

УДК 621.311

Лежнюк П.Д.

Вінницький національний технічний університет

Бартецький А.А.

Вінницький національний технічний університет

Бартецька І.А.

Вінницький національний технічний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БАЛАНСОВОЇ СТІЙКОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

У роботі було розглянуто умови функціонування відновлюваних джерел електроенергії, зокрема фотоелектричних станцій, відповідно до нового Закону «Про ринок електричної енергії України», що дало змогу виділити низку проблем, які суттєво ускладнюють експлуатацію фотоелектричних станцій в енергосистемі України. В результаті огляду запропонованих методів вирішення низки проблем функціонування ФЕС у сучасних умовах енергоринку було сформовано новий критерій оптимізації, мінімальне відхилення від прогнозованого графіка генерування. Відповідно до запропонованого критерію задачі оптимізації розглянуто випадки роботи ФЕС, коли використовується фотоелектрична станція, підключена до локальної електричної мережі без використання накопичувачів електричної енергії та без сумісної роботи із стабільним ВДЕ, коли використовується фотоелектрична станція із накопичувачами електричної енергії та коли ФЕС працює сумісно зі стабільним ВДЕ.

Ключові слова: стійкість, фотоелектрична станція, критерій оптимізації, сумісна робота, графік генерування.

Постановка проблеми. Популяризація відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), зокрема фотоелектричних станцій як екологічно чистих та стимулювання енергоринку пільговими тарифами для ВДЕ призвела до стрімкого підвищення частки ВДЕ в енергосистемі України. За даними Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України [1, с. 1], очікуваний результат впровадження сонячної енергетики на період до 2018 р. включно передбачає 1780 ГВт*год, а до 2020 р. – 2420 ГВт*год. Проте збільшення частки стохастичних джерел енергії в енергосистемі супроводжується виникненням додаткових ризиків, пов'язаних з їх імовірнісною природою і менш стабільними характеристиками, що може призвести до балансової стійкості енергосистеми [2, с. 1493; 3, с. 786; 4, с. 57] та якості електроенергії [5, с. 17]. Відповідно до Закону «Про ринок електричної енергії України» [6, с. 1] для виробників електроенергії, що використовують енергію вітру і сонячного випромінювання, для яких встановлено «зелений тариф», встановлюється плата за небаланс із відповідним відсотком щороку, причому з 1 січня 2025 р. становитиме 100%, а небаланс має перебувати в межах 5%. У зв'язку із необхідністю забезпечення балансової стійкості енергосистеми необхідно створити низку підходів

та рекомендацій, використання яких дасть змогу реалізувати регульовані ВДЕ як складники розподілених віртуальних електростанцій, що, своєю чергою, є стабільними джерелами електроенергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. П.Д. Лежнюк, В.О. Комар і С.В. Кравчук [7, с. 93] розв'язують задачу прогнозування генерування сонячних електростанцій на основі оцінювання їх імовірнісних характеристик. В їх роботі отримано залежність, яка дає змогу визначати ймовірність покриття заданого графіка споживання протягом доби за півгодинним періодом. Враховуючи те, що ключовим фактором генерування фотоелектричних станцій є погодні умови, то швидкозмінні погодні умови, наприклад раптова локальна захмареність неба, може призвести до суттєвої похибки між прогнозованим та реально згенерованим значенням потужності. У своїй статті П.Д. Лежнюк, В.О. Комар, С.В. Кравчук і Є.С. Дідіченко [8, с. 27] пропонують вирішення проблеми впливу метеопараметрів на точність прогнозу генерування фотоелектричними станціями з урахуванням прогнозу погоди на наступний день та врахування інформації із метеопостів, встановлених безпосередньо на електростанції. Такий підхід, як стверджують автори, дасть змогу зменшити збитки власників електростанцій від

неточності прогнозу, проте автори не розглядали методів оперативного керування фотоелектростанцією для компенсації похибки прогнозування. П.Д. Лежнюк [9, с. 70] пропонує розраховувати оптимальну потужність резерву електростанції, що враховує нестабільність процесу генерування ВДЕ, оскільки в результаті генерування найбільш імовірні значення недовідпущеної електроенергії. У своїй статті Д.Г. Дерев'яноко і Д.С. Горенко [10, с. 1] пропонують розробку віртуальних електростанцій як функціональної одиниці Об'єднаної енергетичної системи. В роботі проведено аналіз спільної роботи гідро- та вітрогенеруючих установок на локальну енергетичну мережу. Проте отримані результати неефективні в умовах нового Закону «Про ринок електричної енергії України».

Постановка завдання. Метою роботи є визначення проблеми генерування фотоелектричних станцій у сучасних умовах енергоринку та встановлення шляхів розв'язання визначених проблем функціонування фотоелектричних станцій із метою забезпечення балансової стійкості енергосистеми.

Виклад основного матеріалу дослідження. На основі огляду попередніх досліджень можна дійти висновку, що основною проблемою в роботі нестабільних ВДЕ, зокрема сонячних електростанцій, є забезпечення балансової стійкості енергосистеми, оскільки велика частка нерегульованих нестабільних джерел енергії в енергосистемі може призвести до її розбалансування, а з власників таких електростанцій суттєве відхилення графіка генерування від заявленого може призвести до значних збитків.

Досить велика кількість робіт присвячена розв'язанню задачі прогнозування генерування електроенергії фотоелектричними станціями по годинно на добу наперед. Проте ймовірнісний характер погодних умов може вносити суттєву похибку прогнозу. Для розв'язання проблеми похибки прогнозування пропонується здійснювати оперативне керування фотоелектричними станціями. Реалізація таких систем керування передбачає створення відповідних моделей оптимізації фотоелектричних станцій. Для цього пропонується ввести такий критерій оптимізації, як мінімальне відхилення від прогнозованого графіка генерування, математично критерій оптимізації наведено формулою (1):

$$\int_{t_0}^{t_k} \Delta P_{dev}(t) dt \rightarrow 0, \quad (1)$$

де $[t_0, t_k]$ – період часу, за який здійснюється генерування;

ΔP_{dev} – відхилення потужності, визначається за виразом (2).

$$\Delta P_{dev} = P_{pr} - P_{real}, \quad (2)$$

де P_{pr} – прогнозоване значення потужності генерування;

P_{real} – поточне значення генерованої потужності.

Варто зауважити, що відхилення потужності може набувати як додатних, так і від'ємних значень, що характеризуватиме перегенерування або недогенерування відповідно.

Відповідно до запропонованого критерію, задачу оптимізації варто розглядати для трьох випадків:

1. Якщо використовується фотоелектрична станція, підключена до локальної електричної мережі без використання накопичувачів електричної енергії та без сумісної роботи із стабільним ВДЕ. В такому разі на критерій оптимізації накладаються обмеження у вигляді неможливості покриття миттєвих провалів генерування. В результаті модель оптимізації зводиться до обмеження миттєвих піків перегенерування. Недоліком використання такої ВДЕ є неможливість забезпечення повної керованості і в умовах нового Закону «Про ринок електричної енергії України» може призвести до фінансових збитків підприємства у вигляді штрафів від недовипуску електричної енергії [11, с. 312]. Проте використання системи оптимізації роботи фотоелектричних станцій у такому разі дасть змогу уникнути виникнення миттєвих локальних перенапруг, як наслідок, уникнути можливих аварійних ситуацій, спричинених пробоем ізоляції в електротехнічних установках [12, с. 14].

2. Якщо використовується фотоелектрична станція із накопичувачами електричної енергії. За таких умов є змога досягнути найкращих енергетичних показників та компенсувати у повному обсязі провали генерування та піки перегенерування електричної енергії. Як обмеження можуть виступати ємність накопичувача та залишковий заряд. Проте гнучкість використання та висока швидкодія дає змогу компенсувати миттєві відхилення при генеруванні, що робить ФЕС стабільним джерелом енергії [13, с. 3]. До недоліків належить висока вартість, яка може порівнюватись із вартістю самої ФЕС, а з огляду на те, що накопичувачі потенційно шкодять навколишньому середовищу, а також відкритим стоїть питання утилізації відпрацьованих елементів накопичувачів, екологічність використання ФЕС стоїть під питанням.

3. Якщо ФЕС працює сумісно зі стабільним ВДЕ, то вирішення задачі оптимізації зводиться до оперативного керування сумісною роботою ВДЕ для забезпечення мінімального відхилення від сумарного графіка генерування ФЕС та стабільної ВДЕ. В такому разі стабільну ВДЕ доцільно використовувати з резервом потужності для покриття провалів генерування ФЕС електричної енергії. Серед стабільних ВДЕ, які можуть працювати паралельно із ФЕС на території України, можна виділити малі гідроелектростанції (МГЕС), біогазові електроустановки (БГЕУ) та повітряно акумулюючі електростанції (ПАЕС) [14, с. 1].

Розглянемо випадок, коли мала ГЕС розташована в одній локальній ЕС разом із ФЕС (рис. 1).

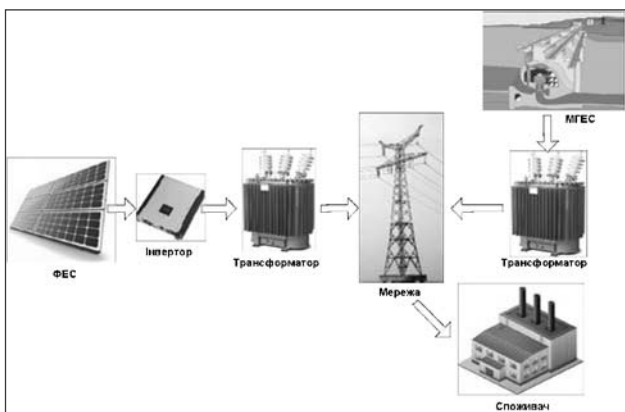


Рис. 1. Структурна схема сумісної роботи ФЕС та МГЕС в локальній ЕС

У такому разі провали в генеруванні ФЕС будуть покриватися шляхом резерву потужності МГЕС (рис. 2). При цьому пропонується використовувати МГЕС з інвертором. Використання інвертора дасть змогу забезпечити високу швидкодію регулювання та покращить енергетичні показники електроенергії.

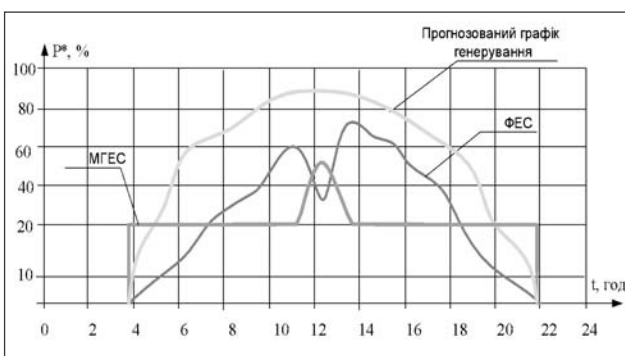


Рис. 2. Графік сумісної роботи ФЕС та МГЕС

Розглянемо випадок, коли ФЕС та МГЕС знаходяться на досить близькій відстані. Таке розташування є дуже зручним для економії місця.

Адже при побудові МГЕС залишаються земельні ділянки, які пустують і не можуть бути використаними для господарських потреб. Саме такі ділянки можна використати для побудови ФЕС.

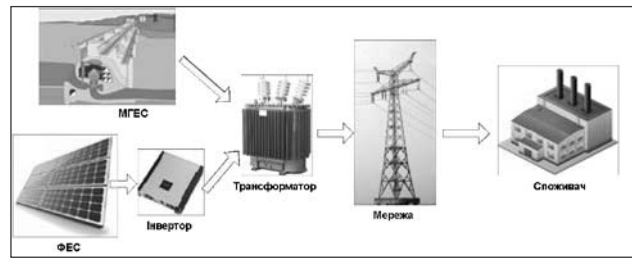


Рис. 3. Структурна схема сумісної роботи ФЕС та МГЕС у локальній ЕС

При цьому режим роботи аналогічний попередньому випадку.

Розглянемо варіант, коли ФЕС працює сумісно із міні-ГЕС. В такому разі робота міні-ГЕС зводиться виключно на покриття провалів генерування. При цьому графік генерування матиме вигляд, як на рис. 4:

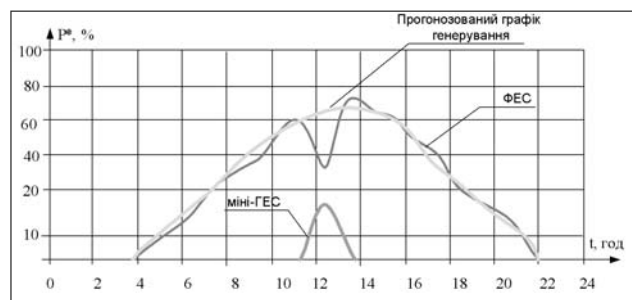


Рис. 4. Графік сумісної роботи ФЕС та міні-ГЕС

Пропонується використовувати міні-ГЕС для компенсації провалів генерування електричної енергії ФЕС, при цьому використання дасть змогу із високою швидкістю реагувати на провали роботи ФЕС та забезпечити високу її керованість.

Висновки.

1. У роботі було встановлено, що в сучасних умовах дії Закону «Про енергоринок України» основою функціонування ФЕС є забезпечення покриття заявленого або прогнозованого графіка генерування ВДЕ. При цьому було виділено новий критерій оптимізації, який відповідає новим проблемам роботи ФЕС у ЛЕС.

2. Було визначено низку шляхів вирішення питання оптимізації роботи ФЕС для забезпечення мінімального відхилення від прогнозованого графіка генерування. Враховуючи такі критерії, як швидкість, екологічність, було встановлено, що одним із найперспективніших способів оптимізації є використання сумісної роботи ФЕС та МГЕС.

Список літератури:

1. До уваги громадськості та експертів – проект Дорожньої карти розвитку відновлюваної енергетики України на період до 2020 року / Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. URL: <http://sae.gov.ua/uk/pressroom/1133>.
2. Chowdhury A.A. Reliability Modeling of Distributed Generation in Conventional Distribution Systems Planning and Analysis. IEEE Transactions on Industry Application. 2003. Vol. 39. No. 5. Pp. 1493–1498. doi:10.1109/TIA.2003.816554.
3. Bae I., Kim J. Reliability Evaluation of Distributed Generation Based on Operation Mode. IEEE Transactions on Power Systems. 2007. Vol. 22. No. 2. P. 785–790. doi:10.1109/TPWRS.2007.894842.
4. Medeiros R., Xu X., Makram E. Assessment of Operating Condition Dependent Reliability Indices in Microgrids. Journal of Power and Energy Engineering. 2016. No. 4. P. 56–66. doi:10.4236/jpee.2016.44006.
5. Kondo T., Jumpei Baba, Akihiko Yokoyama. Voltage control of distribution network with a large penetration of photovoltaic generations using facts devices. Electrical Engineering in Japan. 2008. Vol. 165. № 3. P. 16–28. doi:10.1002/eelj.20499.
6. Про ринок електричної енергії: Закон України від 13.04.2017 р. № 2019-VIII. URL: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/2019-19>.
7. Лежнюк П.Д., Комар В.О., Кравчук С.В. Оцінювання імовірнісних характеристик генерування сонячних електростанцій в задачі інтелектуалізації локальних електричних систем. Вісник НТУ «ХП». № 18. С. 92–100.
8. Лежнюк П.Д., Комар В.О., Кравчук С.В., Дідіченко Є.С. Аналіз метеопараметрів для погодинного прогнозування виробітку електроенергії фотовольтаїчними електростанціями на добу наперед. Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК. 2017. № 1 (6). С. 27–31.
9. Лежнюк П.Д. Визначення оптимальної потужності резерву для забезпечення балансової надійності локальної електричної системи. Вісник Нац. техн. ун-ту «ХП»: зб. наук. пр. Сер.: Нові рішення в сучасних технологіях. 2016. № 42 (1214). С. 69–75.
10. Дерев'янюк Д.Г., Горенко Д.С. Особливості побудови та функціонування віртуальних електростанцій в умовах розвитку ОЕС України. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2016. № 3. С. 61–69.
11. Про ринок електричної енергії: Закон України. Відомості Верховної Ради (ВВР). 2017. № 27-28. Ст. 312. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2019-19>.
12. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. Національний стандарт України. Київ: Мінекономрозвитку України. 2014. 27 с.
13. Cody A. Hill, Matthew Clayton Such, Dongmei Chen, Juan Gonzalez, W. Mack Grady. Battery Energy Storage for Enabling Integration of Distributed Solar Power Generation. IEEE Transactions on Smart Grid. 2012. Vol: 3, Issue: 2, June. Pp. 850–857.
14. Мокін Б.І., Чепурний М.М., Мокін О.Б. Повітряна акумулююча електростанція з двома повітросховищами різного тиску. Наукові праці ВНТУ. 2008. № 1. С. 1–7.

**ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БАЛАНСОВОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ**

В работе были рассмотрены условия функционирования возобновляемых источников электроэнергии, в частности фотозлектрических станций, согласно новому Закону «О рынке электрической энергии Украины», что позволило выделить ряд проблем, которые существенно затрудняют эксплуатацию фотозлектрических станций в энергосистеме Украины. В результате осмотра предложенных методов решения ряда проблем функционирования ФЭС в современных условиях энергорынка был сформирован новый критерий оптимизации, минимальное отклонение от прогнозируемого графика генерации. Согласно предложенному критерию задачи оптимизации, рассмотрены случаи работы ФЭС, когда используется фотозлектрическая станция, подключенная к локальной электрической сети без использования накопителей электрической энергии и без совместной работы со стабильным ВИЭ, когда используется фотозлектрическая станция с накопителями электрической энергии и когда ФЭС работает совместно со стабильным ВИЭ.

Ключевые слова: *устойчивость, фотозлектрическая станция, критерий оптимизации, совместная работа, график генерации.*

**OPTIMIZATION OF WORK OF PHOTOELECTRIC STATIONS
FOR ENSURING THE BALANCE OF THE ENERGY SYSTEM**

In this work was considered the conditions for the functioning of renewable energy sources, in particular of photovoltaic stations, in accordance with the new law “On the Electricity Market of Ukraine”, which allowed to highlight a number of problems that significantly complicate the operation of photovoltaic stations in the Ukrainian energy grid. As a result of the review of the proposed methods for solving a number of problems in the operation of the FVS in the current conditions of the energy market, a new optimization criterion was formed, the minimum deviation from the predicted generation schedule. According to the proposed optimization criterion, cases of FVS operation are considered when the photovoltaic station is connected to a local electrical network without the use of electric energy storage devices and without compatible operation with stable renewable energy sources, when a photovoltaic station is used with electric energy storage devices and when the FVS works together with a stable RES.

Key words: *stability, photovoltaic station, optimization criterion, joint work, generation schedule.*