулювання енергії, рівень зрілості комерційної експлуатації, вплив на навколишнє середовище та завдання, які планується вирішити за допомогою їх використання, наводити числові значення цих характеристик для різних СНЄЕ може бути непродуктивним, оскільки в літературі є значні відхилення в цих характеристиках [4].

Для ефективного вибору засобів резервування використовуються спеціалізовані математичні моделі [6]. В їх основі лежить метод теорії подібності, зокрема критеріальний метод, який дозволяє оцінити ефективність різних методів резервування у відносних одиницях. Ці моделі порівнюють різні технології за ключовими показниками, такими як потужність, витрати на встановлення, експлуатаційні витрати, швидкість реагування на зміни у виробництві та інші параметри.

Використовуючи критеріальний метод, ми можемо зробити відносну оцінку для порівняння окремих методів резервування ВДЕ та отримати їх бали відповідно до обраного критерію оптимізації.

Виходячи з можливостей методу, формується математична модель. Формування критеріальної моделі вимагає певних припущень. Основна увага ЛЕС зосереджена на електрохімічних накопичувачах, установках для виробництва «зеленого» водню та установках для перетворення електроенергії, а також установках когенерації біогазу. Централізоване розміщення установок ЕХН, водневих і біогазових технологій пов'язане з втратами електроенергії в мережі, і ці втрати враховуються в $B_{рез}$ оптимізаційній моделі [6].

З врахуванням сказаного, математичну модель оптимізації питомих витрат на 1 кВт резервної потужності для урівноваження генерування ВДЕ, в якій враховуються особливості режимів ЕЕС, можна представити у такому вигляді:

$$B_{рез} = C_1 P_x^{-1} + C_2 P_в + C_3 P_г + C_4 P_c^{-1} + C_5 P_к + C_6 P_x^2 P_c^2 P_в^{-1} P_г^{-1} P_к^{-1} \rightarrow \min \quad (1),$$

за умови, що $P_c \leq G_c$ або $g_c P_c \leq 1$,

де P_x – потужність резервування накопичувачами електрохімічного типу; $P_в$ – потужність водневих технологій; $P_г$ – потужність біогазових технологій як резерву; P_c – потужність системного резерву, що є фактично компенсацією за утримання резерву на енергоагрегатах ТЕС, що працюють за ціновими

заявками; P_k – витрати на реалізацію координації графіків генерування і споживання електроенергії в ЕЕС;

$C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ – узагальнені константи, що містять вихідні дані задачі (в першу чергу це цінові показники); G_c – максимальна потужність системного резерву, яку можна використати для урівноваження генерування ВДЕ ($g_c = 1/G_c$).

У рівнянні (1) не враховані деякі складові способів резервування задачі мінімізації $B_{рез}$. Зокрема, це витрати на збільшення пропускної здатності ліній електропередачі, яка на початковому етапі вважається достатньою.

В критеріальній формі вираз витрат (1) у відносних одиницях запишеться:

$$B_{рез*} = \frac{\pi_{10}}{P_{x*}} + \pi_{20} P_{\theta*} + \pi_{30} P_{\varepsilon*} + \frac{\pi_{40}}{P_{c*}} + \pi_{50} \frac{P_{x*}^2 P_{c*}^2}{P_{\theta*} P_{\varepsilon*}}, \quad (2)$$

де $B_{рез*} = B_{рез} / B_{рез \min}$; $P_{x*} = P_x / P_{x0}$, $P_{\theta*} = P_{\theta} / P_{\theta0}$, $P_{\varepsilon*} = P_{\varepsilon} / P_{\varepsilon0}$, $P_{c*} = P_c / P_{c0}$, де $P_x, P_{\theta}, P_{\varepsilon}, P_c$ – відповідно поточні та оптимальні значення потужностей способів резервування; π_i – критерії подібності, що визначаються за [6].

Для підвищення ефективності електричних систем, які використовують альтернативні джерела енергії, важливо оптимізувати як виробництво, так і споживання енергії. Віртуальні електричні станції (ВЕС) дозволяють відстежувати споживання в режимі реального часу та автоматично регулювати потоки енергії, що зменшує навантаження на мережу [5]. Прогнозування генерації на основі погодних даних дозволяє забезпечити стабільність постачання та зменшити втрати енергії. Сучасні трансформатори та розподілена генерація зменшують втрати енергії під час передачі.

ВЕС виконують важливу функцію моніторингу джерел виробництва електроенергії в реальному часі. Наприклад, система забезпечує постійне електропостачання споживачів, автоматично перемикаючись на інше джерело, якщо на одному з джерел паде напруга. Стабілізація та керування потужністю електросистеми є ще однією важливою функцією. ВЕС можуть змінювати виробництво та розподіл електроенергії залежно від попиту. Станція використовує додаткові ресурси, особливо збережену енергію в накопичувачах, щоб підтримувати стабільність електричної мережі, коли попит зростає [5].

Крім того, ВЕС прогнозує виробництво електроенергії, що дозволяє прогнозувати обсяги генерації з різних джерел. Це гарантує ефективне використання ресурсів і зменшення втрат енергії.

Функція зберігання енергії особливо важлива для нерівномірних джерел. Наприклад, вдень сонячні панелі виробляють енергію, але вночі вона споживається. ВЕС можуть накопичувати надлишкову енергію для використання під час нестачі генерації.

Ще однією перевагою електроенергетичних станцій є оптимізація використання джерел енергії. Система збільшує ефективність, знижує викиди та максимізує виробничий результат. Наприклад, сонячні панелі забезпечують більшу частину виробництва енергії в сонячні дні, але в похмурі дні система використовує вітряки та інші джерела енергії, щоб задовольнити попит.

ВЕС також сприяє стабільності мережі. Навіть у складних умовах вона безперебійно постачає електроенергію з кількох джерел генерації. Таким чином, ВЕС є сучасним інструментом, який дозволяє оптимізувати роботу електричних систем, забезпечуючи їхню ефективність, стабільність і надійність навіть у складних умовах експлуатації.

Висновок

Впровадження відновлюваних джерел енергії в загальну енергетичну систему відкриває перспективи сталого розвитку, але одночасно створює низку технічних викликів, таких як нестабільність генерації та необхідність забезпечення балансу між виробництвом і споживанням. Рішення цих проблем потребує впровадження резервних потужностей, систем накопичення енергії.

Застосування сучасних технологій, таких як електрохімічні накопичувачі, установки для виробництва «зеленого» водню та когенераційні біогазові установки, сприяє підвищенню ефективності

енергетичних систем.Віртуальні електростанції відіграють важливу роль у забезпеченні моніторингу в реальному часі, стабілізації та прогнозуванні виробництва, тим самим зменшуючи втрати енергії та покращуючи стабільність мережі.

Оптимізація використання джерел енергії, поєднання інноваційних технологій і цифрових рішень дозволяє ефективно управляти енергетичними ресурсами, забезпечувати стабільність мережі та знижувати екологічний вплив. Таким чином, комплексний підхід до впровадження та управління ВДЕ є ключовим фактором для створення стійкої та ефективної енергетичної системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Відновлювані джерела енергії : монографія / С. О. Кудря, Н. М. Мхітарян, В. Ф. Резцов, Т. В Суржик та ін.; за ред. С. О. Кудрі. Київ : ІВЕ НАН України, 2020.
2. Лежнюк П.Д., Комар В.О., Повстянко К.О. Відносне оцінювання вартості засобів резервування відновлюваних джерел енергії // Енергетика: економіка, технології, екології. – 2023. – №1. – С. 39–45. DOI: 10.20535/1813-5420.1.2023.275958
3. Малогулко Ю.В. Дослідження сучасних технологій систем накопичення енергії / Малогулко Ю.В., Ластівка В.Б. // Znanstvena misel journal. №65/2022, pp. 65-68. ISSN 3124-1123.
4. Малогулко Ю. В., Ластівка В. Б. Дослідження використання систем накопичення електричної енергії. Матеріали ЛІІІ науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 20-22 березня 2024 р.
5. Малогулко Ю. В. Дослідження функціонування віртуальних електростанцій [Електронний ресурс] / Ю. В. Малогулко, Н. О. Пасло, В. Б. Ластівка // Матеріали ЛІІ науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 21-23 червня 2023 р
6. Критеріальний метод в електроенергетиці. / Лежнюк П. Д., Комар В. О., Бевз С. В., Остра Н. В., Рубаненко О. О. // Навчальний посібник. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2012. – 214 с.

Ластівка Вікторія Богданівна — студентка групи 1ЕСМ-21б, факультет електроенергетики, електромеханіки та електротехніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: vlativka19@gmail.com.

Лежнюк Петро Дем'янович – доктор. техн. наук, доцент, професор кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: lezhpd@gmail.com

Lastivka Viktoriya B. - student of 1ESM-21b group, Department of Electricity, Electromechanics and Electrical Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: vlativka19@gmail.com.

Lezhniuk Petro D. – Doctor of Technical Sciences (Dr. Sc.), professor, Vinnitsa National Technical University, professor of power plants and systems department; Vinnitsa, Ukraine; e-mail: lezhpd@gmail.com