

АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ПРИ ІНТЕГРАЦІЇ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

¹ Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розглянуто особливості впливу відновлюваних джерел енергії на режими роботи електричних мереж. Проаналізовано зміну рівнів напруги, перетоків активної та реактивної потужності, втрат електроенергії та завантаження елементів мережі при підключенні сонячних і вітрових електростанцій. Запропоновано напрями оптимізації режимів роботи електричних мереж шляхом вибору раціональної точки приєднання, застосування засобів регулювання напруги, компенсації реактивної потужності та систем накопичення енергії.

Ключові слова: електрична мережа, відновлювані джерела енергії, сонячна електростанція, режим роботи, втрати потужності, оптимізація, напруга.

Abstract

The paper considers the influence of renewable energy sources on operating modes of electrical networks. Changes in voltage levels, active and reactive power flows, power losses and loading of network elements during the integration of solar and wind power plants are analyzed. The main directions for optimizing electrical network operating modes are proposed, including rational selection of the connection point, voltage regulation, reactive power compensation and the use of energy storage systems.

Keywords: electrical network, renewable energy sources, solar power plant, operating mode, power losses, optimization, voltage.

Вступ

Розвиток відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) є одним із пріоритетних напрямів модернізації електроенергетики. Зростання встановленої потужності сонячних та вітрових електростанцій сприяє зменшенню використання викопного палива, підвищенню енергетичної незалежності та екологічній безпеці [1]. Водночас інтеграція ВДЕ в електричні мережі створює низку технічних викликів, пов'язаних із нестабільністю генерації, зміною напрямів перетоків потужності, коливанням напруги та необхідністю забезпечення балансу між виробництвом і споживанням електроенергії [2].

Особливо актуальним є дослідження режимів роботи розподільних електричних мереж, оскільки саме до мереж напругою 0,4-35 кВ часто приєднуються об'єкти розосередженої генерації. Неправильний вибір точки приєднання або потужності ВДЕ може призвести до перевищення допустимих рівнів напруги, зростання втрат потужності, перевантаження ліній та ускладнення роботи засобів релейного захисту й автоматики [3].

Метою роботи є аналіз впливу інтеграції відновлюваних джерел енергії на режими роботи електричних мереж та визначення основних заходів щодо їх оптимізації.

Результати дослідження

Електрична мережа у нормальному режимі повинна забезпечувати надійне електропостачання споживачів із дотриманням допустимих значень напруги, струмового навантаження ліній та трансформаторів, а також мінімально можливих втрат активної потужності. При підключенні ВДЕ режим мережі змінюється, оскільки частина навантаження покривається локальною генерацією, а в окремі періоди можливе виникнення зворотних перетоків потужності у напрямку до живильного центру.

Найбільш істотний вплив на режими роботи мережі мають сонячні електростанції, потужність яких залежить від рівня сонячної інсоляції, часу доби та погодних умов. У години максимальної генерації та мінімального споживання можливе підвищення напруги у вузлі приєднання. Для вітрових електростанцій характерною є залежність виробітку від швидкості вітру, що також

призводить до нерівномірності графіка генерації та потребує резервування потужності або використання систем накопичення енергії.

Для оцінювання впливу ВДЕ доцільно порівнювати кілька розрахункових режимів: режим без ВДЕ, режим із частковим покриттям навантаження локальною генерацією, режим максимальної генерації ВДЕ та мінімального навантаження, а також режим максимального навантаження споживачів. Основними контрольованими параметрами є напруга у вузлах, струми у вітках, втрати активної потужності, коефіцієнти завантаження елементів мережі та величина перетоків потужності.

Втрати активної потужності у лінії електропередачі можна визначити за виразом

$$\Delta P = 3 \cdot I^2 \cdot R,$$

де I - струм у фазі лінії; R - активний опір однієї фази лінії.

Орієнтовна втрата напруги в трифазній мережі визначається за формулою

$$\Delta U = (P \cdot R + Q \cdot X) / U,$$

де P і Q - активна та реактивна потужності навантаження; R і X - активний та реактивний опори ділянки мережі; U - номінальна напруга мережі.

При підключенні ВДЕ активна потужність, що передається від живильного центру до споживачів, зменшується. Це може сприяти зниженню струмів у лініях і втрат активної потужності. Однак позитивний ефект спостерігається лише за умови узгодження потужності генерації з локальним навантаженням. Якщо генерація перевищує споживання в певному районі мережі, виникають реверсивні перетоки, що можуть призвести до підвищення напруги, додаткового завантаження мережевих елементів та необхідності обмеження виробітку ВДЕ.

Узагальнену схему впливу інтеграції ВДЕ на параметри режиму електричної мережі наведено на рис. 1.



Рис. 1. Узагальнена схема впливу ВДЕ на режим роботи електричної мережі

У таблиці 1 наведено основні наслідки інтеграції ВДЕ для режимів роботи електричних мереж.

Таблиця 1 - Вплив ВДЕ на параметри режиму електричної мережі

Параметр режиму	Можливий вплив ВДЕ	Заходи оптимізації
Рівень напруги у вузлах	Підвищення напруги у вузлі приєднання при надлишковій генерації	Регулювання напруги трансформаторами РПН, вибір раціональної точки приєднання
Втрати активної потужності	Зменшення втрат при локальному покритті навантаження або їх збільшення при реверсивних перетоках	Оптимізація потужності ВДЕ та режимів генерації
Завантаження ліній	Зменшення струмів у живильних ділянках або перевантаження окремих відгалужень	Реконструкція мережі, перерозподіл навантаження, автоматизоване керування
Баланс активної потужності	Нерівномірність генерації через погодні умови	Застосування накопичувачів енергії та прогнозування генерації
Реактивна потужність	Можливе погіршення коефіцієнта потужності та режиму напруги	Компенсація реактивної потужності, використання інверторів із функцією регулювання Q

Оптимізація режимів роботи електричних мереж при інтеграції ВДЕ повинна базуватися на комплексному підході. Передусім необхідно виконувати розрахунок ustalених режимів для різних

сценаріїв генерації та навантаження. Це дозволяє визначити вузли з найбільшими відхиленнями напруги, ділянки з підвищеними втратами та елементи мережі, які можуть працювати з перевантаженням.

Важливим заходом є раціональний вибір місця приєднання ВДЕ. Приєднання генеруючої установки поблизу центрів навантаження зменшує перетоки потужності від живильного центру, а отже, знижує втрати електроенергії. Водночас підключення потужних ВДЕ до слабких ділянок мережі з великим опором може викликати значні відхилення напруги. Тому під час проектування необхідно враховувати пропускну здатність ліній, параметри трансформаторів, перспективне зростання навантаження та можливість подальшої реконструкції мережі.

Для підвищення ефективності роботи мережі доцільним є застосування автоматизованих систем керування режимами. Такі системи забезпечують моніторинг напруги, струмів, потужності та стану обладнання в реальному часі. На основі отриманих даних може здійснюватися керування інверторами ВДЕ, пристроями компенсації реактивної потужності, накопичувачами енергії та комутаційним обладнанням [4].

Окрему роль у стабілізації режимів відіграють акумуляторні системи накопичення енергії. Вони дозволяють накопичувати надлишкову електроенергію в періоди високої генерації ВДЕ та віддавати її в мережу під час пікового навантаження. Це сприяє вирівнюванню графіка навантаження, зменшенню коливань напруги та підвищенню надійності електропостачання споживачів [5].

Таким чином, інтеграція ВДЕ може мати як позитивний, так і негативний вплив на режими роботи електричних мереж. Позитивний ефект полягає у зменшенні втрат потужності, розвантаженні окремих ділянок мережі та підвищенні частки екологічно чистої електроенергії. Негативні наслідки можуть проявлятися у вигляді коливань напруги, реверсивних перетоків, ускладнення балансування та необхідності модернізації мережевої інфраструктури.

Висновки

Встановлено, що інтеграція відновлюваних джерел енергії істотно впливає на режими роботи електричних мереж, змінюючи розподіл потоків активної та реактивної потужності, рівні напруги у вузлах, втрати електроенергії та завантаження елементів мережі.

Показано, що оптимальний режим роботи мережі досягається за умови правильного вибору точки приєднання ВДЕ, узгодження потужності генерації з локальним навантаженням, використання засобів регулювання напруги, компенсації реактивної потужності та систем накопичення енергії.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на моделювання режимів роботи конкретної електричної мережі з урахуванням добових графіків навантаження, погодозалежної генерації СЕС і ВЕС та техніко-економічного обґрунтування заходів з оптимізації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Відновлювальна енергетика та системи розосередженої генерації / КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра електропостачання. URL: <https://ep.kpi.ua/index.php/uk/node/24> (дата звернення: 05.06.2026).
2. Кириленко О. В., Павловський В. В., Лук'яненко Л. М. Технічні аспекти впровадження джерел розосередженої генерації в електричних мережах // Технічна електродинаміка. 2011. № 1. С. 46-53.
3. Сеґеда М. С. Електричні мережі та системи : підручник. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2015. 540 с.
4. Blaabjerg F., Yang Y., Ma K., Wang X. Power electronics - the key technology for renewable energy system integration // Proceedings of the IEEE. 2017. Vol. 105, No. 11. P. 2110-2133.
5. Renewable energy sources and distributed generation in power systems: selected issues of integration and operation // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 119270-119302.

Кірілов О. І. - студент групи 1ЕСМ-22б, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Собчук Н. В. - канд. техн. наук, доцент кафедри електричних станцій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: natashasobchuk37@gmail.com.

Kirilov O. I. - student of group 1ESM-22b, Faculty of Electric Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Sobchuk N. V. - Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electric Stations and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: natashasobchuk37@gmail.com.