

ВОДНЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ВИРІВНЮВАННЯ ГРАФІКІВ ГЕНЕРУВАННЯ ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ПІД ЧАС БАЛАНСУВАННЯ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

Отримано 20 жовт. 2022; рекомендовано до публікації 27 груд. 2022
Доступно онлайн 30 груд. 2022

**В. О. Комар¹, С. О. Кудря², П. Д. Лежнюк³,
І. О. Гунько⁴**

Автор для кореспонденції: Ірина Гунько,
e-mail: iryana_hunko@ukr.net

У роботі показана можливість використання водню як енергоносія для компенсації відхилень графіків генерування електричних станцій, що використовують відновлювані джерела енергії (ВДЕ), зокрема вітрових електростанцій (ВЕС), від заявлених в НЕК «Укренерго». Тим самим забезпечується ефективна участь ВЕС у процесі підтримки частоти й допустимих рівнів напруги в електроенергетичній системі (ЕЕС). Аналізуються можливі методи і способи резервування нерівномірності генерування електроенергії ВДЕ, викликаних погодними умовами, і показано переваги водневої технології над іншими. Вони є універсальнішими, оскільки вироблений з допомогою ВДЕ водень може використовуватися як енергоносієм не тільки в електроенергетиці, а й в інших галузях. Заазом використання водневих технологій під час балансування режимів ЕЕС відкриває нові можливості щодо розбудови вітрових та фотоелектричних станцій в ЕЕС, бо зменшуються штрафні санкції та обмеження у виробленні електроенергії ВДЕ. Розглянуто алгоритм використання водню як енергоносія для зменшення похибки між фактичним і прогнозованим погодинними графіками генерування ВЕС у складі балансувальної групи. Математичні моделі розроблено на основі теорії подібності й критеріального методу. Такий підхід при мінімально доступній вихідній інформації забезпечує можливість порівнювати між собою різні способи резервування нерівномірності генерування ВЕС, оцінювати їх співрозмірність, а також визначити чутливість витрат до потужності способів резервування. Сформовано критеріальні моделі, які дозволяють побудувати залежності витрат на резервування нерівномірності генерування ВЕС від потужності накопичувачів водневого типу та від потужності системного резерву сукупно з пропускною здатністю ліній електропередачі. Показано, що подібні залежності дають можливість більш обґрунтовано вибрати ті чи інші способи резервування відповідно до характеристик і вимог ЕЕС.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, вітрові електричні станції, нестабільність генерування, електроенергетична система, резервування, водневі технології, теорія подібності, критеріальний метод. Бібл. 15. Рис. 2.

¹д-р техн. наук, проф., зав. каф. електричних станцій і систем.
<https://orcid.org/0000-0003-4969-8553>

²чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф., директор.
<https://orcid.org/0000-0002-4798-6853>

³д-р техн. наук, проф., каф. електричних станцій і систем.
<https://orcid.org/0000-0002-9366-3553>

⁴к-т техн. наук, доц., каф. електричних станцій і систем.
<https://orcid.org/0000-0003-2868-4056>

^{1,3,4} Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

^{2,3} Інститут відновлюваної енергетики НАН України, м. Київ, Україна.

HYDROGEN TECHNOLOGIES FOR ALIGNMENT OF GENERATION SCHEDULES OF WIND POWER PLANTS DURING BALANCING OF ENERGY POWER SYSTEM MODES

Received 20 Oct. 2022; accepted 27 Dec. 2022.
Available online 30 Dec. 2022

V. Komar¹, S. Kudrya², P. Lezhniuk³, I. Hunko⁴

Author for correspondence: Iryna Hunko,
e-mail: iryana_hunko@ukr.net

The article shows the possibility of using hydrogen as an energy carrier to compensate for the deviations of the generation schedules of power plants using renewable energy sources (RES), in particular wind power plants (WPP), from those declared by NEC "Ukrenenergo". This ensures the effective participation of wind power plants in the process of maintaining the frequency and

¹DScTech, Prof., Chair of the Department of Power Plants and Systems.
<https://orcid.org/0000-0003-4969-8553>

²Corresponding member of NAS of Ukraine, DScTech, Prof., Director.
<https://orcid.org/0000-0002-4798-6853>

permissible voltage levels in the energy power system (EPS). Possible methods and ways of reserving the unevenness of RES electricity generation caused by weather conditions are analyzed, and the advantages of hydrogen technologies over others are shown. They are more universal, because hydrogen produced with the help of renewable energy sources can be used as an energy carrier not only in the power industry, but also in other industries. At the same time, the use of hydrogen technologies during the balancing of EPS modes opens up new opportunities for the development of wind and solar power plants in the EPS, as fines and restrictions on the production of RES electricity are reduced. The algorithm for using hydrogen as an energy carrier to reduce the error between the actual and forecasted hourly schedules of generation of wind power plants as part of the balancing group is considered. Mathematical models were developed on the basis of the theory of similarity and the criterion method. This approach, based on the minimum available initial information, provides an opportunity to compare different methods of reserving the uneven generation of wind power plants, to assess their proportionality, and also to determine the sensitivity of costs to the capacity of the reserving methods. Criterion models have been formed that allow for the dependence of costs for reserving the uneven generation of wind power plants on the capacity of hydrogen-type accumulators and on the capacity of the system reserve together with the throughput of power transmission lines. It is shown that similar dependencies make it possible to more reasonably choose certain reservation methods in accordance with the characteristics and requirements of the EPS. Ref. 15. Fig. 2.

Keywords: renewable energy sources, wind power plants, generation instability, energy power system, redundancy, hydrogen technology, similarity theory, criterion method.

³DScTech, Prof., Prof. of Department of Power Plants and Systems.
<https://orcid.org/0000-0002-9366-3553>

⁴PhD, Doc., Associate Professor at the Department of Power Plants and Systems.
<https://orcid.org/0000-0003-2868-4056>

^{1,3,4} Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine.

^{2,3} Institute of Renewable Energy NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

Перелік використаних скорочень та позначень

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

ВЕС – вітрові електричні станції

ЕЕС – електроенергетична система

ФЕС – фотоелектричні станції

ТЕС – теплові електричні станції

Вступ та постановка завдання. Основним видам відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), зокрема вітровим і фотоелектричним станціям (ВЕС і ФЕС), властива природна періодичність у роботі та зміна величини потенціалу енергії залежно від часу доби й пори року. Оскільки ВДЕ працюють в Об'єднаній енергосистемі (ОЕС) України і частка виробленої ними електроенергії зростає (іноді до 20% і більше від сумарного балансу електроенергії в ОЕС), то ВДЕ починає суттєво впливати на режими роботи електроенергетичної системи (ЕЕС) [1, 2]. Через недостатню кількість маневрової потужності в ОЕС України на теплових електростанціях (ТЕС) доводиться обмежувати генерування ВДЕ, для того щоб забезпечити стійкість роботи ЕЕС. Очевидно, що це зменшує їх енергоефективність, стримує інвестування та розбудову ВДЕ в ЕЕС. Оскільки так сталося, що йти попереду ситуації, яка склалася з ВДЕ через відсутність вільної маневрової потужності не вдалося, то доводиться надолужувати стан в ЕЕС, розвиваючи системи накопичення електроенергії [3, 4].

Для ефективного використання енергії відновлюваних джерел необхідний енергоносіє, зручний для зберігання, транспортування і використання в режимі електроенергія–зберігання енергії–електроенергія. Таким може бути водень. Розвиток водневої енергетики передбачає побудову ефективної та економічної інфраструктури постачання споживачів воднем – універсальним екологічно чистим енергоносієм [5]. Виробництво водню з метою акумулювання і транспортування енергії є ефективним вирішенням проблеми стабільного енергопостачання від відновлюваних джерел. Широке використання водню як

високоєфективного і екологічно прийняттого енергоносія, а також паливних комірок, здатних із мінімальними втратами перетворювати хімічну енергію водню на електричну енергію, останніми роками розглядаються як найперспективніший шлях до суттєвого скорочення шкідливих викидів в атмосферу [6, 7].

Отримання водню електролітичним розкладом води з використанням «зеленої» електроенергії дає нульовий викид вуглецю, енергія може зберігатися протягом тривалих періодів часу, слугуючи необхідним системним буфером і забезпечуючи стійкість енергетичних систем. Це дає змогу декарбонізувати широкий спектр кінцевого використання, забезпечуючи чисту генерацію та тепло для транспортування й стаціонарних застосувань. Водень у різному стані може транспортуватися на великі відстані, що дозволяє розподіляти енергію як всередині країни виробника водню, так і між іншими країнами.

Коли йдеться про те, що водень як енергоносіє використовується для корегування графіків генерування ВДЕ під час балансування режимів ЕЕС, то слід враховувати, що графіки генерування ФЕС і ВЕС природним чином суттєво відрізняються. ФЕС виробляють електроенергію тільки у світлу частину доби, при чому максимум генерування зазвичай припадає на години з 12 до 15, коли спостерігається зменшення електроспоживання. ВЕС можуть працювати цілодобово, але характерним для них є різко перемінний графік генерування, коли максимум і мінімум генерування відрізняються в рази (приклад генерування ВЕС наведено на рис. 1).

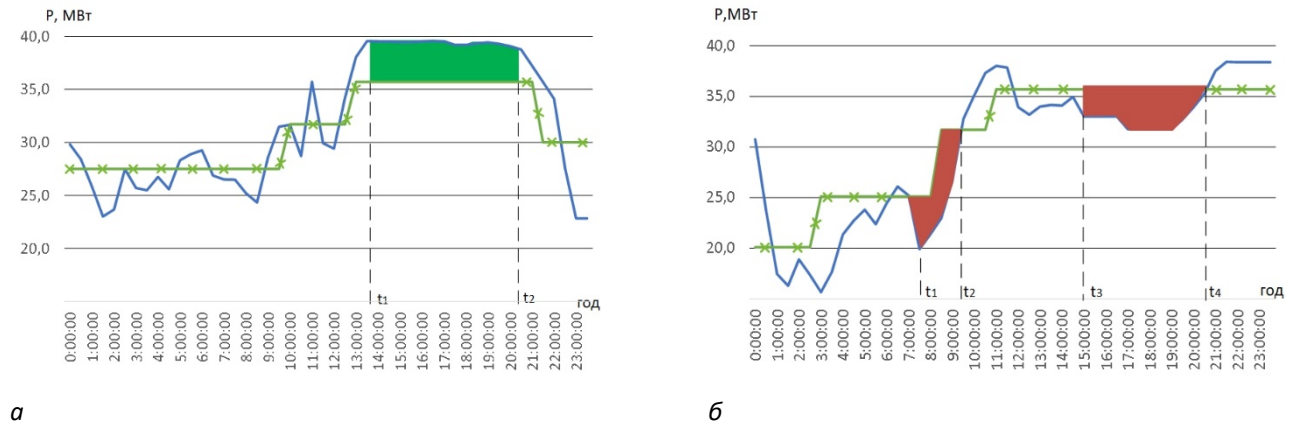


Рис. 1. Добові графіки генерування ВЕС: а – під час надлишку виробленої електроенергії; б – під час недостатнього фактичного вироблення електроенергії

Fig. 1. Daily schedules of generation of wind power plants: а – during the surplus of generated electricity; б – during insufficient actual electricity generation

В [8] розглянуто застосування водневих технологій стосовно графіків генерування ФЕС. Показано, що одним з ефективних способів резерву енергії для ФЕС може бути водень, який отримують шляхом електролізу з використанням електроенергії ФЕС. Для генерування електроенергії відповідним установками може використовуватися водень, отриманий також іншими способами, наприклад, з біомаси. Особливості застосування водневих технологій для корегування графіків генерування електроенергії ВЕС під час роботи їх в ЕЕС варто розглянути окремо.

Незважаючи на переваги водню, водневим технологіям мають конкурувати по витратах з іншими способами компенсації нерівномірності й резервування генерування електроенергії ВДЕ. До них належать електрохімічні накопичувачі, біогазові установки, гідроаккумуляційні електростанції, а також системний резерв енергоагрегатів теплових електростанцій як платна послуга [9, 10].

Мета статті – оцінити можливості водню як енергоносія порівняно з іншими способами корегування заявлених графіків генерування відновлюваних джерел енергії в процесі участі їх в балансуванні режимів електроенергетичних систем, зокрема для компенсації нерівномірності генерування електроенергії вітровими електростанціями.

ВЕС в балансі електроенергії ЕЕС. Всі електростанції, зокрема ті, що використовують відновлювані види енергії, генерують електроенергію в електроенергетичній системі (ЕЕС) відповідно до заявленого графіка на наступну добу. Для ВЕС через природні впливи підтримувати прогнозований графік можливо тільки з певною точністю. Згідно з [11] для ВЕС задача участі в балансуванні споживання та генерування електроенергії в ЕЕС сформульована як

$$f = \frac{W_{np} - W_{\phi}}{W_{np}} 100\% \rightarrow \min, \quad (1)$$

де f – похибка в прогнозуванні, яка має бути меншою за допустиму (для ВЕС 10 %); W_{np} – значення погодинного прогнозованого вироблення електроенергії ВЕС на

наступну добу; W_{ϕ} – фактичне вироблення ВЕС електроенергії за цей же час T ;

Для ВЕС під час роботи їх в балансувальній групі для регулювання частоти і напруги в ЕЕС виникає дві взаємозв'язані задачі – перетворення електричної енергії на водень і використання водню для генерування електроенергії. На рис. 1, а показано, що балансувальною групою ВЕС виробляється електроенергії більше, ніж спрогнозовано і заявлено для системного оператора. Частина електроенергії (показано зеленим кольором) перетворюється на водень. На рис. 1, б спрогнозовано електроенергії більше, ніж фактично виробляється ВЕС (показано червоним кольором). Для зменшення штрафних санкцій необхідно, щоб $W_{\phi} \approx W_{np}$. У цьому разі водень використовується для вироблення електроенергії й виконання умови $W_{\phi} \approx W_{np}$. Очевидно, що надлишок виробленого водню може використовуватися для інших цілей [6, 7].

Значення електроенергії, яка виробляється в більшій кількості, ніж це потрібно для балансу між генеруванням і споживанням, і може бути використана для виробництва водню, визначається як (рис. 1, а)

$$W_{ec} = \int_{t_1}^{t_2} P_{\phi}(t) dt - \int_{t_1}^{t_2} P_{np}(t) dt, \quad (2)$$

де W_{ec} – кількість електроенергії, яку необхідно спожити для того, щоб виконати заявлений графік генерування ВЕС (інший варіант – обмежити фактичне генерування, що недоцільно для власників ВЕС і може бути вимушено реалізовано тільки системним оператором для збереження стійкості ЕЕС); P_{ϕ} , P_{np} – потужності з графіків фактичного і прогнозованого генерування ВЕС; t_1 і t_2 – час, коли вмикається й вимикається устаткування вироблення й накопичування водню.

Кількість електроенергії W_{ec} (рис. 1, б), яку необхідно виробити для балансу між генеруванням і споживанням і яка може бути вироблена шляхом перероблення водню на електроенергію, визначається як

$$W_{ee} = \int_{t_1}^{t_2} P_{np}(t) dt - \int_{t_1}^{t_2} P_{\phi}(t) dt, \quad (3)$$

де t_1 і t_2 – час, коли вмикається й вимикається устаткування використання водню для вироблення балансувальною групою електроенергії (поршневі, газотурбінні або парогазові установки).

Вироблена за участі водню електроенергія передається в загальну систему електропостачання, але її частина окремо обліковується для формування балансу електроенергії в ЕЕС згідно з (3). До виробництва водню з електроенергії ФЕС і ВЕС для повноцінної участі їх в балансуванні станів ЕЕС доцільно долучати біогазові установки. Такий підхід дає змогу повніше використати доступний потенціал ВДЕ для вирішення загальносистемних завдань. Проте тут необхідна техніко-економічна координація способів компенсації нерівномірності генерування електроенергії ВДЕ з одночасним підвищенням їх енергетичної ефективності. Потрібна певна стратегія комплексного використання ВДЕ та способів компенсації нерівномірності їх генерування з урахуванням вимог енергоринку. Визначальною є технологія отримання й накопичення водню. Наприклад, окремо розглядається техніко-економічна задача щодо розміщення і під'єднання установок вироблення водню з електроенергії, генерованої ВЕС, транспортування й перетворення енергії водню на електроенергію. Можливі два підходи до використання водневих технологій в ЕЕС: умовно локальний і загальносистемний. Згідно з першим окремі власники ВЕС або об'єднані в балансувальні групи вирішують задачу участі в роботі енергосистеми самостійно (очевидно, що за певними правилами, встановленими енергосистемою). Другий підхід передбачає централізовану розбудову установок вироблення водню відносно великої потужності й способів його використання. За цим варіантом в рамках задачі, що розглядається тут, участь ВЕС в балансуванні електроенергії вирішується через платні послуги, за допомогою яких організовується доступ до централізованих джерел водню і результатів його використання.

Очевидно, що можливий і комбінований підхід, коли мають місце обидва варіанти. Реалізація локально-центрального виробництва водню має певні переваги. Окремі ВЕС і об'єднані в балансувальні групи можуть працювати автономно, погоджуючи свою роботу з ЕЕС. За такої схеми виробництво водню як універсального енергоносія можливе як в безпосередній близькості від споживача, наприклад від заправної станції електромобілів на паливних елементах (PCEVs), так і на віддалених територіях в місцях зі значним енергетичним потенціалом ВДЕ з подальшим транспортуванням водню до заправних станцій в спеціальних цистернах або за допомогою трубопроводу. Крім того, водневе акумулювання енергії відновлюваних джерел дає можливість створювати довготривалі міжсезонні запаси енергії, що особливо актуально при вирішенні питання стабільного енергозабезпечення.

Оптимізація способів зменшення нерівномірності генерування ВЕС. Якщо реалізується варіант встановлення установок вироблення водню централізовано,

тобто для загальносистемного використання, то мінімальні сумарні витрати B_{Σ} на це визначаються як

$$B_{\Sigma} = B_g(P_g) + B_z(P_z) + B_c(P_c) + B_n(P_n) \rightarrow \min, \quad (4)$$

де $B_g(P_g)$ – витрати на отримання водню шляхом електролізу; $B_z(P_z)$ – витрати, пов'язані з використанням біогазових технологій; $B_c(P_c)$ – витрати на користування системним резервом, які є вартістю утримання резерву на ТЕС; $B_n(P_n)$ – витрати на запаси пропускну здатності ліній електропередачі, що необхідно для транспортування електроенергії з/до місця під'єднання резервної потужності до ЕЕС; P_g, P_z, P_c, P_n , – відповідно, оптимальні значення потужностей, які визначаються щодо кожного зі способів компенсації нерівномірності генерування електроенергії ВДЕ.

Оскільки впровадження водневих технологій з метою резервування генерування електроенергії ВДЕ в ЕЕС здійснюватиметься поетапно, то доцільно насамперед розглянути варіант використання водню на ВЕС для зменшення похибки f в (1). Відповідно до сценарію, що в ЕЕС для компенсації нестабільності генерування ВЕС використовуються маневрові потужності системи та установки отримання і використання водню, задача (4) перепишеться:

$$B = B_g(P_g) + B_c(P_c) + B_n(P_n) \rightarrow \min. \quad (5)$$

Модифікована математична модель питомих витрат на 1 кВт резервування за сценарієм, що передбачає використання водню як накопичувача енергії й ураховує особливості ЕЕС, для якої є потреба в резервуванні, можна представити у вигляді рівняння:

$$B = \frac{C_1}{P_g} + C_2 P_c + C_3 P_n + C_4 \frac{P_g^2}{P_c^2 \cdot P_n}, \quad (6)$$

де C_1, C_2, C_3, C_4 – узагальнені константи, що містять вихідні дані задачі (передусім це цінові показники).

Перша складова рівняння враховує питомі витрати на реалізацію резервування з використання системи отримання й використання водню як накопичувача енергії. З урахуванням того, що частина водню використовується в інших галузях, витрати на відтворення електроенергії в балансувальній групі будуть обернено пропорційні до P_g . Значення витрат другої й третьої складових у балансувальній групі лінійно залежні від P_c і P_n відповідно. Остання складова витрат залежить від витрат електроенергії в елементах електричної мережі.

Для аналізу системи резервування нестабільності генерування ВДЕ використаємо методи теорії подібності, зокрема критеріального методу [12, 13]. Його перевагою є те, що він дає змогу отримати критерії подібності, які зв'язують між собою однойменні параметри, в нашому випадку різних способів резервування, і створюються умови для аналізу співрозмірності й чутливості результатів розрахунків у відносних одиницях при обмеженій кількості вихідної інформації [14].

Задача (6) відповідає умові канонічності, коли міра її складності $s=m-n-1=0$, де m – кількість членів цільової функції, n – кількість змінних P . Згідно з критеріальним

методом запишемо систему ортогональних і нормованих (ортономованих) рівнянь для (6) [13, 15]:

$$\begin{cases} -\pi_1 + 2\pi_4 = 0; \\ \pi_2 - 2\pi_4 = 0; \\ \pi_3 - \pi_4 = 0; \\ \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 = 1, \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & -2 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \\ \pi_3 \\ \pi_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

де π_i – критерії подібності, які в цьому разі за фізичним змістом є ваговими коефіцієнтами складових витрат у (6).

Оскільки для задачі оптимізації способів компенсації нестабільності генерування ВДЕ у формі (6) міра складності дорівнює нулю, то розв’язок даної системи рівнянь (7) отримуємо просто: $\pi_1 = \pi_2 = 2/6$; $\pi_3 = \pi_4 = 1/6$. Відповідно до методу інтегральних аналогів [12] запишемо систему рівнянь, в якій критерії подібності зв’язані з невідомими P_i , з урахуванням (6) і розв’язків системи рівнянь (7):

$$\begin{cases} \pi_1 = \frac{2}{6} = \frac{C_1}{B P_e}; \\ \pi_2 = \frac{2}{6} = C_2 \cdot P_c / B; \\ \pi_3 = \frac{1}{6} = C_3 \cdot P_n / B; \\ \pi_4 = \frac{1}{6} = \frac{C_4 \cdot P_e^2}{B P_c^2 \cdot P_n}. \end{cases} \quad (8)$$

Із системи рівнянь (8) отримуємо оптимальні значення потужностей установок для резервування нестабільності генерування ВЕС:

$$P_e = \left(\frac{C_1^4}{4C_2^2 \cdot C_3 \cdot C_4} \right)^{\frac{1}{6}};$$

$$P_c = \left(\frac{4C_1^2 \cdot C_3 \cdot C_4}{C_2^4} \right)^{\frac{1}{6}}; P_n = \left(\frac{C_1^2 C_2^2 C_4}{16C_3^5} \right)^{\frac{1}{6}};$$

$$B = 3 \left(4 \cdot C_1^2 \cdot C_2^2 \cdot C_3 \cdot C_4 \right)^{\frac{1}{6}}. \quad (9)$$

У критеріальній формі вираз витрат (6) запишеться:

$$B_* = \frac{\pi_1}{P_e^*} + \pi_2 P_{c^*} + \pi_3 P_{n^*} + \pi_4 \frac{P_{e^*}^2}{P_{c^*}^2 \cdot P_{n^*}}, \quad (10)$$

де $B_* = B / B_{\min}$; $P_{e^*} = P_e / P_{e0}$, $P_{c^*} = P_c / P_{c0}$, $P_{n^*} = P_n / P_{n0}$, де P_e, P_c, P_n – відповідно поточні й оптимальні значення потужностей способів резервування.

З урахуванням числових значень критеріїв подібності (10) перепишеться:

$$B_* = \frac{1}{3P_{e^*}} + \frac{P_{c^*}}{3} + \frac{P_{n^*}}{6} + \frac{P_{e^*}^2}{6P_{c^*}^2 \cdot P_{n^*}}. \quad (11)$$

Виокремимо складову витрат на резервування шляхом використання водню (перший член) та складову, яка характеризує витрати на користування системним резервом та витрати на збільшення запасу пропускної спроможності лінії електропередачі (другий член):

$$B_* = 0,333 \cdot P_{e^*}^{-1} + 0,667 \times \left(0,5 \cdot P_{c^*} + 0,25 \cdot P_{n^*} + 0,25 \cdot P_{e^*}^2 \cdot P_{c^*}^{-2} \cdot P_{n^*} \right). \quad (12)$$

Відповідно до прийнятої моделі (12) витрати B на компенсацію нерівномірності графіка генерування ВЕС шляхом резервування будуть економічно доцільними, якщо 2/3 цих витрат підуть на модернізацію мереж та використання системного резерву, а 1/3 витрат – на резервування накопиченням і використанням енергії водню.

Економічно доцільні значення критеріїв подібності не залежать від C_1, \dots, C_4 і визначають співрозмірність моделі, тобто питомі частки змінних витрат, що припадають на елементи системи резервування нестабільності генерування ВЕС. Щодо узагальнених показників C_1, \dots, C_4 , то вплив їх на економічно доцільні значення потужностей $P_{e^*}, P_{c^*}, P_{n^*}$ і на витрати B_* можна оцінити, записавши (9) у такому вигляді:

$$P_{e^*} = \left(\frac{C_1^4}{4C_2^2 \cdot C_3 \cdot C_4} \right)^{\frac{1}{6}}; P_{c^*} = \left(\frac{4C_1^2 \cdot C_3 \cdot C_4}{C_2^4} \right)^{\frac{1}{6}};$$

$$P_{n^*} = \left(\frac{C_1^2 C_2^2 C_4}{16C_3^5} \right)^{\frac{1}{6}}; B_* = 3 \left(4C_1^2 C_2^2 C_3 C_4 \right)^{\frac{1}{6}}. \quad (13)$$

де $C_{i^*} = \frac{C_i}{C_{i0}}$, $i = \overline{1,4}$; C_{i0} – базисні значення вартісних показників.

Оскільки зазвичай на етапі проектування точні значення показників C_i невідомі, але відомим є їх діапазон $C_{i \min} - C_{i \max}$, то за базисне значення варто приймати середнє значення діапазону цін.

З отриманих виразів можна оцінити вплив зміни, наприклад C_1 , на економічно доцільні значення усіх змінних. Вирази (13) показують, що економічно доцільні значення потужностей, які визначаються щодо кожного зі способів резервування і витрат на їх реалізацію, залежать від прийнятого сценарію реалізації резервування. Тому економічно доцільні способи резервування та їх потужності, а також параметри реалізації кожного способу вибираються з урахуванням їх взаємовпливу в системі. Вираз (12) також дозволяє оцінити вплив вихідних даних на

економічно доцільні значення витрат і потужностей, які визначаються щодо кожного зі способів резервування, тобто дослідити чутливість витрат до зміни потужностей.

Цей аналіз дає змогу зробити висновок, що розподіл витрат для сценарію резервування, що досліджується, більш чутливий до вибору потужності накопичувачів з використанням водню та вибору потужності системного резерву. На рис. 2 представлено аналіз чутливості питомих витрат у відносних одиницях та у відсотках до зміни одного з впливових факторів при незмінних інших, витрати визначено за формулами (12) і (13).

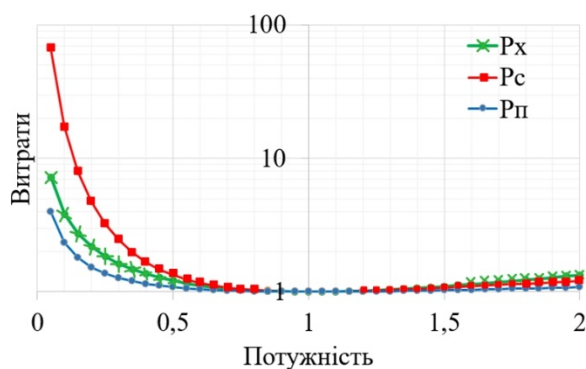


Рис. 2. Чутливість витрат: до зміни потужності накопичувачів водню (зелена крива), до змін потужності системного резерву (червона крива) та до зміни пропускної здатності ліній електропередачі (синя крива)

Fig. 2. Cost sensitivity: to changes in hydrogen storage capacity (green curve), to changes in system reserve capacity (red curve) and to changes in transmission capacity of power lines (blue curve)

Запропонований алгоритм забезпечення заданої точності збігу фактичного і прогнозованого графіків генерування електроенергії ВЕС з використанням водневих технологій побудовано в такий спосіб, що коли на певному інтервалі часу фактичне значення генерування перевищує прогнозоване, то запускається система утворення і зберігання водню. І навпаки, коли фактичне значення генерування менше за прогнозоване, то накопичений водень спрацьовується на установках, що виробляють електроенергію. Такий алгоритм доцільно використовувати для централізованого регулювання потужності в балансувальній групі ВЕС.

Висновки. Для підвищення енергоефективності електричних станцій, які використовують відновлювану енергію, зокрема вітрову, і які працюють в ЕЕС паралельно з іншими електростанціями, необхідно вирішити проблему прогнозування їхніх графіків генерування електроенергії. З огляду на природну нерівномірність генерування в балансі електроенергії країни з метою надійності ЕЕС формуються вимоги щодо точності виконання заявлених погодинних графіків генерування ВЕС. Для компенсації нерівномірності генерування ВЕС в ЕЕС формується відповідний резерв потужності. Одним з ефективних способів резерву енергії може бути використання водню, отриманого шляхом електролізу із застосуванням електроенергії ВЕС. Для генерування електроенергії відповідними установками може використовуватися водень, отриманий також іншими способами, наприклад, з біомаси.

Якщо в ЕЕС є вільний резерв потужності, що може бути використаний балансувальною групою ВЕС як платна послуга, то доцільно розглянути цей варіант. У цьому разі для компенсації нестабільності генерування ВЕС використовуються маневрові потужності системи та установки отримання й використання водню. Запропоновано метод оптимізації резервної потужності ЕЕС для компенсації нерівномірності генерування ВЕС. Побудований критеріальний метод на основі теорії подібності дозволяє при обмеженому обсязі інформації вибрати кращий варіант. Результати оптимізації отримують у такому вигляді, який дозволяє аналізувати співрозмірність і чутливість складових витрат на способи компенсації нерівномірності генерування ВЕС. Результати співрозмірності дають можливість ранжувати способи компенсації нерівномірності генерування ВЕС за витратами, а чутливість – раціонально, найефективніше використовувати потужності різних способів під час експлуатації.

ПОСИЛАННЯ

1. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Добровольська Л. Н., Повстанко К. О. Відносне оцінювання засобів балансування режимів електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії. Вісник ВПІ. 2022. № 3. С. 24–30. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-162-3-24-30>
2. Кузнецов М. П., Лисенко О. В., Мельник О. А. Задача оптимізації гібридної енергосистеми за рівнем дисперсії генерованої потужності. Відновлювана енергетика. 2022. № 1. С. 17–26. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1\(68\)839](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68)839)
3. Будько В. І., Вайнштейн Я. В. Перекриття небалансів згенерованої та прогнозованої електроенергії сонячною електростанцією за рахунок системи акумулювання електричної енергії. Відновлювана енергетика. 2021. № 4. С. 25–31. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4\(67\).25-31](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4(67).25-31)
4. Буткевич О. Ф., Юнєєва Н. Т., Гурєєва Т. М., Стецюк П. І. Задача розташування накопичувачів електроенергії в ОЕС України з урахуванням його впливу на потоки потужності контрольованими перетинами. Технічна електродинаміка. 2020. № 4. С. 46–50. <https://doi.org/10.15407/techned2020.04.046>
5. Кудря С. О., Репкін О. О., Рубаненко О. О., Яценко Л. В., Шинкаренко Л. Я. Етапи розвитку зеленої водневої енергетики України. Відновлювана енергетика. 2022. № 1. С. 5–16. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1\(68\)840](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68)840)
6. Chapter 23 – The Role of Fuel Cells and Hydrogen in Stationary Applications. / Volkart K., Densing M., De Miglio R., Priem T., Pye S., Cox B. Europe's Energy Transition. M. Welsch et al., Eds.: Academic Press, 2017. P. 189–205.
7. Hydrogen-based uninterruptible power supply. / Varkarakis E., Lymberopoulos N., Zoulias E., Guichardot D., Poli G. International Journal of Hydrogen Energy, 2007. Vol. 32. P. 1589–1596.
8. Stepan Kudria, Petr Lezhniuk, Oleksandr Riepinkin, Olena Rubanenko. Hydrogen technologies as a method of compensation for inequality of power generation by

- renewable energy source. *Przeegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 98 NR 10/2022. P. 1–6.
<https://doi.org/10.15199/48.2022.10.01>
9. A Multiscale Energy Systems Engineering Approach for Renewable Power Generation and Storage Optimization. / Demirhan C. D., Tso W. W., Powell J. B., Heuberger C. F., Pistikopoulos E. N. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2020. Vol. 59. No. 16. P. 7706–7721.
 10. Blinov I., Trach I., Parus Y., V Khomenko., Kuchanskyy V. and Shkarupilo V. Evaluation of The Efficiency of The Use of Electricity Storage Systems in The Balancing Group and The Small Distribution System. 2021. IEEE 2nd KhPI Week on Advanced.
 11. Зміни до постанови Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, від № 641 від 26 квітня 2019 року (Затверджено постановою НКРЕКП № 46 від 15.01.2021 р.)
 12. Веников В. А. Теория подобия и моделирования. – М.: Высш. школа, 1976. 479 с.
 13. Астахов Ю. Н., Лежнюк П. Д. Применение критерияльного метода в электроэнергетике. Киев: УМК ВО, 1989. 140 с.
 14. Lezhniuk P., Komar V., Rubanenko O., Ostra N. The sensitivity of the process of optimal decisions making in electrical networks with renewable energy sources. *Przeegląd Elektrotechniczny*. Vol. 2020, № 10. P. 32–38. DOI: 10.15199/48.2020.10.05.
 15. Mung Chiang. *Geometric Programming for Communication Systems*. Boston–Delft. 2005. 159 p.
- REFERENCES**
1. Lezhniuk P. D., Komar V. O., Dobro-volska L. N., Povstyanko K. O. Relative evaluation of means of balancing modes of electric power systems with renewable energy sources. *VPI Bulletin*. 2022. No. 3. P. 24–30.
<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-162-3-24-30>
 2. Kuznetsov M. P., Lysenko O. V., Melnyk O. A. The task of optimizing the hybrid energy system according to the level of dispersion of the generated power. *Renewable energy*. 2022. No. 1. P. 17–26.
[https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1\(68\)839](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68)839)
 3. Budko V. I., Vainshtein Y. V. Overturning imbalances of generated and forecasted electricity by a solar power plant due to the system of electric energy storage. *Renewable energy*. 2021. No. 4. P. 25–31.
[https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4\(67\).25-31](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4(67).25-31)
 4. Butkevich O. F., Yuneeva N. T., Gureeva T. M., Stetsyuk P. I. The problem of the location of electricity storage units in UES of Ukraine, taking into account its influence on power flows through controlled intersections. *Technical electrodynamics*. 2020. No. 4. P. 46–50.
<https://doi.org/10.15407/techned2020.04.046>
 5. Kudrya S. O., Repkin O. O., Rubanenko O. O., Yatsenko L. V., Shynkarenko L. Ya. Stages of development of green hydrogen energy in Ukraine. *Renewable energy*. 2022. No. 1. P. 5–16.
[https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1\(68\)840](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68)840)
 6. Chapter 23 – The Role of Fuel Cells and Hydrogen in Stationary Applications. / Volkart K., Densing M., De Miglio R., Priem T., Pye S., Cox B. *Europe's Energy Transition*. M. Welsch et al., Eds.: Academic Press, 2017. P. 189–205.
 7. Hydrogen-based uninterruptible power supply. / Varkaraki E., Lymberopoulos N., Zoulias E., Guichardot D., Poli G. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007. Vol. 32. P. 1589–1596.
 8. Stepan Kudria, Petr Lezhniuk, Oleksandr Riepin, Olena Rubanenko. Hydrogen technologies as a method of compensation for inequality of power generation by renewable energy sources. *Przeegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 98 NR 10/2022. P. 1–6.
<https://doi.org/10.15199/48.2022.10.01>
 9. A Multiscale Energy Systems Engineering Approach for Renewable Power Generation and Storage Optimization. / Demirhan C. D., Tso W. W., Powell J. B., Heuberger C. F., Pistikopoulos E. N. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2020. Vol. 59, No. 16. P. 7706–7721.
 10. Blinov I., Trach I., Parus Y., V Khomenko., Kuchanskyy V. and Shkarupilo V. Evaluation of The Efficiency of The Use of Electricity Storage Systems in The Balancing Group and The Small Distribution System. 2021. IEEE 2nd KhPI Week on Advanced.
 11. Amendments to the resolution of the National Commission for State Regulation in the Energy and Utilities Sectors No. 641 of April 26, 2019 (Approved by Resolution of the NCRECP No. 46 of January 15, 2021)
 12. Venikov V. A. Theory of similarity and modeling. - M.: Higher. school, 1976. 479 p.
 13. Astakhov Y. N., Lezhniuk P. D. Application of the criterion method in the electric power industry. Kyiv: UMK VO, 1989. 140 p.
 14. Lezhniuk P., Komar V., Rubanenko O., Ostra N. The sensitivity of the process of optimal decision making in electrical networks with renewable energy sources. *Przeegląd Elektrotechniczny*. Vol. 2020, No. 10. P. 32–38.
<https://doi.org/10.15199/48.2020.10.05>
 15. Mung Chiang. *Geometric Programming for Communication Systems*. Boston–Delft. 2005. 159 p.