

Аналіз впливу фотоелектричних станцій на нормальний режим роботи локальної електричної системи

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розглянуто вплив розподіленої фотоелектричної генерації на режим роботи локальних електричних систем. Досліджено зміни потоків потужності, рівнів напруги та втрат у мережі залежно від місця підключення та потужності ФЕС. Запропоновано підхід до вибору оптимального місця розміщення ФЕС з урахуванням двох критеріїв оптимізації.

Ключові слова: розподілена генерація, фотоелектрична станція, локальна електрична система, мережеві втрати, коливання напруги, режим роботи мережі, оптимізація розміщення, якість електроенергії.

Abstract

The impact of distributed photovoltaic generation on the operation mode of local electrical systems is considered. Changes in power flows, voltage levels and losses in the network depending on the connection location and power of the PV plant are investigated. An approach to choosing the optimal location of the PV plant is proposed, taking into account two optimization criteria.

Keywords: distributed generation, photovoltaic plant, local electrical system, network losses, voltage fluctuations, network operation mode, location optimization, electricity quality.

Вступ

Стрімке зростання частки розподіленої фотоелектричної генерації у структурі електроенергетики суттєво змінює умови функціонування локальних електричних систем. Якщо традиційна розподільна мережа розрахована на однонаправлені потоки потужності від живлячого центру до споживачів, то підключення ФЕС перетворює її на багатоджерельну структуру з двонаправленим перетіканням енергії [1]. Це породжує цілий спектр технічних проблем: порушення роботи релейного захисту та автоматики, виникнення острівного режиму, відхилення напруги за допустимі межі, зростання або зниження втрат потужності залежно від режиму роботи [2]. Вирішення цих проблем є необхідною умовою подальшого розвитку відновлюваної енергетики. Метою даної роботи є систематизація та узагальнення закономірностей впливу ФЕС на нормальний режим локальної електричної системи, а також визначення умов, за яких цей вплив є мінімальним. Для досягнення мети вирішуються такі завдання: аналіз зміни потоків потужності та рівнів напруги при різних режимах генерації ФЕС; дослідження залежності мережевих втрат від місця підключення станції; формулювання підходу до оптимізації розміщення ФЕС у радіальній мережі.

Основні результати

Підключення ФЕС до розподільної мережі кардинально змінює її структуру: радіальна схема з одностороннім живленням трансформується у багатоджерельну, де потужність надходить одночасно від декількох точок. Наслідком цього є зміна величини та напрямку струмів короткого замикання, що безпосередньо впливає на налаштування релейного захисту. Зокрема, при виникненні короткого замикання у певній ділянці мережі ФЕС, розташована на суміжних фідерах або вище за місцем пошкодження, також інjektує струм у точку замикання. Це призводить до того, що традиційний алгоритм локалізації пошкоджень, який базується на односторонньому вимірюванні струму, втрачає коректність [1]. Система автоматизації розподілу (Distribution Automation) вже не може однозначно визначити ушкоджену ділянку за ознакою «один кінець зафіксував струм КЗ – другий ні», оскільки обидва кінці зони можуть реєструвати ненульові значення через наявність розподіленої генерації.

Окремої уваги потребує ефект острівного режиму. Якщо при відключенні живлення від основної мережі вихідна потужність ФЕС збалансована з місцевим навантаженням, інвертор може не зафіксувати втрату мережі та продовжувати подавати напругу на відключену ділянку. Такий стан несе пряму загрозу персоналу та обладнанню [1]. Дослідження показали, що методи активного виявлення

острівного режиму – зокрема зсув частоти за методом Sandia (SFS) та зсув напруги (SVS) – зберігають свою ефективність навіть при паралельній роботі кількох інверторів: час відключення практично не зростає зі збільшенням числа ФЕС у мережі [2].

Якість електричної енергії у точці підключення ФЕС визначається насамперед нестаціонарністю сонячного випромінювання. Швидкоплинні хмарні затінення здатні спричинити зміну генерації зі швидкістю до 15% за секунду, що перевищує здатність традиційних генераторів та пристроїв регулювання напруги своєчасно компенсувати відхилення [2]. Результатом є коливання та провали напруги, а при значному рівні проникнення ФЕС – і відхилення частоти, що вимагає збільшення резервів регулювання у системі.

Критичним параметром є місце підключення ФЕС у радіальній мережі, оскільки воно безпосередньо визначає як мережеві втрати, так і амплітуду коливань напруги у вузлах. Аналітичний вираз для зміни активних втрат при інтеграції ФЕС у вузол m радіальної мережі має вигляд:

$$\Delta P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^m r_{i-1,i} \left(-P_v^2 + 2P_v \sum_{k=i}^n P_k \right). \quad (1)$$

де P_v – активна потужність ФЕС,

P_k – навантаження у вузлі k ,

$r_{i-1,i}$ – активний опір ділянки лінії [3].

З цього виразу випливає, що втрати зменшуються при підключенні ФЕС у середній або хвостовій частині мережі лише до певного рівня генерації. Якщо потужність ФЕС перевищує подвоєне сумарне навантаження усіх вузлів нижче точки підключення, зворотний перетік потужності через опори ліній призводить до зростання втрат. Навпаки, якщо потужність ФЕС менша за подвоєне навантаження хвостового вузла, мінімум втрат досягається при розміщенні станції в кінці мережі.

Колівання напруги у вузлах також залежать від місця підключення, проте мають протилежну оптимальну точку порівняно з критерієм мінімуму втрат. При великій потужності ФЕС мінімальні коливання напруги забезпечуються при підключенні у хвостовій частині мережі, тоді як мінімум втрат – на початку. Це фундаментальне протиріччя унеможливує одночасну оптимізацію обох показників за одним критерієм і вимагає застосування багатоцільового підходу [3].

Для вирішення задачі спільної оптимізації запропоновано функцію:

$$\min \{ \alpha \cdot P_{\text{loss}} + (1 - \alpha) \cdot \Delta V_t \}. \quad (2)$$

де $\alpha \in [0,1]$ – вагові коефіцієнти пріоритетності мінімізації втрат або коливань напруги, що задаються відповідно до вимог конкретної системи [3]. Оптимальне місце розміщення визначається алгоритмом PSO (Particle Swarm Optimization) з урахуванням реальних метеорологічних умов та імовірнісного розподілу рівнів генерації ФЕС. Результати моделювання у середовищі PSCAD/EMTDC підтвердили, що при $\alpha = 0,3$ оптимальна відстань від живлячого кінця складає 2,48 км, а при $\alpha = 0,7$ – 1,75 км у тестовій мережі 10 кВ завдовжки 5 км, що відповідає теоретичним прогнозам [3].

Нижче наведено порівняльну таблицю втрат та середніх коливань напруги залежно від місця підключення ФЕС.

Таблиця 1 - Порівняння мережевих втрат (кВт) та середніх коливань напруги (кВ) при розміщенні ФЕС на початку (0 км), в оптимальній точці (2,48 км) та в кінці (5 км) мережі для трьох рівнів генерації

Місце підключення ФЕС	Потужність ФЕС	Втрати в мережі (кВт)	Середні коливання напруги (кВ)
Початок мережі (0 км)	220 кВт (висока)	3,0	0,68
Оптимальна точка (2,48 км)	220 кВт (висока)	5,1	0,62
Кінець мережі (5 км)	220 кВт (висока)	7,8	0,60
Початок мережі (0 км)	50 кВт (середня)	0,58	0,60
Оптимальна точка (2,48 км)	50 кВт (середня)	0,18	0,58
Кінець мережі (5 км)	50 кВт (середня)	0,38	0,62
Початок мережі (0 км)	20 кВт (низька)	0,70	0,595
Оптимальна точка (2,48 км)	20 кВт (низька)	0,28	0,598
Кінець мережі (5 км)	20 кВт (низька)	0,22	0,610

Позитивний вплив ФЕС на якість електропостачання реалізується через здатність інверторів генерувати або споживати реактивну потужність, беручи участь у регулюванні напруги, частоти та стабілізації режиму [1]. Разом із системами накопичення енергії сучасні фотоелектричні системи спроможні виконувати функції підтримки мережевих сервісів, зокрема згладжування пікових навантажень та підвищення надійності живлення критичних споживачів у мікромережному режимі [2].

Висновок

Фотоелектричні станції здійснюють комплексний вплив на нормальний режим роботи локальної електричної системи, зумовлений зміною напрямку та величини потоків потужності, нестационарністю генерації та появою нових джерел струму короткого замикання. Встановлено, що місце підключення ФЕС є визначальним параметром: залежно від співвідношення потужності генерації та навантаження критерії мінімуму мережевих втрат і мінімуму коливань напруги вимагають різних точок підключення, що підтверджує необхідність багаточільової оптимізації. Практична цінність отриманих результатів полягає у можливості їх безпосереднього використання при проектуванні мереж з розподіленою фотоелектричною генерацією: запропонований підхід дозволяє обґрунтовано вибирати місце підключення ФЕС, мінімізуючи сумарний негативний вплив на режим роботи системи та забезпечуючи відповідність нормативним вимогам щодо якості електричної енергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Hou L. Analysis of the Influence of Distributed Photovoltaic Power Generation Network on Distribution Network Security and Power Quality // *Advances in Engineering Research*. – 2018. – Vol. 149. – P. 671–674.
- [2] Whitaker C., Newmiller J., Ropp M., Norris B. Distributed Photovoltaic Systems Design and Technology Requirements. – Sandia National Laboratories, SAND2008-0946 P. – 2008. – 53 p.
- [3] Wang P., Liang F., Song J. et al. Impact of the PV Location in Distribution Networks on Network Power Losses and Voltage Fluctuations with PSO Analysis // *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. – 2022. – Vol. 8, No. 2. – P. 523–534.

Науковий керівник: **Комар В'ячеслав Олександрович** – д.т.н., проф., зав. кафедри електричних станцій та систем, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: kvo1976@ukr.net

Плотиця Юрій Олександрович – студент, факультет електроенергетики та електромеханіки, група ІЕСМ-226, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: vin.pool408@gmail.com

Komar Viacheslav Oleksandrovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electrical Power Plants and Systems, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: kvo1976@ukr.net

Plotytsia Yurii Oleksandrovych – student, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, group ІЕСМ-226, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: vin.pool408@gmail.com