

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ МІСЦЬ ВСТАНОВЛЕННЯ ТА ВЕЛИЧИН ПОТУЖНОСТІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

Л.М. Лук'яненко, канд. техн. наук, І.С. Гончаренко, інж., О.В. Блонська, інж.

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Розглянуто дослідження та виконано розробку математичної моделі й методу для реалізації комплексного підходу розв'язання задачі оптимізації місць встановлення та величин потужності відновлюваних джерел енергії. Для розв'язання цієї задачі було розроблено систему обмежень та критеріїв оптимізації, на базі якої сформульовано відповідну цільову функцію. Розроблено підхід із застосуванням методу Монте-Карло. Наведено результати розрахунково-модельних випробувань. Бібл. 30, рисунок, табл. 3.

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

Вступ. За умов сьогодення у багатьох розвинених країнах світу постійне зростання попиту на електроенергію задовольняється завдяки підключенню до електричних мереж (ЕМ) розподіленої генерації (РГ) – джерел електричної енергії, з'єднаних безпосередньо з розподільною електричною мережею або підключених до неї з боку електроспоживачів [3].

Актуальність впровадження РГ обумовлена суттєвими економічними, екологічними та технічними перевагами цих установок над об'єктами «великої» енергетики. Насамперед, це значне зниження капітальних витрат на будівництво електростанцій, зменшення вартості електричної та теплової енергії за рахунок зниження втрат при передаванні, підвищення показників надійності та якості електропостачання [11, 14], врахування індивідуальних потреб споживачів та екологічно чисте виробництво електричної енергії (значна частина РГ – це генеруючі установки, що виробляють електричну енергію на базі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), наприклад, сонце- та вітроелектричні установки (СЕС та ВЕС), міні-гідроелектростанції (ГЕС) тощо) .

Але поряд з відомими перевагами, що привносять джерела РГ, в експлуатації ЕМ виникає і ціла низка проблем [3], вирішення яких в першу чергу пов'язано з вибором відповідних місць підключення джерел РГ до електричних мереж. Так, режимні параметри ЕМ можуть суттєво погіршуватись, якщо джерело РГ підключене у неоптимальному місці та/або неоптимальної потужності.

На перший погляд місця підключення джерел РГ, особливо тих, які жорстко залежать від таких первинних ресурсів, як вітер, сонце або гідроресурси, зумовлені наперед. Але якщо розібратися у такій проблемі трохи глибше, то виявиться, що це не зовсім так. Існує багато ситуацій, коли неврахування локальних особливостей підключення або стану електромереж у кращому випадку призведе до значного зростання втрат електроенергії, а в найгіршому буде заважати надійній експлуатації ЕМ. Останнє призведе до необхідності значних капітальних витрат на посилення ЕМ, що в свою чергу значно збільшить час окупності таких проєктів. При цьому, як правило, неподалік можна знайти інші ділянки, які є більш оптимальними для розміщення джерел РГ.

Тому багато розробників з різних країн займається вирішенням цієї проблеми [5, 16, 20, 21, 30], але незважаючи на величезну кількість досліджень і публікацій щодо оптимізації електричних мереж з РГ, створення математичних моделей РГ, проблема оптимального розміщення у розвинених країнах не є повністю вирішеною. З іншого боку, на теренах України, де стан електричних мереж погіршується з кожним роком, а системний оператор та власники розподільних електромереж намагаються «перекласти» розвиток ЕМ на плечі інвесторів, така проблема стає вкрай актуальною. Отже, розробка математичних моделей та методик для реалізації комплексного підходу розв'язання задачі оптимізації місць встановлення та величин потужності РГ є актуальною, оскільки робить поступове збільшення обсягів впрова-

дження РГ в ЕМ України ефективним та безпечним.

Аналіз світового досвіду розв'язання задачі пошуку місць встановлення та величин потужності відновлюваних джерел енергії. Для розв'язання задачі визначення оптимальних місць встановлення та величин потужності розподіленої генерації (ВМПРГ) використовуються різні методи оптимізації. Кожен з них має свої переваги та недоліки.

У роботах [7, 18, 20, 23] застосовуються безітераційні аналітичні методи. Суть їх полягає у визначенні екстремуму цільової функції шляхом виконання математичних перетворень розрахункових формул, що характеризують параметри усталеного режиму через потужність генерації на кожній з шин ЕМ. Після виконання таких перетворень можна отримати результуючу «формулу» для визначення оптимальної потужності РГ для кожної шини ЕМ. Перевагою аналітичних методів є відсутність проблеми збіжності розв'язку, яка є характерною для ітераційних методів. Недоліками таких методів є складність формування розрахункових формул та прийняття ідеалістичних припущень для спрощення процесу перетворення розрахункових формул. Наприклад, застосування значно спрощеної формули врахування сумарних втрат потужності в ЕМ [20]. Такі припущення можуть призвести до хибного розв'язання задачі ВМПРГ при застосуванні аналітичних методів до реальних енергосистем (ЕС) [8].

Генетичні алгоритми (ГА) також досить широко застосовують для розв'язання такої задачі [15, 25-28]. Генетичні алгоритми є підвидом еволюційних алгоритмів. Вони використовуються для розв'язання задач оптимізації шляхом моделювання природного відбору, схрещування та мутацій, які відбуваються при розмноженні живих організмів, є ефективними для пошуку оптимальних розв'язків у багатокритеріальних задачах. Наприклад, у роботі [5] у хромосомі закодована інформація про параметри моделі: потужності та кількості блоків у певний період часу, що обирається з представленого ряду випадковим чином. Задана кількість хромосом визначає особину, яка описується функцією пристосованості. У процесі еволюції накопичується генетичний матеріал і алгоритм швидко концентрується в околі оптимального розв'язку. До переваг генетичних алгоритмів можна віднести надійність, можливість працювати з дискретними та неперервними величинами, знаходження розв'язку поставленої задачі, не розглядаючи усіх комбінацій множини рішень. Генетичні алгоритми на відміну від градієнтних методів слабочутливі до локальних екстремумів. До недоліків ГА можна віднести передчасну або надмірно довгу збіжність, не завжди високу точність [9].

У роботах [10, 12, 21, 22, 25] для пошуку оптимальних місць встановлення РГ було застосовано метод рою часток. Цей метод заснований на особливостях поведінки групи живих організмів, наприклад, зграйки риб чи птахів. Елементи «зграї» називаються частками. У кожен момент часу (на кожній ітерації) частки знаходяться в просторі рішень та мають деяке положення, швидкість, напрямок та вагу. Під час переміщення кожна частка змінює своє положення, швидкість та напрямок, керуючись певними правилами, аби знайти найкраще положення. До переваг такого методу можна віднести простоту реалізації та швидшу збіжність, ніж мають ГА. Однак використання методу рою часток можливе лише при розв'язанні задач безумовної оптимізації [9].

Набули поширення також гібридні методи, що поєднують декілька підходів [8, 16, 25], наприклад, поєднання ГА та методу рою часток. Гібридні методи зазвичай є більш надійними та дають більш точні результати, проте вони потребують дуже великого обсягу обчислень [9].

Для розв'язання задачі ВМПРГ деякі дослідники застосовують метод послідовного перебору варіантів [19]. При цьому здійснюється перебір усіх можливих варіантів розміщення та потужності РГ в ЕМ. Поширення цього методу обмежено через величезну кількість обчислень, які необхідно здійснити. Певним розширенням методу повного перебору усіх можливих варіантів є використання індексів чутливості. При застосуванні методу чутливості [20] здійснюється перебір лише частини можливих варіантів. У цьому методі для кожної шини ЕМ, де теоретично можливе встановлення РГ, визначається індекс чутливості, який є значенням похідної від функції втрат потужності до згенерованої потужності РГ у вузлі ЕМ. На основі індексів чутливості вибирається шина з найбільшим значенням чутливості, до якої

підключається РГ. Так, шляхом перебору варіантів визначається оптимальне значення потужності РГ. Простір можливих рішень при такому підході є значно меншим, а отже, і час, необхідний для виконання розрахунків, також значно зменшується. Проте за один етап роботи методу визначаються оптимальне місце встановлення та величина потужності лише для одного джерела РГ. За кілька етапів вказаний метод розв'язання задачі ВМПРГ може дати результат, який відповідатиме лише певному локальному мінімуму. Також цей метод не дає змоги враховувати певні обмеження в електричних мережах.

Ще одним із методів, що застосовується для розв'язання задачі ВМПРГ, є метод статистичних випробувань Монте-Карло [13]. Суть його [6] полягає в тому, що створюється модель досліджуваного об'єкта та здійснюються спостереження за процесами, які відбуваються в моделі. Процеси, які відбуваються в об'єкті, моделюються шляхом багаторазових випробувань їх випадкових реалізацій відповідно до заданого закону розподілу випадкових величин. Перевагою методу є простий алгоритм його реалізації, можливість врахувати будь-які обмеження, нечутливість до локальних екстремумів, відсутність проблеми збіжності. Проте точність методу Монте-Карло прямо пропорційно залежить від кількості виконаних обчислень, а ефективність – від адекватності ЦФ, що використовується.

Враховуючи переваги та недоліки розглянутих вище методів, у роботі для розв'язання задачі ВМПРГ було запропоновано використати метод Монте-Карло як надійний та простий у реалізації метод, що дає змогу врахувати будь-які обмеження та отримати адекватні результати.

Для визначення оптимального розв'язку в задачі ВМПРГ необхідно особливу увагу приділяти формуванню переліку критеріїв та обмежень. Умовно критерії та обмеження можна розділити на технічні та економічні.

У розглянутих публікаціях найчастіше до технічних критеріїв та обмежень відносять: сумарні втрати потужності в мережі [7, 8, 16, 18, 19, 22-27, 29, 30] та сумарну потужність самих джерел РГ [8, 15, 16, 22, 25, 26, 29], допустимі струми чи потужності в елементах мережі [5, 12, 15, 17, 22, 24-27, 29], допустимі відхилення напруги у вузлах мережі [4, 12, 15, 18, 22, 24-29], видачу потужності у зовнішню мережу [5], загальну кількість та тип джерел РГ, підключених до мережі [5, 16, 25], кількість та потужність резервних блоків [5].

Як правило, вплив джерел РГ на втрати потужності в ЕМ та рівні напруги є основними критеріями, які враховуються майже в усіх роботах, пов'язаних з впровадженням РГ в ЕМ. Встановлення джерел РГ у розподільній ЕМ неподалік від навантаження може змінювати напрямок перетоків потужності [21], що в свою чергу впливатиме на сумарні втрати потужності в мережі. З іншого боку, в розподільних ЕМ зниження напруги відбувається вздовж напрямку електропостачання споживачів, але при встановленні РГ напруги вздовж ЛЕП може збільшуватися завдяки зміні напрямків потоків потужності та при зниженні навантаження живильного фідера. Встановлення РГ також значно впливає і на коливання напруги [3].

Економічні критерії та обмеження – це інвестиції у розвиток мережі та покриття втрат активної потужності [15], прибуток від встановлення та експлуатації РГ [17], приведені затрати на встановлення та експлуатацію комплексів РГ [5, 20].

Не можна розв'язувати задачу ВМПРГ, враховуючи лише один вид критеріїв та обмежень, оскільки отримане рішення буде оптимальним лише технічно чи економічно. Наприклад, з технічної точки зору найефективнішим вирішенням цієї задачі буде розміщення джерел РГ у кожному пункті ЕМ з величиною потужності, що дорівнює потужності споживання у відповідних пунктах ЕМ. Проте таке рішення навряд чи можливо втілити у практичному розумінні. Воно не буде найефективнішим з економічної точки зору.

Технічні та економічні критерії й обмеження впливають на надійність, якість та безпеку електропостачання, тому необхідно обрати такі критерії й обмеження, які б адекватно характеризували оптимальність рішення зі встановлення джерел РГ в ЕМ як для власників електричних мереж, так і для інвесторів у розвиток ЕМ.

Запропонований набір критеріїв та обмежень (табл. 1) враховує необхідну кількість різноманітних технічних та економічних показників для адекватного оцінювання впливу мі-

сця розміщення та потужності джерела РГ на ЕМ.

Постановка задачі та формування відповідної цільової функції. Задача визначення оптимальних місць встановлення та величин потужності джерел РГ є однією з першочергових, що мають бути враховані на етапі проектування ЕМ. Коректно вибрана точка підключення РГ до мережі та потужність агрегату можуть покращити роботу мережі та забезпечити додаткові економічні переваги як для споживачів, так і для постачальників електричної енергії [1, 2]. Ця задача є багатокритеріальною, оптимізаційною. В сучасних умовах вона ще більше ускладнюється, оскільки існує необхідність врахування не лише економічних інтересів постачальників та споживачів електричної енергії, а й можливих проблем на рівні системного оператора, які можуть виникнути через встановлення значних потужностей РГ. Як наслідок, виникає доцільність врахування наявності запасу пропускної спроможності ліній, якості електричної енергії тощо.

У табл. 1 наведено набір технічних та економічних критеріїв і обмежень, за якими можна оцінити місця встановлення і потужності РГ, а також визначити вплив встановлених джерел РГ на режимні параметри ЕМ.

На основі набору критеріїв та обмежень – характеристики впливу місця встановлення та величини потужності РГ на режимні параметри ЕМ, наведеного в табл. 1, було сформовано цільову функцію $W^{(i)}$, яка в загальному випадку має вигляд

$$W^{(i)} = (C_1^{(i)} + C_2^{(i)}) \cdot D^{(i)}, \quad (1)$$

де (i) – i -й варіант розв'язання задачі ВМПРГ, який складається з n -ї кількості одиничних джерел РГ відповідного типу та величини потужності, розміщених у певних місцях; $C_1^{(i)}$ – технічна складова ЦФ, яка характеризує зменшення втрат електроенергії в мережі в результаті застосування i -го варіанту мережі (протягом певного розрахункового періоду, наприклад, протягом року); $C_2^{(i)}$ – економічна складова ЦФ, яка характеризує вартість встановлення i -го варіанту РГ і визначається як

$$C_2^{(i)} = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J A_{PG}^{nj(i)} \cdot T^{nj(i)}}{\sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J (c_{PG}^{nj(i)} \cdot P_{PG}^{nj(i)} \cdot k_{np}^{nj(i)})} \cdot \Delta A_{kc}^i, \quad (2)$$

де N – загальна кількість вузлів мережі, в яких можливе встановлення джерела РГ; J – загальна кількість типів джерел РГ; $A_{PG}^{nj(i)}$ – електроенергія, вироблена джерелом РГ типу j , встановленим у вузлі n (протягом заданого розрахункового періоду); $T^{nj(i)}$ – тариф на електроенергію, вироблену джерелом РГ типу j , встановленим у вузлі n ; $c_{PG}^{nj(i)}$ – питома вартість джерела РГ типу j , встановленого у вузлі n , що залежить, наприклад, від конструктивних особливостей, фірми-виробника електротехнічного обладнання, одиничної потужності агрегату тощо; $P_{PG}^{nj(i)}$ – встановлена потужність джерела РГ типу j , встановленого у вузлі n ; $k_{np}^{nj(i)}$ – коефіцієнт підключення, який характеризує вартість підключення до ЕМ джерел РГ типу j , встановлених у вузлі n . Вказаний коефіцієнт залежить, як правило, від величини встановленої потужності джерела РГ, класу напруги, на якій виконується підключення джерела РГ; ΔA_{kc}^i – відображає зменшення втрат електроенергії у власній мережі, тобто втрат, що виникають між джерелом РГ та точкою балансової належності (недоотриманий дохід). Останній критерій дає змогу оцінити «ефективність» схеми видачі потужності РГ.

Таблиця 1

Критерії оптимізації		
Назва	Характеристика	
Технічні критерії	Втрати електроенергії в зовнішній ЕМ (після точки балансової належності)	Джерела РГ безпосередньо впливають на втрати електроенергії ЕМ, до якої вони приєднані. Цей критерій характеризує ефективність встановлення РГ з точки зору оператора розподільних мереж
	Втрати електроенергії у власній ЕМ електростанції з РГ (до точки балансової належності)	Втрати електроенергії у власній ЕМ у деяких випадках можуть бути досить значними, що в свою чергу збільшує термін окупності певного проекту. Цей критерій характеризує ефективність системи збору потужності електростанції з РГ з точки зору інвестора
	Тип джерела РГ	Різні типи джерел РГ мають різні робочі характеристики. Наприклад, сонячні електростанції вночі не працюють, на той час як вдень потужність таких станцій змінюється в певних діапазонах, межі яких залежать від хмарності, положення Сонця тощо; вітроелектричні станції генерують потужність у будь-який час доби, проте вихідна потужність такої станції коливається в широких межах – від нуля під час штилю до встановленої при високих швидкостях вітру. Окрім цього різні типи генераторних установок мають різне регулювання реактивної потужності, різну вартість згенерованої електроенергії. Цей критерій характеризує роботу РГ у складі ЕМ
Економічні критерії	Вартість встановлення та підключення електростанції з РГ до ЕМ	Врахування тільки технічної складової недостатньо, оскільки при цьому можна отримати економічно неоптимальний розв'язок. Економічні критерії характеризують вартість встановлення різних типів джерел РГ, вартість їх підключення до електричних мереж різних класів напруг, зміну вартості електроенергії в мережі
Обмеження		
Назва	Характеристика	
Відхилення напруги у вузлах ЕМ	Режимні параметри ЕМ, до якої приєднані джерела РГ, не мають виходити за допустимі межі. Наприклад, значення напруги на СШ має знаходитися в діапазоні $0,9...1,1U_{ном}$; завантаження елементів має бути $\leq 100\%$	
Завантаження елементів ЕМ		
Додаткові параметри		
Назва	Характеристика	
Тип джерел РГ	Врахування типів джерел РГ, які можуть бути застосовані при розв'язанні задачі (наприклад, СЕС, ВЕС, ПГУ тощо)	
Максимальна та мінімальна потужності	Діапазони, в яких може коливатися встановлена потужність кожного окремого та/або всіх джерел РГ разом	
Крок пошуку значення оптимальної потужності	Крок, за яким змінюється значення потужності РГ, безпосередньо впливає на кількість можливих розв'язків. Недоцільно визначати значення оптимальної потужності з точністю, наприклад, 0,5 кВт, це збільшує кількість можливих схожих варіантів розв'язку задачі, а втілення такого розв'язку навряд чи буде технічно можливим. Найбільш доцільним є встановлення значення кроку потужності, яке є порівнюваним із потужністю агрегатів РГ	

Штрафна функція $D^{(i)}$, яка дає змогу врахувати порушення режимних обмежень, наприклад, вихід рівнів напруги у вузлах мережі за допустимі діапазони або перевантаження елементів електромережі (ліній, трансформаторів тощо) за потужністю в i -му варіанті, має такий вигляд:

$$D^{(i)} = \nu U^{(i)} \cdot \nu I^{(i)}, \quad (3)$$

де $vU^{(i)}$, $vI^{(i)}$ – змінні, що характеризують порушення заданих робочих діапазонів за напругою у вузлах мережі та переобтяження ланок електромережі (ліній, трансформаторів тощо) за струмом. Врахування обмежень виконується на базі найгіршого переобтяження або падіння напруги в ЕМ. Зміну параметрів режиму роботи ЕМ (струми в гілках та напруги у вузлах) запропоновано розділити на три діапазони (табл. 2).

До I діапазону відносяться розв'язки, режимні параметри яких знаходяться в заданих межах; до II діапазону – розв'язки, в яких відмічаються некритичні (мається на увазі, що для цих варіантів розв'язання задачі ВМПРГ немає необхідності у застосуванні додаткового компенсувального обладнання) порушення заданих обмежень режимних параметрів; до III діапазону – розв'язки, в яких відмічаються недопустимі порушення заданих обмежень режимних параметрів. Можливі значення коефіцієнтів штрафної функції $D^{(i)}$ наведені в табл. 2.

Таблиця 2

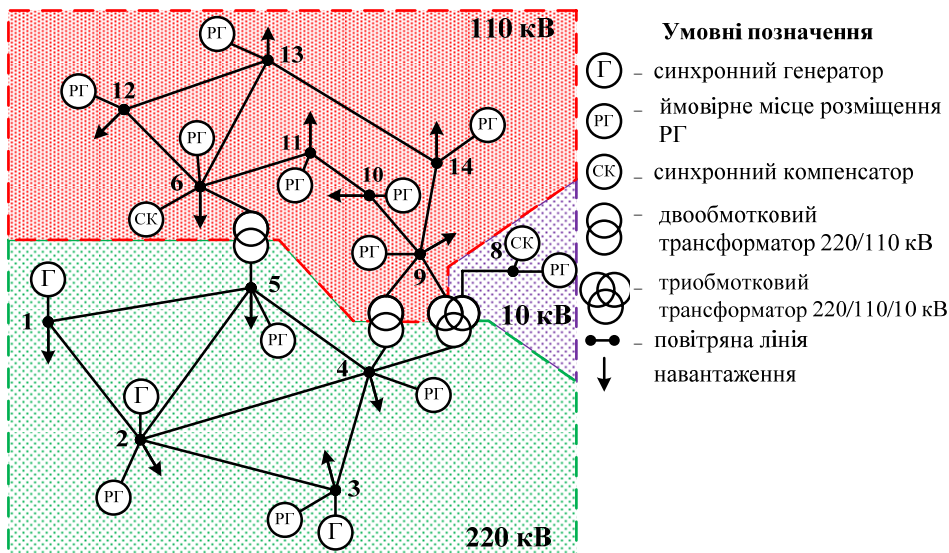
Діапазон	Відхилення напруги ΔU , в. о.	Межа завантаження I_{max} , в. о.	Значення коефіцієнтів vU, vI , в. о.	Назва режиму
I	$\pm \leq 0,1$	$\leq 1,1$	1,0	Нормальний
II	$\pm 0,1 \dots 0,2$	1,1...1,5	0,9	Некритичний
III	$\pm > 0,3$	$> 1,5$	0,1	Недопустимий

Таким чином, сформована цільова функція дає змогу однозначно оцінити вплив розподільної генерації, що планується встановити в ЕМ, з врахуванням різних техніко-економічних характеристик. Чим більше значення цільової функції, тим кращим є відповідний варіант розміщення джерела розподіленої генерації певної потужності й типу в ЕМ.

Результати розрахунково-модельних випробувань. Розрахунки виконувалися на відомій тестовій 14-шинній схемі Інституту інженерів з електротехніки та електроніки (ІЕЕЕ) (рисунок).

До основного складу схеми ІЕЕЕ 14 (рисунок) входять синхронні генератори та компенсатори, дво- та триобмотковий трансформатори з номінальними напругами обмоток 220/110 та 220/110/10 кВ відповідно, повітряні лінії напругою 220 та 110 кВ. Встановлена потужність навантаження складає 544,3 МВт. Одним із прийнятих допущень є те, що РГ можуть бути підключені до будь-якого з вузлів ЕМ, окрім вузла «1», оскільки він є балансуєчим за активною потужністю. При розв'язанні задачі ВМПРГ враховувалося, що підключення джерел РГ до ЕМ можливе на напругах 10, 110 та 220 кВ.

Відповідно до методу Монте-Карло виконувалося генерування великої кількості випадкових дослідів (у даному випадку 10 000). Кожен окремий дослід характеризується різною кількістю джерел РГ (як приклад, у табл. 3 наведено від 1 до 6). Кожне встановлене джерело РГ характеризується певною випадковою потужністю (наприклад, від 0 до 50 МВт) та



випадковим типом джерел РГ (СЕС, ВЕС, ГЕС тощо). Для кожного стану ЕС було розраховано ustalений режим та значення цільової функції, сформованої вище. В табл. 3 наведено 12 найкращих варіантів інтеграції джерел РГ у тестову електричну мережу в порядку спадання значень цільової функції з розподілом за

кількістю РГ. Тобто в таблиці наведено по два найкращі варіанти для випадків інтеграції одного РГ, двох і т.д.

Таблиця 3

№ вар.	Потужність, МВт	№ вузла ЕМ											Кількість джерел РГ	Сумарна потужність РГ, МВт	Зменшення втрат електроенергії в ЕМ, %	Значення ЦФ	
		2	3	4	5	6	8	9	10	11	12	13					14
1	Потужність, МВт	-	-	-	-	50	-	50	50	40	-	30	20	6	240	78,86%	1,614
2		-	-	-	-	-	-	50	50	40	30	40	20		230	78,75%	1,612
3		-	-	-	-	-	-	50	50	40	-	50	20	5	210	75,59%	1,480
4		-	-	-	-	-	-	50	50	30	-	50	30		210	75,51%	1,477
5		-	-	-	-	-	-	50	50	50	-	50	-	4	200	71,58%	1,355
6		-	-	-	-	-	-	50	40	50	-	50	-		190	71,20%	1,350
7		-	-	-	-	-	-	-	50	50	-	50	-	3	150	62,35%	1,202
8		-	-	-	-	-	-	50	50	-	-	50	-		150	62,07%	1,198
9		-	-	-	-	-	-	-	50	-	-	50	-	2	100	48,86%	1,112
10		-	-	-	-	-	-	-	50	-	-	40	-		90	45,92%	1,103
11		-	-	-	-	-	-	-	40	-	-	-	-	1	40	22,38%	1,0645
12		-	-	-	-	-	-	-	30	-	-	-	-		30	17,64%	1,0644

На основі наведених вище результатів можна стверджувати, що незважаючи на існування різних варіантів інтеграції джерел РГ в ЕМ, можна виділити певні закономірності. Так, при збільшенні кількості точок інтеграції джерел РГ в ЕМ прослідковується певна спадковість, зокрема, СШ-10 фігурує у всіх варіантах, СШ-13 – у кожному, починаючи з двох точок інтеграції джерел РГ, а СШ-9 – у кожному, починаючи з трьох точок. Тобто однозначно можна стверджувати, що якщо необхідно встановити одне джерело РГ, то це будуть СШ-10, якщо два джерела РГ – то СШ-10 і СШ 13, якщо три – то СШ-10, СШ-13, СШ-9 і т.д.

При збільшенні кількості точок встановлення джерел РГ кількість екстремумів цієї задачі стрімко зростає і єдиний розв'язок задачі отримати неможливо. Але якщо розглянути шість точок встановлення джерел РГ (табл. 3), то можна побачити, що перші такі п'ять шин СШ-10, СШ-13, СШ-11, СШ-9, СШ-14, як і у попередніх варіантах, а варіації з'являються лише стосовно останньої шини: це або СШ-12, або СШ 6.

Аналіз отриманих результатів також продемонстрував наступне: якщо розглядати цю задачу лише з точки зменшення втрат електроенергії в мережі, то можна обмежитись двома РГ на СШ-10 та СШ-13, як зазначено в табл. 3.

Висновки. Впровадження джерел РГ в електромережах обумовлено суттєвими перевагами цих установок над об'єктами «великої» енергетики. Але поряд з багатьма перевагами виникає ціла низка проблем, значну частину яких можна вирішити, якщо виконати оптимальне розміщення джерел РГ в електричних мережах.

Для розв'язання задачі визначення місць встановлення та величин потужності джерел РГ було запропоновано застосувати метод Монте-Карло в поєднанні з багатокритеріальною постановкою задачі, запропоновано також відповідну цільову функцію, яка відображає місце встановлення, тип та величину потужності РГ, а також вплив встановлених джерел РГ на режимні параметри ЕМ.

За результатами статистичного моделювання з використанням запропонованого підходу можна зробити висновок щодо місць розміщення та оптимальної потужності джерел РГ, яку доцільно встановлювати в мережі.

1. *Ерошенко С.А., Дмитриев С.А., Кузнецов Д.В., Кокин С.Е., Паздерин А.В.* Вопросы размещения источников распределенной генерации в электрических сетях мегаполисов // Вестн. Самарского гос. техн. ун-та. Сер.: Технические науки. – 2011. – № 4. – С. 126–134.
2. *Ерошенко С.А., Карпенко А.А., Паздерин А.В.* Выбор оптимальной мощности и местоположения источ-

- ника распределенной генерации в сети // Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды Всероссийской науч.-техн. конф.: Сб. статей. В 2 т. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – Т.1. – С.170–175.
3. *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.
 4. *Рахманов Н.Р., Каримов О.З., Зейналов А.Д., Ахмедова С.Т.* Оптимизация размещения установок распределённой генерации в энергосистеме // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2010. – № 3. – С. 27–30.
 5. *Тарасенко В.В.* Генетический алгоритм выбора распределённой генерации // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2010. – Вып. 13. – №14(190). – С. 15–19.
 6. *Электрические системы.* Т. 1. Математические задачи электроэнергетики / Под ред. В.А. Веникова: Учебн. пособие для электроэнерг. вузов. – М.: Высш. шк., 1970. – 336 с.
 7. *Acharya N., Mahat P., Mithulananthan N.* An analytical approach for DG allocation in primary distribution network // Electrical Power and Energy System. – 2006. – N 28. – P. 669–678.
 8. *Ahmed W., Sheta A. F.* Optimization of Electric Power Distribution Using Hybrid Simulated Annealing Approach // American Journal of Applied Sciences. – 2008. – N 5 (5). – P. 559–564.
 9. *Akorede M. F., Hizam H., Aris I., Ab Kadir M. Z. A.* A Review of Strategies for Optimal Placement of Distributed Generation in Power Distribution Systems // Research Journal of Applied Sciences. – 2010. – N 5 (2). – P. 137–145.
 10. *Aref A., Davoudi M, Seifi A., Ganjkhany I., id Davoudi M.* Particle Swarm Optimization Based Method for Optimal Placement and Estimation of DG Capacity in Distribution Networks // International Journal of Science and Technology. – 2012. – Vol. 2. – N 7. – P. 486–491.
 11. *Dolezal J., Sautarius P., Tlustý J.* The effect of dispersed generation on power quality in distribution system // Quality and Security of Electric Power Delivery Systems. CIGRE/IEEE PES International Symposium. – 2003. – P. 204–207.
 12. *El-Zonkoly A.M.* Optimal Placement of Multi DG Units Including Different Load Models Using PSO // Smart Grid and Renewable Energy. – 2010. – N 1. – P. 160–171.
 13. *El-Khattam W., Hegazy Y.G., Salama M.M. A.* Investigating Distributed Generation Systems Performance Using Monte Carlo Simulation // IEEE Transactions on Power Systems. – 2000. – Vol. 21. – N 2. – P. 524–532.
 14. *Esposito G., Golovanov N., Lazaroiu C., Zaninelli D.* Impact of Embedded Generation on the Voltage Quality of Distribution Networks // Electrical Power Quality and Utilization, EPQU. – 2007. – Vol. 3.
 15. *Gandomkar M.* Application of Genetic Algorithm to Distribution Network Expansion Planning with Distributed Generation // Proceedings of the 8th WSEAS International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines. – 2008. – P. 15–20.
 16. *Gandomkar M., Vakilian M., Ehsan M.* A combination of genetic algorithm and simulated annealing for optimal DG allocation in distribution networks // Proceedings of the IEEE Electrical and Computer Engineering, Canadian Conference. – 2005. – Vol. 1-4. – P. 645–648.
 17. *Gautam D., Mithulananthan N.* Optimal DG placement in deregulated electricity market // Electric Power Systems Research. – 2007. – N 77. – P. 1627–1636.
 18. *Gözel T., Hocaoglu M.H.* An analytical method for the sizing and siting of distributed generators in radial systems // Electric Power Systems Research. – 2009. – N 79. – P. 912–918.
 19. *Griffin T., Tomsovic K., Secrest D., Law A.* Placement of Dispersed Generations Systems for Reduced Losses // Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences. – 2000. – Vol. 4.
 20. *Kamel R. M., Kermanshahi B.* Optimal size and location of distributed generations for minimizing power losses in a primary distribution network // Computer Science & Engineering and Electrical Engineering. – 2009. – Vol. 16. – N 2. – P. 137–144.
 21. *Knyazkin V., Ackermann T.* Interaction Between the Distributed Generation and the Distribution Network: Operation, Control and Stability Aspects // 17th International Conference on Electricity Distribution. – 2003. – Session 4. – Paper No. 40.
 22. *Krueasuk W., Ongsakul W.* Optimal Placement of Distributed Generation Using Particle Swarm Optimization // Australian Universities Power Engineering Conference. – 2006.
 23. *Mahat P., Ongsakul W., Mithulananthan N.* Optimal Placement of Wind Turbine DG in Primary Distribution Systems for Real Loss Reduction // Proceedings of Energy for Sustainable Development: Prospects and Issues for Asia. – 2006.
 24. *Padma Lalitha M., Veera Reddy V. C., Usha V., Sivarami Reddy N.* Application of fuzzy and PSO for DG placement for minimum loss in radial distribution system // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2010. – Vol. 5. – N 4. – P. 30–37.
 25. *Safari A., Jahani R., Shayanfar H. A., Olamaei J.* Optimal DG Allocation in Distribution Network // International Journal of Electrical and Electronics Engineering. – 2010. – Vol. 8. – N 4. – P. 550–553.
 26. *Shukla T. N., Singh S.P., Naik K. B.* Allocation of optimal distributed generation using GA for minimum system losses in radial distribution networks // International Journal of Engineering, Science and Technology. – 2010. – Vol. 2. – N 3. – P. 94–106.
 27. *Singh Deependra, Singh Devender, Verma K.S.* GA based Optimal Sizing & Placement of Distributed Generation for Loss Minimization // Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology. –

2007. – Vol. 26. – P. 381–387.
28. Singh R.K, Goswami S.K. A genetic algorithm based approach for optimal allocation of distributed generations in power systems for voltage sensitive loads // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2009. – Vol. 4. – N 2. – P. 78–87.
 29. Subrahmanyam J.B.V., Radhakrishna C. Distributed Generator Placement and Sizing in Unbalanced Radial Distribution System // International Journal of Electrical Power and Energy Systems Engineering. – 2009. – Vol. 4. – N 2. – P. 232–239.
 30. Viswanadh M.M.G., Sekhar A.S. R. Minimization of power loss and improvement of voltage profile by optimal placement of wind generator in distribution network // International Journal of Engineering Research and Applications. – 2012. – Vol. 2, Issue 6. – P. 987–993.

УДК 621.311

Л.Н. Лукьяненко, канд. техн. наук, **И.С. Гончаренко**, інж., **О.В. Блонская**, інж.

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

Определение оптимальных мест установки и величин мощности возобновляемых источников энергии

Рассмотрено исследование и выполнены разработки математической модели и метода для реализации комплексного подхода к решению задачи оптимизации мест установки и величин мощности возобновляемых источников энергии. Для решения этой задачи разработана система ограничений и критериев оптимизации, на базе которой была сформирована целевая функция. Разработан подход с применением метода Монте-Карло. Приведены результаты расчетно-модельных испытаний. Библи. 30, рисунок, табл. 3.

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

L.M. Lukianenko, I.S. Goncharenko, O.V. Blonska

Institute of Electrodynamics of National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Determination of the optimal placement and capacity of renewable energy sources

The purpose of the paper was research and development of a mathematical model and method for the implementation of an integrated approach to the renewable energy sources (RES) allocation and capacity optimization problem. To solve the above problem a system of restrictions and optimization criteria has been developed on which the target function was based. An approach using Monte-Carlo method was proposed. The results of the computational model tests are shown. References 9, figure, tables 3.

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

Надійшла 18.11.2013

Received 18.11.2013