

СЕНСОРНИЙ МЕТОД ПОШУКУ МІСЦЯ ВСТАНОВЛЕННЯ ДЖЕРЕЛА РОЗПОДІЛЕНОГО ГЕНЕРУВАННЯ

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

Запропоновано метод визначення оптимальної потужності та місця встановлення джерела розподіленої генерації, застосовуючи сенсорний аналіз з метою забезпечення якісного та оптимального, з точки зору зменшення втрат потужності, режиму роботи електричної мережі.

Ключові слова: розподілена генерація, оптимальна потужність, сенсорні вузли, матриця Якобі.

Вступ

На сьогоднішній день гнучкість та швидкість впровадження інновацій є ключовими факторами успіху не тільки виробництва, а й економіки в цілому. У цьому сенсі «розумним» мережам належить особлива роль: по суті, вони виконують функцію каркаса, на який в найближчому майбутньому буде кріпитися і тим самим забезпечувати нову якість продукції не тільки промисловість, але й транспортна та енергетична інфраструктури.

Як свідчить аналіз сучасного стану електричних мереж уразі введення розподіленого генерування (РГ) існує об'єктивна необхідність в оптимізації режимів їх роботи, удосконаленні принципів побудови мереж за рівнями напруги та видами виконання, комплексній автоматизації, підвищенні надійності, якості та ефективності функціонування мереж з урахуванням регіональних особливостей, що забезпечить ефективне управління, модернізацію та інноваційний розвиток електричних мереж.

Встановлення джерела РГ має бути обгрунтоване не лише за терміном окупності, але й має бути розрахований вплив джерела на ефективність роботи системи в цілому, адже в іншому випадку це може викликати порушення керованості та стійкості системи електропостачання і, як наслідок, погіршення якості електричної енергії.

У зв'язку з цим зі зростанням частки потужності РГ виникає необхідність проведення комплексу досліджень, пов'язаних з оцінкою їх впливу на енергосистему. Застосування РГ повинно відбуватись без погіршення показників якості електричної енергії та ефективності електропостачання споживачів.

Метою роботи є розробка методу визначення оптимального місця та потужності РГ із введенням її в енергосистему.

Матеріал та результати дослідження

Без належного вибору місця встановлення джерела РГ, можуть виникнути негативні наслідки для розподільної мережі, такі як підвищення напруги в кінцевій точці фідера, виникнення небалансу генерації і навантаження при аварійному розділенні електричної мережі, збільшення втрат електричної енергії та зниження рівнів надійності.

Точне визначення місця розташування РГ можливе за умови дослідження всіх можливих комбінацій місць встановлення та потужності генерації для цієї мережі. Відомі на сьогодні методи оптимізації, такі як метод градієнта, лінійне і нелінійне програмування, а також динамічне програмування використовуються, щоб вирішити питання оптимізації розподільних мереж з РГ. Однак, через складність поставленої задачі процес мінімізації цільової функції приводить до громіздких математичним обчислень, а також не завжди дозволяє отримати глобальний оптимум.

Важливим етапом при виборі найбільш раціональних технологій генерації енергії з нетрадиційних та відновлюваних джерел є правильна оцінка різних варіантів енергопостачання, яка повинна враховувати як регіональні, територіальні, економічні, так і екологічні, соціальні та інші аспекти.

На сьогодні існує декілька підходів до визначення оптимальних місць встановлення та потуж-

ності джерел РГ з метою мінімізації втрат активної потужності: лінійне програмування; аналітичний підхід до визначення оптимальної потужності за допомогою аналізу чутливості втрат потужності; аналіз оптимального розміщення РГ для типів джерел РГ з рівномірно розподіленим навантаженням та з навантаженням, що рівномірно збільшується; аналіз додаткових втрат активної потужності по відношенню до зміни коефіцієнта чутливості.

Однак визначення оптимального місця встановлення та потужності джерел РГ є не до кінця дослідженим питанням, адже замість очікуваного покращення параметрів електричної мережі у багатьох випадках спостерігається їх погіршення. У зв'язку з цим, в роботі розглянуто дві важливі задачі при введенні РГ, а саме пошук оптимальної потужності та місця встановлення джерела.

Задачу пошуку місця встановлення та потужності джерела РГ розділено на декілька етапів. На першому етапі визначаємо оптимальну потужність джерела РГ. Для кожного окремого вузла зі збільшенням потужності РГ відбувається поступове зменшення втрат потужності, яке спостерігається до величини оптимального значення [1]. При подальшому збільшенні потужності джерела РГ (понад оптимальне значення) відбувається зростання втрат.

Для визначення оптимальної потужності джерела РГ використовуємо відомі методики, виходячи з мінімізації сумарних втрат в мережі [2, 3]:

$$P_{PGi} = P_{ni} + \frac{1}{\alpha_{ij}} \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i} [\alpha_{ij} P_j - b_{ij} Q_j];$$

$$Q_{PGi} = Q_{ni} + \frac{1}{c_{ij}} \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i} [c_{ij} Q_j - d_{ij} P_j],$$

де P_{ni} , Q_{ni} — активна та реактивна складові потужності навантаження i -го вузла мережі; a_{ij} , b_{ij} , c_{ij} , d_{ij} — коефіцієнти функції втрат.

$$\alpha_{ij} = \frac{r_{ij}}{U_i U_j} \cos(\delta_i - \delta_j); \quad b_{ij} = \frac{r_{ij}}{U_i U_j} \sin(\delta_i - \delta_j);$$

$$c_{ij} = \frac{x_{ij}}{U_i U_j} \cos(\delta_i - \delta_j); \quad d_{ij} = \frac{x_{ij}}{U_i U_j} \sin(\delta_i - \delta_j),$$

де δ_i , δ_j — фаза напруги відповідно в i -му та j -му вузлах мережі

На другому етапі визначимо вузол приєднання джерела РГ. Для цього використаємо метод сенсорних вузлів. Дослідження сенсорності вузлів це одне із напрямлень структурного аналізу електроенергетичних систем, які використовують оцінку реакції напруги вузлів на зміну навантажень в них. Вузли, в котрих напруга найбільше змінюється при зміні навантаження на одиницю — називають сенсорним; а вузли з найменшими змінами напруги — жорсткими. Саме сенсорні та жорсткі вузли є найцікавішими та їх реакція на зміну навантаження показовою.

Для визначення сенсорних та жорстких вузлів застосовуємо сингулярний аналіз оберненої матриці Якобі (J^{-1}). Для цього виконаємо розкладання матриці на ортогональні матриці W та V :

$$\begin{pmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{pmatrix} = J^{-1} \begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix} = (W \Sigma V^T)^{-1} \begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix},$$

де $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_{2n})$ — діагональна матриця сингулярних значень.

Чутливість (сенсорність) модулів s_{U_i} вузлових напруг для схеми із n -вузлів визначають сумою:

$$s_{U_i} = \sum_{j=1}^n \frac{v_{ij} w_{ij}^T}{\sigma_j}.$$

Таким чином в ті вузли, що виявляються сенсорними (найчутливішими до зміни навантаження вузла) необхідно встановити джерело РГ, з потужністю, що була розрахована на першому етапі. Однак, в результаті розрахунку сенсорних вузлів виявиться, що таких вузлів декілька. Тому наступним етапом є уточнення кількості та місць встановлення джерел РГ, виходячи з мінімізації сумарних втрат потужності для цих сенсорних вузлів:

$$\Delta S_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n (\Delta P_{\Sigma} + \Delta Q_{\Sigma}) \rightarrow \min.$$

Моделювання та аналіз запропонованої методики визначення оптимальної потужності та місця встановлення джерела виконано для електричної мережі 35 кВ, узагальнена схема та навантаження вузлів якої показані на рис. 1 та в табл. 1, відповідно (примітка: питомий опір лінії складає $0,25 + j0,4$ Ом/км).

Згідно з вище вказаним алгоритмом, була розрахована оптимальна потужність джерела РГ для кожного вузла електричної мережі; складена матриця Якобі, виконаний її сингулярний розклад та визначені сенсорні вузли за модулем напруги (рис. 2а). З метою перевірки отриманих сенсорних вузлів, застосований алгоритм одновимірної кластеризації (рис. 2б) та алгоритм візуалізації матриці чутливості (рис. 2в).

Вихідні дані навантаження мережі

№ вузла	S, МВА	№ вузла	S, МВА	№ вузла	S, МВА
9	0,2 + j0,45	17	3,2 + j0,95	29	1,3 + j0,4
10	2,0 + j1,7	18	2,5 + j1,18	30	1,8 + j0,7
11	0,54 + j0,29	22	1,0 + j0,45	31	0,78 + j0,73
12	0,25 + j0,1	23	0,56 + j0,675	32	0,7 + j0,675
13	2,7 + j0,9	24	0,82 + j0,9		
16	0,6 + j0,43	28	2,0 + j0,15		

Таблиця 1

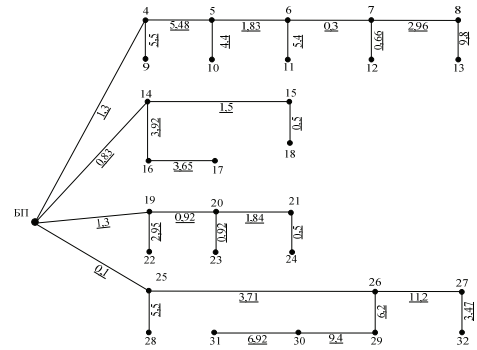
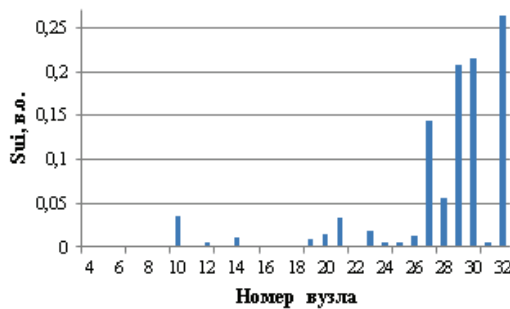
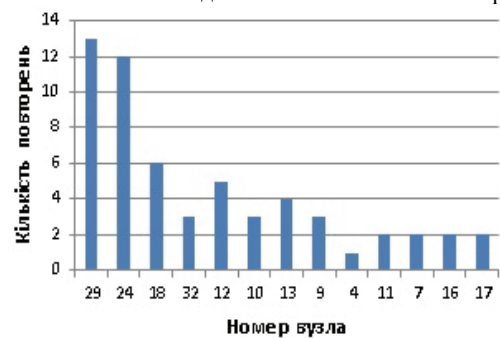


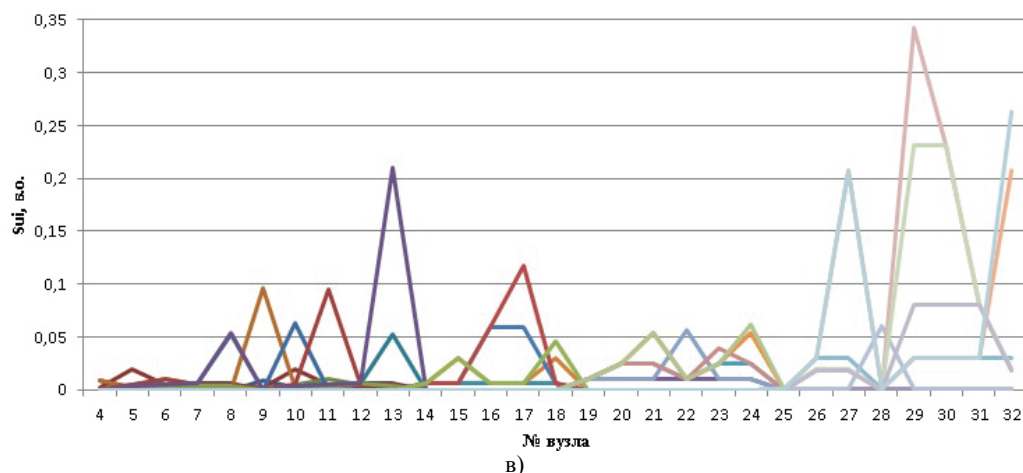
Рис. 1. Однолінійна схема тестової мережі



а)



б)



в)

Рис. 2. Визначення сенсорних вузлів за допомогою:

а — матриці Якобі в повній формі; б — алгоритму кластеризації; в — алгоритму візуалізації

Визначення нумерації сенсорних вузлів за допомогою наведених методів майже повністю збігається, а отже для цієї тестової мережі сенсорними вузлами є вузли № 32, 29, 30, 13, 27. Оптимальна потужність джерела РГ та коефіцієнт втрат активної потужності подані в табл. 2.

Значення оптимальної потужності, сумарних втрат та коефіцієнтів втрат активної потужності в тестовій мережі

№ вузла	Оптимальна потужність джерела РГ, МВт	Сумарні втрати в мережі, МВА	Коефіцієнт втрат активної потужності, в. о.
32	0,7	$0,2 - j0,3$	0,385
29	5,2	$0,17 - j0,28$	0,629
30	5,9	$0,16 - j0,25$	0,731
13	2,7	$0,14 - j0,22$	0,978
27	0,9	$0,197 - j0,303$	0,385

Згідно зі значенням коефіцієнтів втрат активної потужності (див. табл. 2) очевидно, що найвигіднішим є встановлення джерела РГ у вузлі № 13 з оптимальною потужністю 2,7 МВт.

Відомо, що джерела РГ мають позитивний вплив на режим напруги в мережі. Для тестової мережі на рис. 3 показано графік зміни напруги до та після встановлення джерела РГ у вузлі № 13.

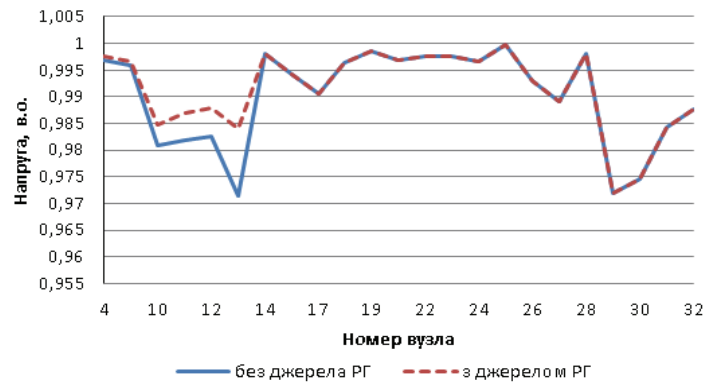


Рис. 3. Графік зміни напруги в тестовій мережі до та після встановлення джерела РГ

Висновки

Отримати максимальний позитивний ефект від впровадження джерел розподіленої генерації можливо лише вибором адекватного методу визначення їх оптимальних місць та встановлення потужностей. У запропонованому методі визначення потужності джерела розподіленої генерації виконано по мінімуму втрат повної потужності в мережі. Як метод визначення вузла розташування джерела РГ авторами застосовується сенсорний аналіз разом із принципом максимального ефекту, коли місця приєднання вибираються з урахуванням коефіцієнта втрат активної потужності. Попередній аналіз структурних властивостей енергосистеми на основі сенсорності вузлів супроводжується ранжуванням вузлів за ступенем їх жорсткості і дозволяє виявити вузли для доцільного встановлення джерел РГ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Чечушков Д. А. Метод оптимального розміщення источников распределенной генерации для повышения надежности электроснабжения / Д. А. Чечушков, Т. Ю. Паниковская, Е. А. Бунькова // Промышленная электроника. — 2014. — № 9. — С. 17—21.
2. Лежнюк П. Д. Оптимізація схем під'єднання нетрадиційних і відновлювальних джерел електроенергії в електричних мережах / П. Д. Лежнюк, С. В. Кравчук // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. — 2013. — № 2 (65). — С. 168—173.
3. Jegadeesan M. Optimal Sizing and Placement of Distributed Generation in Radial Distribution Feeder Using Analytical Approach / M. Jegadeesan, V. Keerthana // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. — 2014. — Vol. 3. — Pp. 358—364.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 27.11.2015

Кирик Валерій Валентинович — д-р техн. наук., професор, завідувач кафедри електричних мереж та систем;

Губатюк Оксана Сергіївна — аспірантка, асистент кафедри електричних мереж та систем, e-mail: OksanaGubatuyk@i.ua.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ.

V. V. Kyryk¹
O. S. Gubatiuk¹

Sensory Analysis of the Distributed Generation Settings

¹National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

The method for optimal power and place determination source of the distributed generation has been described in the article. The proposed method is based on the electrical network sensory analysis. This method ensures the quality of the electrical energy and optimal mode of the electrical network.

Keywords: distributed generation, optimal power, sensor nodes, Jacobi matrix.

Kyryk Valeii V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Electrical Networks and Systems;
Gubatiuk Oksana S. — Post-Graduate Student, Assistant of the Chair of Electrical Networks and Systems,
e-mail: OksanaGubatuuk@i.ua

V. V. Kyryk¹
O. S. Gubatiuk¹

Сенсорный метод поиска места установки источника распределенной генерации

¹Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

Предложен метод определения оптимальной мощности и места установки источника распределенной генерации на основании сенсорного анализа с целью обеспечения качественного и оптимального, с точки зрения уменьшения потерь мощности, режима работы электрической сети.

Ключевые слова: распределенная генерация, оптимальная мощность, сенсорные узлы, матрица Якоби.

Кирик Валерий Валентинович — д-р техн. наук., профессор, заведующий кафедры электрических сетей и систем;
Губатюк Оксана Сергеевна — аспирантка, ассистент кафедры электрических сетей и систем, e-mail: OksanaGubatuuk@i.ua