

ВИБІР ОПТИМАЛЬНОГО МІСЦЯ РОЗТАШУВАННЯ ДЖЕРЕЛ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Колесніченко А.Б., к.т.н., доцент, Байда М.С., магістрант
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра відновлюваних джерел енергії

Вступ. Енергетична криза сімдесятих років ХХ століття призвела до того, що в західних країнах зникла тенденція до максимальної централізації електропостачання. З цього часу почала інтенсивно розвиватися розосереджена генерація (РГ) [1]. Термін розосереджена система електропостачання ґрунтується на мережах і архітектурі систем майбутнього, заснованих на розосередженій генерації, розосереджених ресурсах та розосередженій ємності. Концепція таких систем розвивається в США, де цей термін широко використовується. В загальному розумінні, розосереджені системи електропостачання являють собою консолідоване поєднання розосередженого виробництва електричної енергії, технологій заощадження енергії, засобів управління електроспоживання на стороні споживачів та енергоефективних пристроїв. Встановлення джерела РГ має бути обґрунтоване 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 [2]. 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 [2].

Мета роботи. Метою даної роботи є розробка методу визначення оптимального місця розташування та потужності РГ в системі електропостачання.

Матеріали і результати досліджень. Для визначення оптимального місця встановлення джерела РГ в системі електропостачання будемо використовувати метод сенсорних вузлів. Сенсорний аналіз оцінки стану мережі дозволяє без розрахунку режиму визначити найбільш чутливі елементи. Основна ідея даного методу полягає в тому, що через неоднорідність системи електропостачання існують елементи, котрі сильніше реагують на зовнішні збурення і більше змінюються при випадкових змінах в топології схеми мережі і навантажень. Такі елементи називаються сенсорними. Крім того, в електричній мережі існують елементи, зміна параметрів режиму яких викликає найбільш сильну реакцію ЕЕС на збурення. Ці елементи називаються слабкими місцями [3].

Для визначення сенсорних і жорстких вузлів використовуємо сингулярний аналіз. Для матриці Якобі справедливо так зване сингулярне розкладання [4]:

$$J = W \Sigma V^T = \sum_{i=1}^k w_i \sigma_i v_i^T, \quad (1)$$

де $W = (w_1, w_2, \dots, w_k)$ та $V = (v_1, v_2, \dots, v_k)$ – ортогональні матриці розміром $(k \times k)$, їх i -ті стовпці є відповідно i -ми лівими і i -ми правими сингулярними векторами і для них справедливі умови:

$$w_i^T w_i = 1, (v_i^T v_i = 1), w_i^T w_j = 0, (v_i^T v_j = 1) \quad (2)$$

при $i \neq j$; $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k)$ – діагональна матриця сингулярних значень.

З даних властивостей можна зробити висновок, що якщо існує J^{-1} , тобто жодне з $\sigma_i > 0$ ($i = 1, \dots, k$) не дорівнює нулю, то:

$$J^{-1} = (W \Sigma V^T)^{-1} = \sum_{i=1}^k v_i w_i^T / \sigma_i \quad (3)$$

Рівняння режиму ЕЕС з урахуванням сингулярного розкладання для зворотної матриці Якобі може бути записано як:

$$\begin{pmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{pmatrix} = J^{-1} \begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^k v_i w_i^T / \sigma_i \begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix} \quad (4)$$

Розташуємо по міру зростання сингулярні значення $\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_3 \dots \leq \sigma_k$. Якщо перше з них істотно менше за інші, то при інших рівних умовах найбільший вплив на зміни модулів і фаз напруги має перший доданок суми:

$$\sum_{i=1}^k v_i w_i^T / \sigma_i \begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix} \quad (5)$$

що дозволяє перетворити вираз (4) в наступний вигляд:

$$\begin{pmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{pmatrix}^{(1)} + \sum_{i=2}^k \varepsilon_i = \left(v_1 w_1^T / \sigma_1 \right) \begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix} + \sum_{i=2}^k \varepsilon_i, \quad (6)$$

де $\sum_{i=2}^k \varepsilon_i$ – похибка визначення напруги через відкидання в (5) $k-1$ доданків. Додатково введемо нову скалярну величину – узагальнене збурення щодо i -го сингулярного значення.

$$\Delta S^{(i)} = w_i^T / \sigma_i \begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix} \quad (7)$$

Якщо $i = 1$, то

$$\begin{pmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{pmatrix}^{(1)} = v_1 \Delta S^{(1)} = v_1 \left(w_1^T / \sigma_1 \right) \begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix}, \quad (8)$$

де $\Delta S^{(1)}$ – перше обернення збурення.

У вузлах, які виявляться найбільш чутливими до зміни навантаження, необхідно встановити джерело РГ. Основна мета впровадження джерела РГ є мінімізувати загальні втрати потужності в системі електропостачання за рахунок оптимального розміру та розміщення. Цільова функція в даному випадку приймає вигляд:

$$\Delta S_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n (\Delta P_{\Sigma} + j\Delta Q_{\Sigma}) \rightarrow \min, \quad (9)$$

де ΔS_{Σ} – втрати потужності в системі електропостачання, МВА; ΔP_{Σ} – активна складова втрат потужності, МВт; ΔQ_{Σ} – реактивна складова втрат потужності, МВАр.

Оптимальна величина джерела РГ, щоб мінімізувати загальні втрати потужності після розміщення в системі електропостачання буде дорівнювати [5]:

$$P_{PГi} = P_{ni} + \frac{1}{a_{ij}} \sum_{j=1}^n \sum_{j \neq i} [a_{ij} P_j - b_{ij} Q_j] \quad Q_{PГi} = Q_{ni} + \frac{1}{c_{ij}} \sum_{j=1}^n \sum_{j \neq i} [c_{ij} Q_j - d_{ij} P_j], \quad (10)$$

де P_{ni}, Q_{ni} – активна та реактивна складові навантаження і-го вузла мережі; $a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij}$ – коефіцієнти функції втрат [5].

На основі запропонованого методу був проведений розрахунок вибору оптимальної величини та місця інтеграції джерела РГ в систему електропостачання. Для розрахунку взято розімкнену розподільну мережу напругою 35 кВ, узагальнена схема та навантаження вузлів якої наведені на рис. 1 та в табл. 1, відповідно питомий опір лінії складає 0,306+j0,421 Ом/км (довжина ліній складає 1 км).

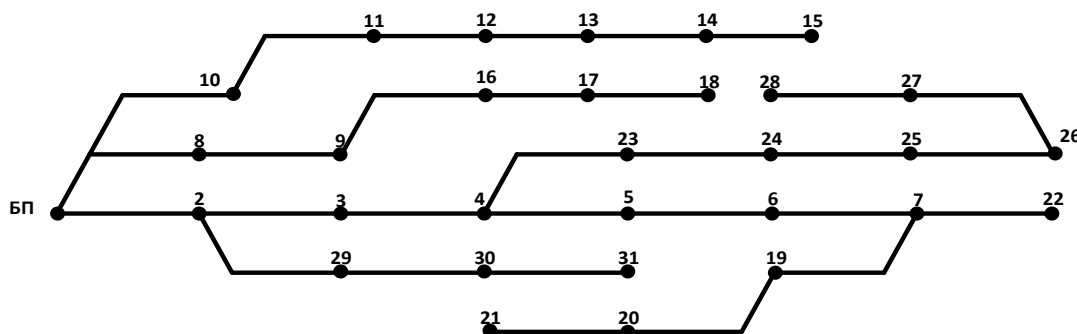


Рисунок 1 – Однолінійна схема тестової мережі

Таблиця 1 – Вихідні дані навантаження вузлів мережі

№ Вузла	S, МВА	№ Вузла	S, МВА	№ Вузла	S, МВА
2	0,522+j0,174	16	0,477+j0,159	24	1,917+j0,639
5	0,936+j0,312	17	0,549+j0,183	26	1,116+j0,372
8	0,432+j0,144	18	0,477+j0,159	27	0,549+j0,183
10	0,189+j0,063	19	0,432+j0,144	28	0,792+j0,264
12	0,336+j0,112	20	0,672+j0,224	29	0,882+j0,294
13	0,657+j0,219	21	0,495+j0,165	31	0,884+j0,294
14	0,783+j0,261	22	0,207+j0,069		
15	0,729+j0,243	23	0,522+j0,174		

Для даної розподільчої мережі 35 кВ була побудована матриця Якобі, виконано її сингулярне розкладання, визначені сенсорні вузли методом візуалізації матриці чутливості (табл. 2) та розраховані оптимальні потужності джерел РГ (табл. 2). Для цієї тестової мережі сенсорними вузлами є вузли № 7, 13, 15, 19, 21, 25, 27.

Таблиця 2 – Результати розрахунків

№ Вузла	Оптимальна потужність джерела РГ, МВА	Сумарні втрати в мережі, МВА
7	1,824+j0,654	0,0764+j0,1050
13	2,851+j1,014	0,0875+j0,1204
15	0,792+j0,243	0,0964+j0,1326
19	2,045+j0,718	0,0732+j0,1007
21	0,495+j0,165	0,0945+j0,13
25	2,489+j0,914	0,0637+j0,0877
27	1,899+j0,657	0,0675+j0,0929

Виходячи із отриманих результатів оптимальним місцем встановлення джерела РГ є вузол № 25. На рисунку 2 показаний графік зміни напруги в мережі після встановлення джерела РГ.

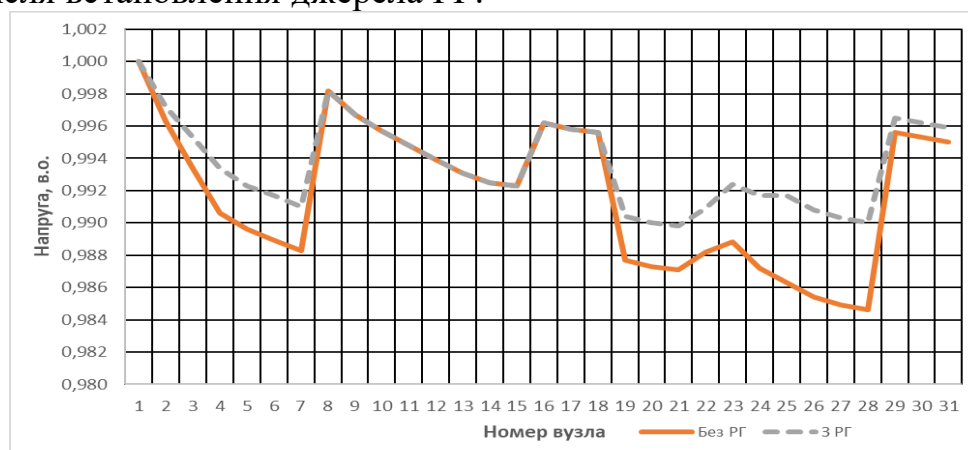


Рисунок 2 – Графік зміни напруги в розподільчій мережі до та після підключення джерела РГ

Висновок: Задача пошуку оптимального місця підключення та величини джерела РГ є ключовим питанням при проектуванні або реконструкції систем електропостачання споживачів. На основі запропонованого в роботі методу були проведені розрахунки по визначенню місця підключення, величини джерела РГ та був оцінений позитивний ефект від впровадження джерела РГ в розподільчу мережу.

Перелік посилань

1. Денисюк С.П. Аналіз впливу джерел розосередженої генерації на електромережу та особливості побудови віртуальних електростанцій / С.П. Денисюк, Т.М. Базюк // Електрифікація транспорту. – 2012. – № 4. – С. 23-29.
2. Кирик В.В. Сенсорний метод пошуку місця встановлення джерела розподіленого генерування / В.В. Кирик, О.С. Губатюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 2015. – № 6. – С. 136-140.
3. Лежнюк П.Д. Оцінка чутливості втрат потужності в електричних мережах: монографія / П.Д. Лежнюк, В.О.Лесько. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 120 с.
4. Войтов О.Н., Воропай Н.И., Гамм А.З. Анализ неоднородностей электроэнергетических систем / О.Н. Войтов, Н.И. Воропай, А.З. Гамм // Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1999. – 256с.
5. 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.