

7. *Pert distribution*. EPIX Analytics – ModelAssist for Crystal Ball. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.epixanalytics.com/modelassist/CrystalBall/Model_Assist.htm#Distributions/Continuous_distributions/PERT_%28Beta%29.htm. – Назва з титул. екрану.
8. *Schroder A. et al.* Current and Prospective Cost of Electricity Generation until 2050 / Deutsches Institut fur Wirtschaftsforschung. – Berlin: DIW, 2013. – 94 p.

УДК 620.92+621.31:519.24

В.О. Костюк, канд. техн. наук

Институт общей энергетики НАН Украины,
ул. Антоновича, 172, Киев, 03680, Украина

Детерминированно-стохастические модели объектов электрической генерации для расчета нормируемых цен производства электроэнергии

Рассмотрены практические аспекты применения вероятностных методов для расчета оценок технико-экономических показателей электрогенерирующих установок с возобновляемыми источниками энергии. Неопределенность прогнозных стоимостных оценок проектных показателей сооружаемой солнечно-фотоэлектрической станции (СФЭС) в Украине, которую связывают с использованием классического детерминированного подхода, предлагается снизить путем программно-аналитического учета меняющихся технологических и экономических показателей посредством параметров управляемого распределения их случайных значений в структуре детерминированно-стохастических экономико-математических расчетных моделей. Даны примеры решения задач для СФЭС методами Монте-Карло (MCSim) и точечного оценивания (PEsM). Библ. 8, рисунок, табл. 3.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, расчет нормированной цены, жизненный цикл, фотоэлектрическая станция, детерминированно-стохастическая модель, вероятностные методы, дисперсионный анализ.

V. Kostiuk

Institute of General Energy of NAS of Ukraine,
172, Antonovycha str., Kyiv, 03680, Ukraine

Deterministic and stochastic models of electrical power utility applicable for computation of leveled electricity prices

Practical aspects of feasibility assessment problem are considered, basing on the leveled energy cost concept (LCOE) for newly commissioned renewable power plants to be operated under the Ukrainian law. An uncertain modeling data, either technical or cost estimates, relevant for the site with solar-photovoltaic plant (PVPP) in Ukraine will essentially influence the decision making process when classical deterministic approach is applied traditionally. To deal with uncertainties the use of value's distribution control for certain technical and economic parameters is proposed as to be introduced seamlessly within the structure of deterministic and stochastic mathematical model. Computed problem solutions by means of Monte Carlo Simulation (MCSim) and Point Estimation Method (PEsM) are presented for the typical PVPP cases. Obtained numerical results are applicable for variance analysis whilst the stochastic models should be enhanced and deployed to find feasible and optimal solutions for complex distributed generation systems (DGS). References 8, figure, tables 3.

Key words: renewable energy, leveled energy cost computation, life cycle, deterministic and stochastic model, probabilistic methods, variance analysis.

Надійшла 7.07.2015

Received 7.07.2015

УДК 621.311

ОКРЕМІ ПИТАННЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДУ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ МІСЦЬ ВСТАНОВЛЕННЯ ТА ПОТУЖНОСТІ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

І.С. Гончаренко, асп.

Институт электродинамики НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна
e-mail: devilhanterxl@gmail.com

Впровадження розосередженої генерації (РГ) в електричні мережі обумовлено суттєвими перевагами цих установок над традиційними електростанціями. Але поряд з багатьма перевагами виникає ціла низка проблем, значну частину яких можна вирішити, виконавши оптимальне розміщення джерел розосередженої генерації в електричних мережах. У статті [3] розроблено метод розв'язання задачі визначення оптимальних місць встановлення та потужності розосередженої генерації в електричних мережах з використанням статистичних випробувань Монте-Карло, який враховує особливості електричних мереж України. Цю статтю присвяче-

но аналізу ефективності роботи запропонованого методу. Визначено рівень ефективності роботи початкової модифікації методу, який виражається в кількості необхідних випробувань, що з певною достовірністю гарантуватимуть отримання оптимальних розв'язків. Досліджено вплив кількості кроків зміни потужності джерел РГ у діапазоні від мінімальної до максимальної потужності та власне діапазонів потужності РГ на ефективність роботи запропонованого методу. На основі аналізу обрано таку кількість кроків зміни потужності, яка дасть можливість достатньо точно визначити оптимальну потужність джерел РГ, підключених до кожної шини ЕМ, та не створить проблем при подальшому дослідженні ефективності роботи методу. Для визначення діапазонів потужності використано новий критерій K_2 , який дає змогу більш коректно визначити вузли підключення РГ з технічної точки зору та значно збільшує частоту появи оптимальних розв'язків за незмінної кількості можливих розв'язків. Бібл. 4, рис. 2, табл. 2.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, розосереджена генерація, метод Монте-Карло, оптимізація.

Вступ. Зростання частки розосередженої генерації (РГ), а зокрема відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), у структурі генеруючих потужностей розвинених країн світу зумовлено постійним зростанням попиту на електроенергію та перевагами РГ над об'єктами традиційної централізованої енергетики. Проте ці переваги не є абсолютними і підключення РГ до електричної мережі (ЕМ) в будь-якому місці не гарантуватиме отримання всіх можливих переваг, а й, навпаки, може викликати або посилити певні проблеми [1]. Варто виділити умовні переваги, реалізація яких можлива завдяки розв'язанню задачі визначення оптимальних місць встановлення та потужності розосередженої генерації в електричних мережах (ВМПРГ). Умовними перевагами є такі: зменшення втрат електричної енергії в ЕМ; підвищення показників надійності та якості електропостачання; відтермінування модернізації електричної мережі.

Численна кількість робіт присвячена питанню оптимального розміщення РГ в ЕМ, проте це питання не є остаточно вирішеним навіть у розвинених країнах. Особливості ЕМ України [3] потребують дещо інших підходів до питання оптимального розміщення РГ. Тому в роботі [3] розроблено математичну модель та метод для реалізації комплексного підходу розв'язання задачі оптимізації місць встановлення та потужності РГ, а зокрема ВДЕ. Для розв'язання цієї задачі було розроблено систему обмежень та критеріїв оптимізації, на базі якої сформовано відповідну цільову функцію (ЦФ), що відображає місце встановлення, тип та потужність РГ, а також вплив встановленої РГ на режимні параметри ЕМ. У розробленому методі використано статистичні випробування Монте-Карло, принцип проведення яких представлено на рис. 1.

Відповідно до статистичних випробувань Монте-Карло виконувалося генерування великої кількості N випадкових дослідів (розв'язків задачі ВМПРГ). Кожен окремих i -й дослід характеризується різною кількістю джерел РГ $N_{P_{Ri}}$ (наприклад, від 1 до 6). Кожне встановлене джерело РГ характеризується певною випадковою потужністю $P_{P_{Ri}}$ (наприклад, від 0 до 50 МВт) та випадковим типом джерел РГ (СЕС, ВЕС, ГЕС тощо). Таким чином, формується певна конфігурація електричної мережі. Далі виконується розрахунок усталеного режиму роботи ЕМ та відповідного значення цільової функції, яка сформована так, що чим більшим є її значення, тим кращим є той чи інший розв'язок задачі. В [3] наведено найкращі варіанти інтеграції джерел РГ в тестову електричну мережу – 14-шинну схему Інституту інженерів з електротехніки та електроніки (ІЕЕЕ), – які отримано в результаті розрахунково-модельних

випробувань. Як відомо [4], ефективність методів із застосуванням статистичних випробувань Монте-Карло залежить від кількості проведених випробувань. Тому постає питання перевірки ефективності запропонованого методу, тобто визначення кількості необхідних випробувань, виконання яких з певною достовірністю гарантуватиме отримання оптимального розв'язку.

Перевірка ефективності роботи запропонованого методу. Оптимальними розв'язками пропонується вважати такі, значення цільової функції W_i

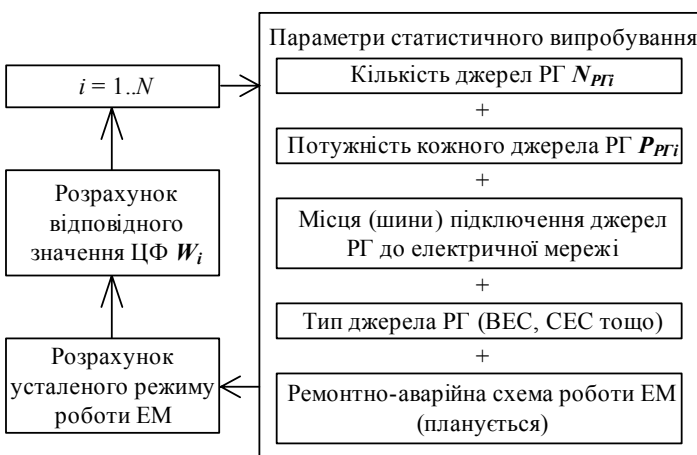


Рис. 1

яких відрізняється від максимально можливого на практиці значення ЦФ W_{\max} для всіх існуючих розв'язків за заданих умов не більше ніж на деяке значення ΔW . У роботі розв'язки було розділено на чотири категорії за значенням цільової функції (табл. 1).

Таким чином, можна сказати, що задача ВМПРГ є розв'язаною лише тоді, коли отриманий розв'язок належить до категорій 1-3 (табл. 1).

Для визначення необхідної кількості випробувань було удосконалено та використано методику, яка запропонована в [2]. Спочатку способом перебору всіх можливих варіантів підключення РГ до тестової схеми, яка була розроблена та використовувалася для дослідів у роботі [3], з урахуванням певних умов, було визначено найкращий розв'язок задачі ВМПРГ – глобальний оптимум. Далі для енергосистеми виконувалися серії випробувань, у процесі яких збиралися статистичні дані про частоту появи оптимальних розв'язків задачі ВМПРГ, на основі яких можна зробити висновки про ефективність розробленого методу.

Залежність частоти появи оптимальних розв'язків від кількості випробувань за початкових умов показана на рис. 2. Початковими умовами виконаних статистичних випробувань є:

1. Рівномірний закон розподілу всіх випадкових величин, а саме місця розташування, потужності та типу джерел РГ;
2. Потужність джерел РГ змінювалася в діапазоні від 10 до 50 МВт з кроком 10 МВт;
3. Три джерела РГ були одночасно підключені до електричної мережі;
4. Одночасно до однієї шини ЕМ підключалося не більше одного джерела РГ.

Графік залежності (рис. 2) побудовано таким чином:

1. Виконувався розрахунок великої кількості випадкових станів енергосистеми, в цьому випадку 4 000 000.
2. Отримані результати групувалися в 400 наборів по 10, 12, 15, ..., 10 000 випробувань.
3. Проводився підрахунок появи хоча б одного оптимального (відповідно до поділу в табл. 1) результату в кожному наборі групи.
4. Визначалася частота появи оптимальних розв'язків у кожній групі, що дало змогу зробити висновок щодо необхідної кількості статистичних випробувань Монте-Карло.

Отже, проаналізувавши рис. 2, можна сказати, що для отримання, наприклад, гарного (табл. 1) розв'язку задачі ВМПРГ з ймовірністю не менше 95 %, необхідно і достатньо виконати 1000 випробувань, що становить 3,64 % (табл. 2) від загальної кількості можливих розв'язків за початкових умов. Розрахунок такої кількості випробувань займає близько 17 с на ЕОМ, яка була використана для проведення досліджень. Таку ЕОМ за умов сьогодення можна характеризувати як машину середньої обчислювальної потужності.

Отримання хоча б одного найкращого розв'язку за 10 000 випробувань можливе лише з ймовірністю 67 %. Розрахункове значення необхідної кількості випробувань для 95 % гарантії отримання результату складає 27 300 випробувань, що становить 99,27 % від загальної кількості можливих розв'язків за початкових умов. Отже, можна зробити висновок, що попередню модифікацію запропонованого методу доцільно використовувати для пошуку лише хороших та гарних оптимальних розв'язків.

Таблиця 1

Номер категорії	Значення відхилення ΔW	Значення ЦФ W_i	Характеристика розв'язків	
1	$\leq 0,01 \cdot W_{\max}$	$0,99-1,00 \cdot W_{\max}$	Оптимальні	Найкращі
2	$\leq 0,05 \cdot W_{\max}$	$0,95-1,00 \cdot W_{\max}$		Гарні
3	$\leq 0,1 \cdot W_{\max}$	$0,90-1,00 \cdot W_{\max}$		Хороші
4	$> 0,1 \cdot W_{\max}$	$0,00-0,90 \cdot W_{\max}$	Неоптимальні	

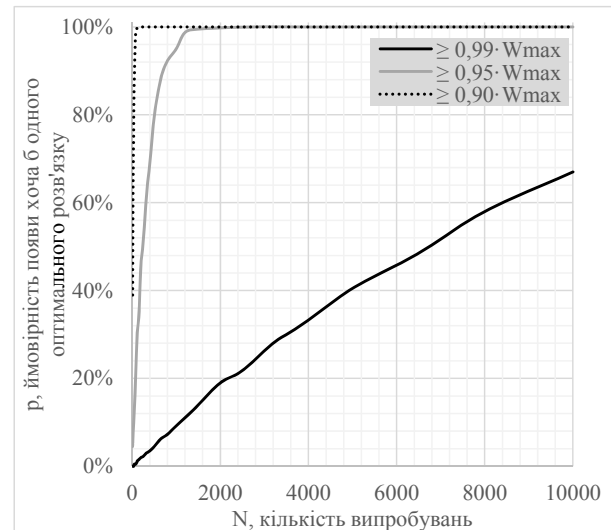


Рис. 2

Підвищення ефективності роботи запропонованого методу. Перевірка ефективності роботи методу показала, що він має високу швидкодію при пошуку гарних та хороших розв'язків (табл. 1), проте пошук найкращих розв'язків вимагає проведення значно більшої кількості випробувань, що може бути не припустимим. Існує декілька способів підвищення ефективності роботи методів, створених на основі статистичних випробувань Монте-Карло, зокрема, такі:

1. Збільшення кількості випробувань і, як наслідок, підвищення ймовірності появи оптимального розв'язку, але такий підхід є неефективним з описаних вище причин.

2. Зменшення кількості можливих розв'язків задачі ВМПРГ. Такий підхід, з одного боку, дасть змогу зменшити кількість необхідних випробувань, проте з іншого – змушує робити певні допущення, які призведуть до зниження точності розв'язку задачі. Використання цього підходу потребує проведення додаткових досліджень.

3. Зміна законів розподілу випадкових величин. Закон розподілу матиме вплив на частоту появи оптимальних розв'язків і відповідно на кількість необхідних випробувань. Це питання також потребує проведення додаткових досліджень.

Зменшення кількості можливих розв'язків або більш загально – зміну кількості можливих розв'язків може бути здійснено регулюванням таких параметрів статистичних випробувань:

1. Кількість кроків зміни потужності від мінімального до максимального значення.
2. Діапазони потужності джерел РГ.
3. Кількість одночасно підключених до мережі джерел РГ.
4. Набір шин ЕМ, до яких дозволяється підключення РГ.

Всі ці параметри впливають на кількість можливих розв'язків і, можливо, на частоту появи оптимальних розв'язків. Правильний вибір цих параметрів дасть змогу підвищити ефективність роботи запропонованого методу. Зважаючи на стислий обсяг статті, пропонується дослідити вплив кількості кроків зміни потужності від мінімального до максимального значення та діапазони потужності джерел РГ на ефективність роботи методу.

Існують два граничних випадки кількості кроків зміни потужності джерел РГ:

1. Один крок, що фактично відповідає максимальному значенню потужності. В такому випадку задача розв'язуватиметься лише з точки зору визначення оптимальних місць встановлення РГ за фіксованої потужності, що є неприйнятним відповідно до постановки задачі [3].

2. Безліч кроків – прийняти діапазон потужності від мінімального до максимального значення як неперервну величину, що означатиме нескінченну кількість можливих варіантів. Наслідком такого підходу буде неможливість перевірки всіх можливих варіантів розв'язання задачі. Також отриманий таким чином оптимальний розв'язок ймовірніше за все неможливо буде реалізувати на практиці через технічні обмеження.

Отже, необхідно обрати адекватну кількість кроків зміни потужності. Було розглянуто декілька варіантів згаданого параметра. Перевірка ефективності роботи методу показала: зменшення кількості кроків потужності до двох зменшило кількість можливих розв'язків задачі ВМПРГ за заданих умов у порівнянні з початковим дослідом у 15,6 рази (табл. 2), а необхідна кількість випробувань для отримання гарного розв'язку з достовірністю 95 % знизилася до 350 випробувань, або приблизно у 3 рази, що складає 19,89 % від загальної кількості можливих розв'язків за таких умов. Таке зменшення кількості кроків зміни потужності не лише перетворює задачу з визначення оптимальних місць встановлення та потужності РГ в ЕМ на визначення лише місць встановлення РГ в ЕМ, а й зменшує ефективність роботи методу. Фактично за таких умов доцільніше скористатися перебором можливих розв'язків.

Збільшення кількості кроків потужності до десяти збільшило кількість можливих розв'язків задачі ВМПРГ за цих умов у порівнянні з початковим дослідом у 8 разів (табл. 2), а необхідна кількість випробувань для отримання гарного розв'язку з достовірністю 95 % збільшилася до 1700 випробувань, або приблизно в 1,7 рази, що склало 0,77 % від загальної кількості можливих розв'язків за таких умов.

З отриманих результатів можна зробити висновок, що збільшення кількості можливих варіантів зменшує частоту появи оптимальних розв'язків та разом з тим підвищує точність визначення оптимальної потужності РГ в ЕМ. Хоч частота появи оптимальних розв'язків зменшується, але й частка від загальної кількості можливих розв'язків також зменшується.

Отже, з'являється необхідність знайти компроміс між точністю визначення оптимальної потужності РГ в ЕМ та тривалістю проведення випробувань. Зважаючи на необхідність проведення перевірок змін у роботі методу шляхом перебору всіх можливих розв'язків, було прийнято рішення виконувати подальші дослідження ефективності роботи методу при десяти кроках зміни потужності джерел РГ.

Визначення діапазонів потужності було виконано за допомогою нового критерію K_2 , який виходить за межі цієї статті. Критерій K_2 дає змогу більш коректно визначати вузли підключення РГ з технічної точки зору. Використання критерію K_2 дало змогу досягти значно більшого максимального значення ЦФ за незмінної кількості можливих розв'язків (дослід 5, табл. 2). Як видно з табл. 2, частота появи найкращих та гарних оптимальних розв'язків майже не змінилася, тоді як частота появи хороших розв'язків дещо знизилася. Проте значення ЦФ хороших розв'язків починається від 1,34107, що більш ніж на 10 % перевищує максимальне значення ЦФ, яке можна було отримати в досліді 1–3.

Для порівняння було проведено дослід 4 (табл. 2), суть якого полягає у використанні однакових діапазонів потужності для всіх джерел РГ. На відміну від дослідів 1–3 у четвертому максимальне значення потужності всіх джерел РГ дорівнює максимальному значенню потужності найбільшого джерела в досліді 5. Таким чином, у досліді 4 охоплюються й розв'язки досліді 5. Проте менша точність розв'язків не дала можливості досягти такого максимального значення ЦФ, як у досліді 5, а велика концентрація неоптимальних розв'язків значно зменшила ефективність роботи методу.

Таблиця 2

№ з/п	Умови досліді		Кількість можливих розв'язків	Максимальне значення ЦФ W_{\max}	Частка розв'язків у діапазоні значень до W_{\max} , %		
	Діапазон потужності, МВт	Крок зміни потужності, МВт			$\geq 0,99 \cdot W_{\max}$	$\geq 0,95 \cdot W_{\max}$	$\geq 0,90 \cdot W_{\max}$
1	10 – 50	10	27 500	1,20188	0,0110	0,301	4,429
2	10 – 50	25	1 760	1,20188	0,1144	0,853	9,216
3	10 – 50	5	220 000	1,20188	0,0025	0,177	3,793
4	63 – 630	63	220 000	1,37841	0,0003	0,0003	0,002
5	$f(K_2)$	$0,1 \cdot P_{\max i}$	220 000	1,49008	0,0028	0,129	0,920

Висновки. Виконано аналіз та підвищено ефективність роботи запропонованого методу. Серед різноманітних параметрів статистичних випробувань увагу було приділено кількості кроків зміни потужності джерел РГ у діапазоні від мінімальної до максимальної потужності та власне діапазонам потужності джерел РГ. У результаті аналізу обрано 10 кроків зміни потужності (від $0,1 \cdot P_{\max}$ до P_{\max}). Така кількість дасть змогу достатньо точно визначати оптимальну потужність джерел РГ, підключених до кожної шини ЕМ, та не створить проблем при подальшому дослідженні ефективності роботи запропонованого методу. Для визначення діапазонів потужності було використано критерій K_2 , який дає змогу більш коректно визначати вузли підключення РГ з технічної точки зору та значно збільшує частоту появи оптимальних розв'язків за незмінної кількості можливих розв'язків.

1. Кириленко О.В., Павловський В.В., Лук'яненко Л.М. Технічні аспекти впровадження джерел розподільної генерації в електричних мережах // Техн. електродинаміка. – 2011. – № 1. – С. 46–53.
2. Лук'яненко Л.М. Відновлення електропостачання знеструмлених споживачів в розподільних електричних мережах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ін-т електродинаміки НАН України. – К., 2009. – 20 с.
3. Лук'яненко Л.М., Гончаренко І.С., Блонська О.В. Визначення оптимальних місць встановлення та величин потужності відновлюваних джерел енергії // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2014. – Вип. 37. – С. 26–33.
4. *Электрические системы*. Т. 1. Математические задачи электроэнергетики / Под ред. В.А. Веникова: Учебн. пособие для электроэнерг. вузов. – М.: Высш. шк., 1970. – 336 с.

УДК 621.311

И.С. Гончаренко, асп.

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Некоторые вопросы повышения эффективности метода решения задачи определения оптимальных мест установки и мощности рассредоточенной генерации

Внедрение рассредоточенной генерации в электрические сети обусловлено значительными преимуществами этих установок над традиционными электростанциями. Но наряду со многими преимуществами возникает много проблем, значительную часть которых можно решить, если выполнить оптимальное размещение источников рассредоточенной генерации в электрических сетях. В работе [3] разработан метод решения задачи определения оптимальных мест установки и мощности распределенной генерации в электрических сетях с использованием статистических испытаний Монте-Карло, который учитывает особенности электрических сетей Украины. Эта статья посвящена анализу эффективности работы предложенного метода. Определен уровень эффективности работы начальной модификации метода. Исследовано влияние количества шагов изменения мощности источника РГ в диапазоне от минимальной к максимальной мощности и собственно диапазонов мощности РГ на эффективность работы предложенного метода. Библ. 4, рис. 2, табл. 2.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, рассредоточенная генерация, метод Монте-Карло, оптимизация.

I.S. Goncharenko

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Some problems of the efficiency improvement of the method for determination of the optimal placement and capacity of distributed generation

Implementation of distributed generation (DG) sources into the power grid is conditioned by the significant advantages of these plants versus traditional power plants. There are some problems along with the many advantages. Considerable part of these problems can be solved if optimal placement of DG sources in power grids is performed. Method for determination of the optimal placement and capacity of distributed generation has been developed in the previous article [2]. Created method uses Monte Carlo simulations and considers special aspects of the Ukrainian power grids. Current article analyses efficiency level of the proposed method. Efficiency level is the amount of necessary computations that provides optimal solution with some assumptions. Studied the influence of the DG power steps amount alteration and DG power ranges on the proposed method efficiency. Adequate amount of the DG power steps has been chosen. A new K_2 criterion has been used to determine DG power ranges. Criterion K_2 helps to evaluate DG power that can be connected to a specific bus of a power grid without any compensators. References 4, figures 2, tables 2.

Key words: renewable energy sources, distributed generation, Monte-Carlo method, optimization.

Надійшла 26.05.2015

Received 26.05.2015

УДК 621.311

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО МІСЦЯ ТА ПОТУЖНОСТІ ДЖЕРЕЛА РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

О.С. Губатюк, асп.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна
e-mail: oksanagubatuyk@i.ua

Розглянуто існуючі методи оптимізації пошуку місця та потужності джерела розподіленої генерації. Представлена модель пошуку потужності та місця встановлення джерела розподіленої генерації, яка складається з трьох етапів. На першому етапі на основі мінімізації втрат потужності в мережі визначається оптимальна потужність джерела. На другому етапі відбувається пошук вузла підключення джерела (з оптимальною величиною потужності) на основі аналізу сенсорності вузлів електричної мережі. На третьому – остаточне уточнення вузлів з джерелами розподіленої генерації шляхом мінімізації повних втрат для сенсорних вузлів. Бібл. 9.

Ключові слова: розподілена генерація, втрати потужності, оптимальне розміщення, сенсорність вузлів, рівень напруги.

Вступ. Необхідним етапом на шляху створення та розвитку *SMART Grid's* технологій в Україні для покращення показників якості електроенергії, надійності та розвитку електричних мереж є впровадження джерел розподіленої генерації (РГ). Децентралізація енергопостачання за допомогою РГ дасть змогу диверсифікувати джерела енергії.

Досвід розвинених країн показав, що при введенні РГ доводиться вирішувати специфічні для неї завдання. До них належать і задачі оптимального розміщення потужностей джерел РГ, ґрунтуючись не лише на кліматичних факторах, а і на режимних параметрах.