

## РОЗДІЛ VI. ЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.3.05

**П.Д. Лежнюк**, д-р техн. наук

**С.В. Кравчук**, студент

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

### ОПТИМІЗАЦІЯ СХЕМ ПІД'ЄДНАННЯ НЕТРАДИЦІЙНИХ І ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

**П.Д. Лежнюк**, д-р техн. наук

**С.В. Кравчук**, студент

Вінницький національний технічний університет, г. Винница, Украина

### ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМ ПОДКЛЮЧЕНИЯ НЕТРАДИЦИОННЫХ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

**P.D. Lezhniuk**, Doctor of Technical Sciences

**S.V. Kravchuk**, student

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine

### OPTIMIZATION OF A CONNECTION OF NON-TRADITIONAL RENEWABLE ENERGY IN ELECTRIC NETWORKS

*Розглянуто основні умови пошуку оптимальних місць під'єднання нетрадиційних і відновлювальних джерел електроенергії з метою забезпечення якісного, надійного та оптимального з погляду зменшення втрат активної потужності функціонування електричних мереж.*

**Ключові слова:** нетрадиційні і відновлювальні джерела електроенергії, оптимізація роботи, розосереджене генерування.

*Рассмотрены основные условия поиска оптимальных мест подключения нетрадиционных и возобновляемых источников электроэнергии с целью обеспечения качественного, надежного и оптимального, с точки зрения уменьшения потерь активной мощности, функционирования электрических сетей.*

**Ключевые слова:** нетрадиционные и возобновляемые источники электроэнергии, оптимизация работы, рассредоточенное генерирование.

*The basic conditions of optimal locations connecting alternative renewable energy sources, in order to ensure quality, reliable and optimal in terms of reduction of active power losses, the operation of electrical networks.*

**Key words:** alternative renewable energy, optimization of dispersed generation.

**Постановка проблеми.** Згідно з концепцією впровадження SMART Grid's технологій в Україні, покращення якості функціонування, надійності та всебічного розвитку електроенергетичної системи (ЕЕС) потрібно здійснювати за рахунок збільшення частки нетрадиційних і відновлювальних джерел електроенергії (НВДЕ). Децентралізація енергопостачання за допомогою НВДЕ дозволить диверсифікувати джерела енергії [1]. Важливим чинником для забезпечення ефективного використання НВДЕ є пошук оптимальних місць підключення та схем видачі електричної енергії. Така схема повинна відповідати вимогам по надійності електропостачання, а місце приєднання розміщуватись максимально наближено до центру споживання, що дозволить забезпечити мінімум втрат електричної потужності під час її транспортування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Впровадження в електричні мережі (ЕМ) джерел розосередженого генерування, що базуються на використанні НВДЕ, значною мірою зменшують рівень «забруднення» навколишнього середовища. Розміщення НВДЕ безпосередньо біля споживача буде впливати на зміну перетоків потужності залежно від вузлового навантаження, при узгодженому підключенні дасть можливість зменшити втрати активної потужності та здійснювати вплив на рівні напруги в усталеному режимі роботи ЕМ [2]. Пошук оптимальних умов підключення НВДЕ розглядається в [3] як багатокритеріальна задача, що має певні обмеження.

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** Досліджується вплив НВДЕ на режим роботи електричної мережі з метою мінімізації втрат активної потужності в умовах зміни місця та потужності розосереджених джерел генерування (РДГ).

**Мета статті. Метою роботи** є створення методу пошуку місць підключення НВДЕ в ЕМ та визначення оптимальної потужності генерування при забезпеченні стабільної якості функціонування електричних мереж з мінімальним загальносистемним показником – втратами активної потужності. Комплексний підхід у дослідженні цього питання дозволить повніше розкрити потенціал РДГ.

**Виклад основного матеріалу.** З метою розв’язання поставленої задачі визначаємо втрати потужності у вітках схеми. Значення повної потужності на початку і в кінці кожної вітки схеми визначається за формулою [4]:

$$\dot{S}_e = \sqrt{3} \cdot \dot{U}_{\Sigma_d} M_{\Sigma} \cdot \hat{I}_d, \quad (1)$$

де  $\dot{U}_{\Sigma_d}$  – діагональна матриця напруг у вузлах, включаючи і балансувальні,  $M_{\Sigma}$  – перша матриця з’єднань віток у вузлах, включаючи і балансувальні,  $\hat{I}_d$  – спряжена діагональна матриця струмів у вітках схеми.

Якщо вираз (1) помножити зліва на одиничний транспонований вектор  $n_t$ , то в результаті отримаємо транспонований вектор втрат потужності у вітках схеми:

$$\Delta \dot{S}_{et} = \sqrt{3} \cdot n_t \dot{U}_{\Sigma_d} \cdot M_{\Sigma} \cdot \hat{I}_d \text{ або з врахуванням того, що } n_t \dot{U}_{\Sigma_d} = \dot{U}_t, \text{ отримаємо:}$$

$$\Delta \dot{S}_{et} = \sqrt{3} \cdot \dot{U}_t \cdot M_{\Sigma} \cdot \hat{I}_d, \quad (2)$$

де  $\dot{U}_t$  – транспонований вектор напруг у вузлах, включаючи і балансувальні (тут і далі індекс t означає, що матриця або вектор є транспонованими).

З (2) видно, що втрати в і-й вітці схеми визначаються:

$$\Delta \dot{S}_{ei} = \sqrt{3} \cdot (\dot{U}_t M_{\Sigma_i}) \cdot \hat{I}_i, \quad (3)$$

де  $M_{\Sigma_i}$  – вектор-стовпець матриці інцидентій з’єднань віток у вузлах  $M_{\Sigma}$ ;

$\hat{I}_i$  – спряжений вектор струму в і-й вітці, який може бути визначений через струми у вузлах

$$\hat{I}_i = C_i J_{\Sigma}, \quad (4)$$

де  $C_i$  – і-й вектор-рядок матриці розподілу струмів у вузлах  $J_{\Sigma}$  по вітках схеми.

Матриця струморозподілу розраховується методом одиничних струмів або за відомою формулою:

$$C = z_e^{-1} M_{\Sigma_i} (M_{\Sigma} z_e^{-1} M_{\Sigma_i})^{-1}, \quad (5)$$

де  $z_e$  – діагональна матриця комплексних опорів віток схеми електричної мережі.

Якщо схема і параметри електричних мереж ЕЕС є відносно незмінними, то застосування методу визначення струмів у вітках за допомогою матриці струморозподілу  $C$  є доцільнішим.

Підставивши останній вираз у (3), отримаємо:

$$\Delta \dot{S}_{ei} = \sqrt{3} \cdot (\dot{U}_t M_{\Sigma_i}) \cdot \hat{C}_i \cdot \hat{J}_{\Sigma}. \quad (6)$$

З врахуванням того, що  $\hat{J}_{\Sigma} = \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{U}_{\Sigma_d}^{-1} \dot{S}_{\Sigma}$ , (6) можна переписати:

$$\Delta \dot{S}_{ei} = (\dot{U}_t M_{\Sigma_i}) \cdot \hat{C}_i \dot{U}_{\Sigma_d}^{-1} \dot{S}_{\Sigma}, \quad (7)$$

де  $\dot{S}_{\Sigma}$  – вектор вузлових навантажень, включаючи і балансувальні.

Позначимо в (7)

$$\dot{T}_i = (\dot{U}_i M_{\Sigma_i}) \cdot \dot{C}_i \dot{U}_D^{-1}, \quad (8)$$

де  $\dot{U}_D$  – діагональна матриця напруг у вузлах без балансувальних вузлів;

Вектор-рядок  $\dot{T}_i$  складається з коефіцієнтів, які показують, яку частку в сумарних втратах  $i$ -тої вітки складає протікання по ній потужності до кожного вузла [5].

На підставі (7) і (8) можна записати:

$$\Delta \dot{S}_g = \dot{T}_i \cdot \dot{S}_g, \quad (9)$$

де  $\Delta \dot{S}_g$  – вектор сумарних втрат у вітках схеми,  $\dot{T}_i$  – матриця коефіцієнтів розподілу втрат потужності у вітках схеми залежно від потужності у вузлах схеми, кожний рядок якої складається з (8).

Для спрощення розрахунків і зручності використання даних перетворимо матрицю  $\dot{T}_i$  у вектор-стовбець  $\dot{T}_g$ , елементи якого будуть коефіцієнтами розподілу втрат потужності від кожного вузла схеми:

$$\dot{T}_g = \dot{T}_i \cdot N_{od}, \quad (10)$$

де  $N_{od}$  – одиничний вектор-стовбець.

Відповідно до [6] визначаємо значення активної потужності, яку потрібно генерувати НВДЕ у вузлі  $P_i$ :

$$P_i = P_{ВДЕ} - P_n, \quad (11)$$

де  $P_n$  – потужність навантаження вузла;  $P_{ВДЕ}$  – активна потужність генерування НВДЕ.

$$P_i = \frac{|U_i| \cdot |U_i|}{R_{i,i}} \cdot \sum_{j=1, j \neq i}^n \left[ P_j \cos(\delta_i - \delta_j) + jQ_j \sin(\delta_i - \delta_j) \right] \cdot \frac{R_{i,j}}{|U_i| \cdot |U_j|}, \quad (12)$$

де  $|U_i|$  – модуль напруги у вузлі;  $n$  – кількість вузлів у схемі;  $R_{i,j}$  –  $i$  та  $j$  елемент матриці вузлових опорів схеми,  $\delta_i$  – фаза в  $i$ -тому вузлі,  $P_j, Q_j$  – активна та реактивна потужність навантаження в  $j$ -тому вузлі відповідно.

Для того, щоб знайти значення активної потужності НВДЕ відповідно до (11) і враховуючи (12), можна застосувати таку формулу:

$$P_{ВДЕ} = P_n + \frac{|U_i| \cdot |U_i|}{R_{i,i}} \cdot \sum_{j=1, j \neq i}^n \left[ P_j \cos(\delta_i - \delta_j) + jQ_j \sin(\delta_i - \delta_j) \right] \cdot \frac{R_{i,j}}{|U_i| \cdot |U_j|}. \quad (13)$$

Згідно з (13) визначаємо активну потужність генерування НВДЕ, будь-які інші значення генерованої потужності призведуть лише до збільшення загальних втрат у мережі.

**Як приклад** розглянемо тестову схему на 14 вузлів рекомендованої IEEE (рис. 1). Восьмий вузол у подальших розрахунках еквівалентовано. У вітках 5-6, 4-7, 4-9 встановлені трансформатори відповідно АТДЦТН-63000/230/121, АТДЦТН-100000/230/121 та АТДЦТН-125000/230/121. Початкові вузлові навантаження, напруги у вузлах, активна і реактивна потужність генерування задана у табл. 1.

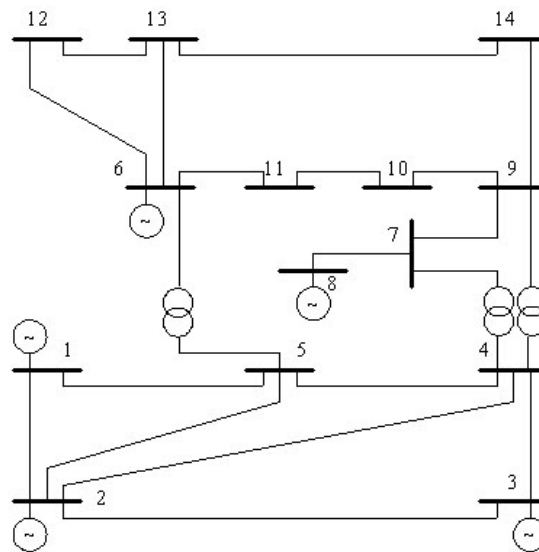


Рис. 1. Тестова схема IEEE

Таблиця 1

Інформація про вузли схеми та коефіцієнти розподілу втрат потужності  $\dot{T}_g$

№ вузлів	Параметри						$\dot{T}_g$
	U, кВ	Фаза, град	$P_n$ , МВт	$Q_n$ , МВАр	$P_g$ , МВт	$Q_g$ , МВАр	
1	243,8	0	0	0	254,52	87,3	Балансуючий вузол
2	229,42	-5,11	21,7	12,7	0	0	-0.058-j0.095
3	213,86	-12,8	94,2	19	0	0	-0.111-j0.253
4	221,83	-10,05	25	-3,9	0	0	-0.081-j0.192
5	224,46	-8,55	7,6	1,6	0	0	-0.074-j0.162
6	117,35	-12,5	11,2	7,5	0	15	-0.075-j0.236
7	122,68	-10,9	2	1	0	15	-0.066-j0.209
8	117,78	-12,5	30	16,6	0	15	-0.083-j0.239
9	116,84	-12,84	9	5,8	0	0	-0.088-j0.247
10	116,71	-12,32	3,5	1,8	0	0	-0.084-j0.245
11	115,71	-13,39	6,1	1,6	0	0	-0.087-j0.256
12	115,32	-13,44	13,5	5,8	0	0	-0.091-j0.259
13	114,52	-14	14,9	5	0	0	-0.102-j0.273

Виконавши відповідні розрахунки, визначили, що сумарні втрати у вітках схеми становлять  $\Delta \dot{S}_g = 15,725 + j57,515$  (МВА).

Використовуючи вектор-стовбець коефіцієнтів розподілу втрат потужності від кожного вузла схеми, визначаємо, що оптимальними місцями підключення НВДЕ будуть 14, 13, 10 та 3 вузли відповідно. З урахуванням того, що 3 вузол має найменше значення коефіцієнта в  $\dot{T}_g$ , прогнозуємо, що саме встановленням у цьому вузлі джерела генерування можливо досягти оптимального режиму роботи ЕМ, з найменшим значенням втрат активної потужності.

Визначивши місця приєднання НВДЕ, потрібно визначити, яку саме потужність генерування потрібно встановити для досягнення бажаного режиму.

Згідно з вищевказаним алгоритмом, для кожного вузла визначили оптимальну величину генерування активної потужності, але відповідно до коефіцієнтів у  $\dot{T}_g$  беремо до уваги лише вузли 13, 12, 9 та 3, результати розрахунків зведені в табл. 2.

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів розподілу втрат потужності та оптимальна величина генерування НВДЕ для вказаних вузлів

№ вузла	Коефіцієнт розподілу втрат потужності від вузла схеми $\dot{T}$	Потужність генерування $P_{ВДЕ}$ , МВт
13	-0,102 - j0,273	64,984
12	-0,091 - j0,259	78,171
11	-0,088 - j0,247	101,875
3	-0,111 - j0,253	147,061

Отримавши інформацію про місця під'єднання та оптимальну величину потужності НВДЕ, визначаємо втрати потужності у вітках схеми. При підключенні джерела генерування в 13 вузол  $\Delta \dot{S}_e = 10,61 + j34,03$  (МВА), в 12 вузол  $\Delta \dot{S}_e = 10,32 + j32,22$  (МВА), в 10 вузол  $\Delta \dot{S}_e = 9,07 + j28,44$  (МВА) та в 3 вузол  $\Delta \dot{S}_e = 4,36 + j16,75$  (МВА). Очевидно, що серед перерахованих вузлів оптимальний режим буде досягнутий при підключення джерела генерування в 3 вузол, а це забезпечить мінімальні втрати активної потужності.

Графічне представлення отриманих результатів зображено на рис. 2.

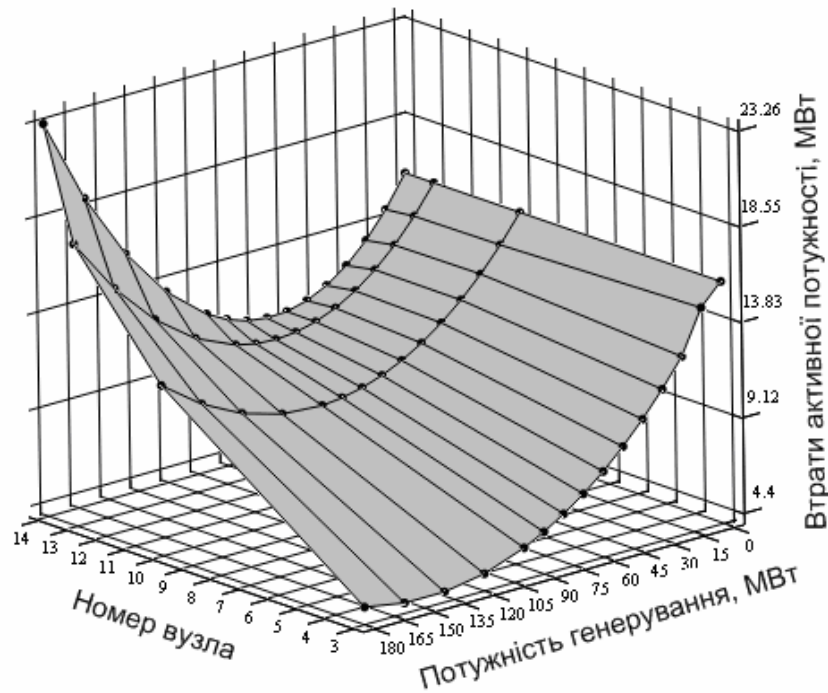


Рис. 2. Графічна залежність втрат активної потужності від зміни вузла та потужності генерування

**Висновки.** Джерела нетрадиційної і відновлювальної енергії мають різноплановий вплив на роботу електричної мережі. Переваги в збільшенні частки розосередженого генерування можливі лише при обранні правильного методу пошуку оптимальних місць під'єднання та потужності генерування НВДЕ.

Запропонований метод дозволяє визначити оптимальну по втратах активної потужності в мережі величину генерування НВДЕ для досліджуваного вузла схеми, в умовах нормалізації рівнів напруги у вузлах та підвищення якості функціонування електричної мережі для забезпечення потреб споживачів електроенергії.

#### Список використаних джерел

1. Буйний Р. О. Про доцільність використання вітроелектростанцій малої потужності для живлення побутових споживачів / Р. О. Буйний, І. В. Діхтярук // Новини енергетики. – 2011. – № 2. – С. 35-39.

2. Кириленко О. В. Технічні аспекти впровадження джерел розподіленої генерації в електричних мережах / О. В. Кириленко, В. В. Павловський, Л. М. Лук'яненко // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 1. – С. 46-53.

3. Shukla T. N. Allocation of optimal distributed generation using GA for minimum system losses in radial distribution networks / T. N. Shukla, S. P. Singh, K. B. Naik // International Journal of Engineering, Science and Technology. – 2010. – Vol. 2. – № 3. – P. 94-106.

4. Мельников Н. А. Матричный метод анализа электрических цепей / Н. А. Мельников. – М.: Энергия, 1972. – 232 с.

5. Лежнюк П. Д. Функціональна залежність складових втрат потужності у вітках електричної мережі від потужності у вузлах / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. Б. Бурикін // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – № 4. – С. 58-62.

6. Acharya N. An analytical approach for DG allocation in primary distribution network / N. Acharya, P. Mahat, N. Mithulanathan // Electric Power and Energy Systems. – 2006. – Vol. 28. – P. 669-678.

УДК 621.316.11

**Ф.П. Шкрабец**, д-р техн. наук

**П.Ю. Красовский**, ассистент

ГВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепропетровск, Украина

### **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНЫХ ЛЭП НА ТЕХНИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

**Ф.П. Шкрабець**, д-р техн. наук

**П.Ю. Красовський**, асистент

ДВНЗ «Національний гірничий університет», м. Дніпропетровськ, Україна

### **АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПОВІТРЯНИХ ЛЕП НА ТЕХНІЧНІ ВТРАТИ ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

**F.P. Shkrabets**, Doctor of Technical Sciences

**P.Y. Krasovskiy**, assistant

National Mining Universitet, Dnepropetrovsk, Ukraine

### **ANALYSIS OF OVERHEAD LINES PARAMETERS INFLUENCE ON TECHNICAL POWER LOSSES IN TRANSIT**

*Проведен анализ структуры технологических потерь электроэнергии с точки зрения оценки влияния продолжительности и условий эксплуатации воздушных линий электропередачи на значения и возможную при этом динамику технических потерь при транспортировке электроэнергии; рассмотрены характер и степень изменения параметров воздушных линий в процессе эксплуатации.*

**Ключевые слова:** воздушные линии электропередач, динамика технических потерь, коррозия алюминия.

*Проведено аналіз структури технологічних втрат електроенергії з погляду оцінювання впливу тривалості й умов експлуатації повітряних ліній електропередачі на значення й можливу при цьому динаміку технічних втрат під час транспортування електроенергії; розглянуто характер і ступінь зміни параметрів повітряних ліній у процесі експлуатації.*

**Ключові слова:** повітряні лінії електропередач, динаміка технічних втрат, корозія алюмінію.

*The analysis of power losses structure in terms of assessing the impact of the duration and conditions of overhead power lines use on the values and possible technical losses dynamic in the electricity transmission is carried out; the formation and degree of overhead line parameters change during operation is examined.*

**Key words:** overhead power lines, the dynamics of technical losses, the corrosion of aluminum.

**Постановка проблемы.** На фоне происходящих в Украине изменений хозяйственного механизма в энергетике, изменения экономических отношений, проблема снижения потерь электроэнергии в электрических сетях не только не утратила свою актуальность, а, наоборот, выдвинулась в одну из задач обеспечения финансовой стабильности энергоснабжающих организаций.

Опыт энергосистем показывает, что при долгосрочной эксплуатации воздушных линий электропередач потери мощности и электроэнергии в них даже при неизменной