

УДК 621.311

ОСОБЛИВОСТІ СТОХАСТИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ГІБРИДНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ НА БАЗІ ВДЕ

М.П. Кузнєцов¹, доктор технічних наук, О.В. Лисенко², кандидат технічних наук, О.А. Мельник³, аспірант.

¹Інститут відновлюваної енергетики НАН України

02094 м. Київ, вул. Гната Хоткевича, 20А.

²Таврійський державний агротехнологічний університет

72310 м. Мелітополь, пр-т Богдана Хмельницького, 18.

³Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»

03056 м. Київ, пр-т Перемоги 37.

Оптимальне поєднання різних типів відновлюваної енергії, особливо вітрової та сонячної, має враховувати змінну природу енергоносія та випадковий характер поточної потужності. Отже, задачі оптимізації мають базуватися на стохастичних підходах. Запропоновано різні варіанти критеріїв та методів оптимізації, їх вибір залежить від постановки задачі. Бібл. 8.

Ключові слова: відновлювана енергія, критерії адекватності енергосистеми, стохастична оптимізація.

FEATURES OF STOCHASTIC OPTIMIZATION FOR HYBRID POWER SYSTEMS WITH THE RENEWABLE SOURCES

М. Kuznietsov¹, doctor of technical science, О. Lysenko², candidate of technical science, А. Melnyk³, graduate student.

¹Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine

02094, 20A Hnata Khotkevycha Street, Kyiv, Ukraine.

²Tavria State Agrotechnological University

72310, 18 Bohdana Khmelnytskoho Steet, Melitopol, Ukraine.

³National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

03056, 37 Peremohy Avenue, Kyiv, Ukraine.

The optimal combination of different types of renewable energy, especially wind and solar, should take into account the variable nature of the energy source and the random nature of the current power. Hence, optimization tasks should be based on stochastic approaches. Different variants of criteria and methods of optimization are offered, their choice depends on the statement of the task. References 8.

Keywords: renewable energy, power system, criteria of the adequacy, stochastic optimization.



М.П. Кузнєцов
M. Kuznietsov

Відомості про автора: заступник директора Інституту відновлюваної енергетики НАН України, старший науковий співробітник, доктор технічних наук.

Освіта: Київський державний університет ім. Шевченка, механіко-математичний факультет.

Наукова діяльність: математика, відновлювана енергетика.

Публікації: понад 60, в тому числі 3 монографії.

ORCID: 0000-0002-0497-7439

Контакти:

тел. /факс +38 (044) 206-28-09

e-mail: renewable@ukr.net

Author information: deputy director of the Institute of Renewable Energy at the NASU, doctor of technical sciences.

Education: Shevchenko Kyiv State University, Mechanics and Mathematics.

Research area: mathematics, renewable energy.

Publications: over 60, including 3 monographs.

ORCID: 0000-0002-0497-7439

Contacts: phone /fax +38 (044) 206-28-09

e-mail: renewable@ukr.net



О.В. Лисенко
O. Lysenko

Відомості про автора: доцент кафедри енергетики та автоматизації Таврійського державного агротехнологічного університету, доцент, кандидат технічних наук.

Освіта: Таврійська державна агротехнічна академія, енергетичний факультет.

Наукова діяльність: електропостачання, відновлювана енергетика.

Публікації: понад 40, в тому числі 4 патенти.

ORCID: 0000-0001-7085-7796

Контакти: тел. +38 (061) 942-06-18

факс +38 (061) 942-24-11

e-mail: office@tsatu.edu.ua

Author information: associate professor, Department of Energy and Automation Tavrta State Agrotechnological University, associate professor, candidate of technical sciences.

Education: Tavria State Agrotechnical Academy, Energy.

Research area: power supply, renewable energy.

Publications: over 40, including 4 patents.

ORCID: 0000-0001-7085-7796

Contacts: phone +38 (061) 942-06-18

fax +38 (061) 942-24-11

e-mail: office@tsatu.edu.ua



О.А. Мельник
O. Melnyk

Відомості про автора: аспірант, інженер-дослідник.

Освіта: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І.Сікорського», факультет електроенерготехніки та автоматики

Область наукових інтересів: електроенерготехніка, відновлювана енергетика.

Публікації: 4.

ORCID: 0000-0003-2894-3476

Контакти:

тел. /факс +38 (044) 236-21-49

e-mail: aspirantura@kpi.ua

Education: National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Faculty of Electric Power Engineering and Automatics.

Main research interests: electric power engineering, renewable energy.

Publications: 4.

ORCID: 0000-0003-2894-3476

Contacts:

phone /fax +38 (044) 236-21-49

e-mail: aspirantura@kpi.ua

Перелік використаних позначень та скорочень:

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;
ВЕС – вітрова електростанція;
КЕС – комбінована енергетична система;
СЕС – сонячна електростанція;
 $D(x)$ – дисперсія випадкової величини x ;

$M(x)$ – математичне сподівання;
 $P(x)$ – імовірність;
 P_W – потужність вітрової електростанції;
 P_{PV} – потужність сонячної електростанції;
 P_{Ak} – потужність акумуляторної батареї.

Вступ. Згідно з «Енергетичною стратегією України на період до 2035 р.» розвиток енергетики на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) є дуже важливим напрямком. Передбачається збільшення частки ВДЕ (включно з гідрогенерацією) у загальній генерації електроенергії до більше ніж 25% в 2035 році [1]. Для України потреба в диверсифікації джерел енергії має особливу актуальність через залежність від імпорту енергоносіїв, зношеність традиційних енергоустановок, міжнародні зобов'язання та загострення екологічних проблем. Тому необхідно системно вирішувати проблеми інтеграції ВДЕ, щоб якомога ефективніше використовувати їхні можливості, уникнути зниження надійності режимів роботи електричних мереж та якості генерованої енергії, забезпечити оптимальність

конфігурації елементів ВДЕ та систем енергопостачання на їхній основі з урахуванням енергетичної, економічної та екологічної складових. Сучасні підходи до формування енергосистем носять переважно детермінований характер, проте наявність варіативних джерел енергії потребує стохастичного підходу до визначення критеріїв оптимальності та постановки задач оптимізації.

Основні типи гібридних енергосистем. Щоб досягти високих техніко-економічних показників у застосуванні ВДЕ, стабільних робочих параметрів енергетичного обладнання й стабільного енергопостачання споживачів, необхідно створювати комбіновані (інша назва – гібридні або комплексні) енергосистеми (КЕС), де буде вироблятися й акумулюватися електрична й теплова енергія у поєднанні ВДЕ з технологіями

традиційної енергетики. Елементи КЕС можуть працювати в паралельному, послі-довному або послідовно-паралельному режимах.

Оптимальне співвідношення окремих елементів у КЕС на основі ВДЕ визначається з урахуванням багатьох важливих факторів, а саме: рівня забезпечення регіону (району, міста тощо) традиційними і нетрадиційними джерелами енергії з урахуванням їхнього потенціалу; кліматичними (метеорологічними) умовами; структурою систем постачання і споживання енергії; вимогами до якості електричної і теплової енергії; вимогами до погодинного графіка енергопостачання; екологічними та економічними факторами.

Можливі варіанти комбінованих систем: повністю автономні чи сполучені із загальною енергосистемою, з накопиченням енергії чи без нього, з використанням лише відновлюваних джерел енергії чи у поєднанні з паливними генераторами (дизель, газова турбіна тощо).

Гібридні системи, що працюють на електромережу, можуть мати різні топології. Можуть бути приєднаними до спільної шини постійного струму та інтегруватися до мережі через інвертор, який діє як інтерфейс. Також ВДЕ можуть передавати енергію і безпосередньо до мережі через індивідуальні інвертори [2].

Ізольовані (автономні) системи також можуть бути поділені на дві основні топології – загальна шина постійного струму або загальна шина змінного струму. Змінний характер певних ВДЕ (сонячних і вітрових ресурсів, наприклад) може бути частково або повністю компенсований шляхом оптимальної інтеграції двох різних ресурсів в одну систему. Також можливим шляхом забезпечення надійності є, наприклад, використання допоміжного дизель-генератора. Важливою складовою є системи акумулювання енергії. У випадку автономної роботи кожне джерело енергії живить споживача напряму, в той час як акумулятор слугує для підтримки рівня напруги. Вартість зберігання енергії для автономних систем є серйозною економічною проблемою. Об'єднання сонячної і вітрової енергогенерації в гібридну КЕС може значно зменшити потребу в

акумулюючих потужностях і в результаті також зменшити й загальну вартість системи [2].

Підходи до оптимізації КЕС. Традиційний метод визначення показників роботи гібридних сонячних і вітряних систем засновано на наявності довгострокових даних про погоду, наприклад про сонячну радіацію і швидкість вітру. Але багаторічні дані не завжди доступні, тому застосовуються різні математичні моделі ймовірної поведінки енергосистеми. Оптимізація структури енергосистеми здійснюється за економічними показниками, такими як приведена вартість чи собівартість енергії, а також технічними, що враховують надійність енергопостачання.

Базовими показниками адекватності генерування стосовно рівня споживання вважаються певні параметри, або індекси, такі як очікувана втрата навантаження *LOLE* (loss of load expectation), імовірність утрати навантаження *LOLP* (loss of load probability), частота втрати навантаження *LOLF* (loss of load frequency) та тривалість втрати навантаження *LOLD* (loss of load duration), індекс очікуваної недоданої енергії *EENS* (expected energy not served) [3]. Обсяг недоданої енергії через невідповідність генерації визначається зокрема такими індексами, як очікувана втрата енергії *LOEE* (loss of energy expectation), чи імовірність втрати енергії *LOEP* (loss of energy probability) [4]. Ці індекси мають імовірнісний характер, в традиційних енергосистемах вони враховують мінливість споживання та нездатність генеруючої складової миттєво відреагувати на ці зміни. В гібридних системах на базі ВДЕ змінну природу має також генерування, тому роль імовірнісних показників зростає.

Для досягнення техніко-економічної оптимальності гібридних систем застосовують різні методи оптимізації – деякі на основі традиційних підходів, таких як цілочисельне і інтервальне лінійне програмування, проте зростає число евристичних підходів, особливо генетичних алгоритмів і групової оптимізації. Представлені в літературі методи зокрема містять [5]:

- лінійне цілочисельне програмування (Integer Programming);
- алгоритм пошуку шляхом ділення прямокутників (Dividing Rectangles Search);

- генетичні алгоритми і нечіткі генетичні алгоритми (Genetic and Fuzzy Genetic);
- метод групової оптимізації, або рою часток (Particle Swarm Optimization);
- модель нормалізації (Simulated Annealing);
- гібридизовані методи розв'язку (Hybridized Solutions);
- комерційне програмне забезпечення (Commercial Software) та інші.

Прикладом комерційного програмного забезпечення є програма гібридної оптимізації множини енергетичних ресурсів (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources – HOMER). Вона дозволяє виконувати аналіз чутливості оптимальної конфігурації до параметрів складових частин гібридної енергосистеми, робити порівняння між різними режимами роботи, розраховувати собівартість електроенергії та обсяг капітальних вкладень. Серед інших подібних програм можна згадати HYBRID 2, RETScreen, iNOGA, INSEL, TRNSYS, iGRHYSO, HYBRIDS, RAPSIM, SOMES, SOLSTOR, HySim, HybSim, IPSYS, HySys, Dymola /Modelica, ARES, SOLSIM, HYBRID DESIGNER. Для визначення оптимальних розмірів різних компонентів системи використовуються також різні числові методи [5]. Програми мають обмежений перелік критеріїв і орієнтуються на осереднені показники.

Методологія поверхні відгуку є сукупністю статистичних і математичних методів моделювання та аналізу задач, у яких використовується адекватна функціональна залежність між досліджуваним явищем і декількома незалежними вхідними змінними. Мета методу – оптимізувати реакцію (відгук) на дію цих змінних. Цю методологію можна застосувати для вибору оптимального розміру компонентів гібридної системи з відновлюваними джерелами енергії. Так, вихідною величиною поверхні відгуку гібридної системи може бути її вартість, а конструктивними параметрами – кількість фотоелементів, потужність вітроустановок та їхній тип, ємності акумуляторної батареї [3]. Такий підхід зручний у випадку імітаційного моделювання систем з ВДЕ, яке враховує стохастичну природу надходження і споживання енергії та потребує значної кількості реалізацій випадкового процесу.

Постановка задачі оптимізації. Вибір конкретного методу розв'язку часто залежить від постановки задачі оптимізації. Коректно поставлена екстремальна задача має містити функціонал $f : X \rightarrow \bar{R}$, визначений на деякій множині X (класі допустимих елементів), та обмеження – підмножину C , де $C \subseteq X$. Через \bar{R} звичайно позначають дійсну пряму. Точки $x \in C$ є допустимими за обмеженням. Задача вимагає пошуку екстремуму (верхньої чи нижньої грані) функціонала: $f(x) \rightarrow \inf(\sup)$ при дотриманні обмежень. Якщо $C=X$, то це задача без обмежень. Як правило, X – це нормований простір з топологією, або банахів простір (за такої умови формулюються класичні постановки задач оптимізації та методи їх розв'язку). Отже, довільна математична модель задачі складається з двох частин – цільової функції і обмежень:

$$f_0(x) \rightarrow \text{extr}(\max, \min),$$

$$\begin{aligned} f_i(x) &= 0; \quad f_j(x) \leq 0, \\ i &= 1, 2, \dots, k; \quad j = k+1, k+2, \dots \end{aligned}$$

де $f_0(x)$ – цільова функція (критерій оптимізації), вид якої залежить від умов даної задачі; x – випадкова величина з деякої області визначення та певним законом розподілу; умови для $f_n(x)$ – обмеження. До функцій можуть входити числові параметри, що відображають вплив факторів a_i різної природи: $f_n(x) = f_n(x, a_i)$. В загальному вигляді це задачі опуклого програмування. Рівності для $f_i(x)$ називають рівнянням стану: вони зазвичай описують функціональні зв'язки досліджуваних параметрів, або фізичні закони. У випадку комбінованої енергосистеми в якості рівнянь стану можуть бути використані енергетичні характеристики елементів системи (криві потужності, характеристика зарядки /розрядки акумуляторів тощо).

Як правило, в якості цільової функції оптимізації гібридної енергосистеми розглядають вартісну складову. Тоді цільова функція є сумою всіх чистих теперішніх вартостей, що включають капітальні витрати, вартість демонтажу, витрати на експлуатацію та технічне обслуговування. У

випадку наявності традиційних джерел, зокрема тих, які використовують паливо, до витрат відносять також екологічну складову, тобто вартість компенсації шкідливих викидів. Оскільки продуктивність генерування прямо пропорційна номінальній потужності, яка визначається кількістю окремих елементів (генеруючих модулів), то задача оптимізації в такій постановці є цілочисловою лінійною, де параметрами оптимізації є кількість модулів кожного типу. Тип модуля характеризується його енергетичною характеристикою, що відіграє роль рівняння стану, а обмеження у вигляді нерівностей стосуються загальних параметрів енергосистеми (пропускної здатності мереж, потреб споживача, можливостей розміщення, енергетичного потенціалу ВДЕ).

У разі заміни показників продуктивності їхнім математичним сподіванням, тобто переходу до осереднених значень швидкості вітру та рівня інсоляції, задача стає детермінованою і в переважній кількості досліджень саме так і вирішується. Слід однак зазначити, що для ВДЕ істотним є не лише середнє значення, а й дисперсія, враховуючи нелінійну енергетичну характеристику та обмеження щодо якості енергії. Тому додатковими критеріями оптимізації можуть слугувати такі показники як індекс втрати живлення, індекс втрати очікуваного навантаження, індекс втрати енергії та інші, які залежать від мінливої природи ВДЕ. Зазначені індекси адекватності можуть входити також до складу обмежень. Загалом ставиться задача пошуку мінімальної за вартістю конфігурації енергосистеми, що задовольняла б попит забезпечуючи належну якість енергії.

За наявності кількох критеріїв оптимізації постає питання про їхню узгодженість чи пріоритетність. Так, в роботі [6] цільові функції містять мінімізацію загальних витрат енергосистеми, шкідливих викидів, втрат енергії в розподільчій мережі і оптимізацію профілю напруги. У запропонованому алгоритмі було розглянуто сукупність не домінуючих рішень. Обмеження стосувалися напруги ($V_{\min} \leq V \leq V_{\max}$), загальної кількості об'єктів ВДЕ та їхньої частки в енергозабезпеченні. В багатокритеріальних задачах оптимізації Парето-оптимальним, або не доміную-

чим є рішення, яке не може бути поліпшене щодо однієї цільової функції без погіршення результату для інших функцій.

Задачі оптимізації в умовах невизначеності. Рівень споживання електроенергії в енергосистемі, як правило, носить випадковий (у певних межах) характер. Наявність вітрової та сонячної електростанцій, залежних від стану погоди, вносять додаткову невизначеність у роботу енергосистеми. Отже, оптимізація такої комбінованої енергосистеми має бути стохастичною. Однак інколи для оцінки роботи енергосистеми застосовують методи рекурсивного аналізу, використовуючи історичні дані про швидкість вітру, сонячну радіацію та характер споживання. В такій постановці задача оптимального підбору потужностей є цілком детермінованою, і зазвичай її розв'язання зводиться до методів лінійного програмування. Включення до моделей лише лінійних рівнянь гарантує існування абсолютного оптимуму. Використанням нелінійних моделей можна досягти відображення більш складних взаємозв'язків системи, проте абсолютний оптимум існуватиме лише за умови, що цільова функція та обмеження є випуклими.

Визначення множини умов, що характеризують модель, формування оптимізаційних задач, їхній розв'язок та знаходження зони невизначеності для отриманих рішень вимагають значних часових затрат. Так, нехай вирішується задача лінійного програмування в умовах інтервального задання параметрів лінійної форми: $a_i \in [a_i^{\min}, a_i^{\max}] \forall i, i \in [1, n]$. Для формування множини умов, які характеризують об'єкт (тобто набору можливих варіантів), необхідно врахувати 2^n лінійних форм, де n – розмірність вектора невідомих, тобто необхідно розв'язати 2^n задач лінійного програмування. Навіть при невеликому n число вирішуваних завдань буде значним. Тому актуальним в таких задачах є формування мінімального обсягу варіантів, що адекватно відображали б реальні умови. Для КЕС видається раціональним використання методу поверхні відгуку при покроковій зміні аргументів задачі. Розмір кроку визначатиметься вимогами до точності розв'язку.

Стохастичні задачі розрізняються за цільовими функціями, за характером обмежень і за видом рішення. Найчастіше виділяють три моделі прийняття рішень: *M*-задача (знаходження мінімального математичного очікування критерію оптимальності), *D*-задача (знаходження мінімальної дисперсії) і *P*-задача (знаходження максимальної ймовірності досягнення заданої величини критерію). Наведемо приклади цих критеріїв у простій формі.

M-задача: при заданому σ_x потрібно знайти таке x_c , яке забезпечує мінімальне математичне очікування f_c . Доцільно модифікувати цю задачу до задачі мінімізації значення функції виду $|f_c - f^*|$, де f^* – задане значення критерію. Ця задача найбільш близька до класичного вигляду оптимізаційних задач. Доцільна, наприклад, для умов забезпечення необхідної кількості енергії. При ігноруванні стохастичної природи змінної x задача зводиться до класичної.

D-задача: при заданому σ_x потрібно знайти таке x_c , яке забезпечує мінімальне значення σ_f . Перетворення задачі оптимізації в задачу модифікації можна виконати аналогічно перетворенню в *M*-задачі. Доцільна для мінімізації втрат енергії в локальній КЕС.

P-задача: при заданому σ_x потрібно знайти таке x_c , при якому ймовірність $P(f_{\min} \leq f(x) \leq f_{\max})$ досягає максимуму. Застосовується при забезпеченні якості енергії.

В якості цільової функції, крім згаданих, може бути використано деяку функцію від рішення (або саме рішення) – так звана *A*-модель. Математичний опис можна представити так:

$$f_0[x(\omega), \omega] = f^*[x(\omega), \omega],$$

де $f^*(\cdot)$ – задана реалізація випадкової функції $f_0(\cdot)$ при деяких значеннях усіх початкових параметрів.

Слід зазначити, що часто в задачах стохастичної оптимізації гібридних енергосистем необхідно спостерігати за змінами математичного очікування і дисперсії одночасно, не допускаючи перевищення ними заданих значень. Для вирішення цієї проблеми розглядаються моделі зі змішаними умовами (багатокритеріальні задачі).

У задачах стохастичного програмування КЕС важливим є вибір як виду цільової функції, так і виду обмежень. Цільова функція визначає ефективність функціонування і розвитку системи. Обмеження в стохастичних математичних моделях можуть також задаватися різними способами, а значить, отримані оптимальні плани будуть мати відповідний рівень ймовірності їх виконання. При цьому потрібно брати до уваги як внутрішню невизначеність (технологічні процеси перетворення енергії), так і невизначеність зовнішнього середовища (погодні умови, вимоги до експлуатації, економічні обставини тощо).

Нехай задано обмеження в загальному вигляді: $g(x, \omega) \leq 0$, де ω – деякі випадкові параметри з множини Ω . Неможливість, а іноді й недоцільність вимоги, щоб знайдене рішення задовольняло обмеження за будь-яких реалізацій випадкових параметрів ω , породжує таку ідею: накласти дещо менш жорсткі умови, зокрема допускати невиконання умов з певною ймовірністю. Наприклад: $P\{g(x, \omega) > 0\} \leq \gamma$ або $P\{g(x, \omega) \leq 0\} \geq 1 - \gamma$. Це значить, що ймовірність події $g(x, \omega) > 0$ не перевищує величину γ . Наприклад, якщо $\gamma = 0,05$, то обмеження у 95 випадках із 100 буде виконуватися, і тільки у п'яти випадках не буде виконуватися. Варіантом такої задачі є забезпечення нормативної частоти струму. Так, згідно з нормативними вимогами [7] частота має перебувати в межах $50 \pm 0,2$ Гц не менше 95% часу доби, тобто $P(49,8 \leq \omega \leq 50,2) \geq 0,95$, не виходячи за гранично допустимі межі $50 \pm 0,4$ Гц. Отже, тут є обмеження ймовірнісні і абсолютні. В свою чергу коливання частоти пов'язані з небалансом потужності, тому відповідні умови можуть бути перераховані в терміни потужності стосовно досліджуваної енергосистеми. Крім того, система обмежень задачі може бути змішаною, тобто частина обмежень може виконуватися в середньому, частина – в жорсткій постановці, а частина – з деякою ймовірністю.

Наведемо деякі приклади постановок задач стохастичного програмування, які можуть бути застосовані зокрема до енергосистем комбінованого типу.

Нехай $f(x, \omega)$ – функція, яка виражає ефективність плану для певних x та ω . Тоді задачу визначення оптимального плану x за випадкових параметрів ω можна сформулювати у таких варіантах

а) $\max M[f(x, \omega)]$ за умов:

$$P\{g(x, \omega) \leq 0\} \geq 1 - \gamma, \quad x \geq 0, \quad \omega \in \Omega;$$

б) $\max \xi$ за умов:

$$P\{f(x, \omega) \geq \xi, \quad g(x, \omega) \leq 0\} \geq 1 - \gamma, \\ x \geq 0, \quad \omega \in \Omega.$$

Отже, для задачі варіанту (а) необхідно максимізувати середню сподівану ефективність за умов, що обмеження виконуються з імовірністю $1 - \gamma$. За постановки задачі варіанту (б) крім цього вимагається, щоб значення функції ефективності було не менше величини ξ з імовірністю $1 - \gamma$, а також, щоб величина ξ була максимальною. Перевага варіанту (а) полягає у тому, що він простіший стосовно обчислення.

Очевидно, можливих постановок задач стохастичного програмування досить багато, і вибір певного їхнього виду для практичних задач залежить від конкретних умов, наявної інформації та мети дослідження [8]. Постановка задачі стохастичного програмування істотно залежить також від того, чи є можливість під час вибору (прийняття) рішень уточнювати стан середовища (економічних, технічних чи природних умов) на підставі певних спостережень.

Особливістю математичного моделювання енергосистеми на базі відновлюваних джерел важливим є врахування таких параметрів як максимальні, середні та мінімальні досяжні значення потужності, характер розподілу випадкових значень, тобто ймовірність певних режимів, а також імовірні темп та амплітуда коливань поточних значень в режимі реального часу.

Представимо баланс потужності в автономній КЕС у вигляді $P_A(t) = P_{Ren}(t) + P_{Ak}(t) - P_L(t)$, де $P_{Ren} = P_W + P_{PV}$ – генерована потужність вітру та сонця (ВЕС та СЕС), що мають випадкову природу, P_{Ak} – потужність (стан зарядки) акумуляторної батареї, P_L – потужність навантаження (споживання). Зазначені потужності є функціями часу. Критерій оптимізації, або цільова функція,

виходячи з най-більш уживаних вимог до комплексних енергосистем на базі ВДЕ, може мати такі формулювання.

1) Сумарна генерована енергія практично рівна спожитій, тобто мінімізується математичне очікування небалансу: $M(P_\Delta) \rightarrow \min$ або $M(P_\Delta) = 0$ (M -модель).

2) Небаланс потужності має бути якомога меншим: $D(P_\Delta) \rightarrow \min$ (D -модель).

3) Передбачено резервне джерело (наприклад, дизель-генератор чи міні-ГЕС) із заданим режимом роботи: $P_\Delta = f_D(t)$ (A -модель).

4) Обмеження за надлишком енергії, тобто за втратами генерування: $\min(\max P_\Delta)$, або

5) обмеження за дефіцитом енергії, тобто за втратами споживання: $\max(\min P_\Delta)$ (MM -модель).

б) Мінімізація вартості обладнання: $C_W P_W^0 + C_{PV} P_{PV}^0 + C_{Ak} P_{Ak}^0 \rightarrow \min$ (детермінований критерій),

де C_x – питома вартість, а P_x^0 – номінальна потужність відповідного обладнання.

Можливі й інші варіанти постановки задачі, залежно від мети та умов роботи КЕС.

Фізичні обмеження у вигляді рівнянь стану мають вигляд енергетичних характеристик для відповідних джерел, і є детермінованими функціями випадкових величин:

$P_W = P_W(v)$, де $v(t)$ – поточна швидкість вітру (м/с);

$P_{PV} = P_{PV}(\rho)$, де $\rho(t)$ – поточна сонячна радіація (Вт/м²).

Для акумуляторної батареї фізичні обмеження детерміновані:

$P_{Ak}^{\min} \leq P_{Ak}(t) \leq P_{Ak}^{\max}$ – обмеження рівня заряду/розрядки акумулятора;

$P_{Ak}(t + \tau) - P_{Ak}(t) \leq P'_{Ak} \tau$ – обмеження по швидкості процесу заряду/розрядки.

Що стосується функції щільності розподілу енергоносія, то для вітру зазвичай приймається розподіл Вейбула, для сонячної радіації – бета-розподіл. Це дозволяє виконати параметричну оцінку показників роботи для різних конфігурацій енергосистеми. Однак для акумуляторних

батареї важливим є послідовність величин генерованої та споживаної енергії, тобто потужність як функція часу. Параметричний аналіз тут недостатній. За відсутності даних для рекурсивного аналізу більш прийнятним видається імітаційне моделювання.

Оскільки звичайний режим надходження вітрової та сонячної енергії погано узгоджується з фактичними потребами в електроенергії, то для розрахунку критеріїв адекватності енергосистеми потрібно прийняти певні припущення щодо режиму споживання. Природно прийняти, що система містить контрольовані джерела енергії (електромережу, дизель-генератори, малі ГЕС тощо), плановий графік роботи яких відповідає середньому рівню споживання та додаткової генерації ВДЕ. Це дозволить оцінити вплив стохастичної складової, яка є головним проблемним фактором для вітрової та сонячної енергетики. В такій постановці задача оптимізації є комбінацією *A*-моделі, де в якості однієї з цільових функцій виступає осереднений режим споживання енергії, та ряду інших моделей в залежності від обраних критеріїв. Таким чином, показники адекватності та надійності енергосистеми отримують імовірнісну оцінку, що забезпечує можливість стохастичної оптимізації системи з урахуванням різних критеріїв та оцінкою ризиків відхилення від нормативних вимог щодо якості енергозабезпечення.

Висновки. Гібридні енергосистеми, що використовують ВДЕ, мають особливості порівняно з традиційними енергосистемами. Ці особливості викликані в основному випадковою природою поведінки енергоносія, що накладає додаткові вимоги до забезпечення якості енергії. При цьому досягнення економічної ефективності обмежене технологічними особливостями та наявністю відповідного потенціалу ВДЕ і потребує оптимального поєднання різнотипних джерел енергії. Оптимізація таких енергосистем можлива з урахуванням стохастичного характеру процесів як споживання, так і генерування енергії, і вимагає врахування специфічних показників (індексів) якості роботи. Вибір індексів залежить від поставленої мети під час проектування чи організації роботи енергосистеми, а постановка за-

дач оптимізації допускає різноманітні формулювання, відмінні від підходів до традиційної енергетики. Запропоновані постановки задач стохастичної оптимізації охоплюють найбільш уживані підходи, а вибір конкретної постановки передбачає також пошук доцільного алгоритму розв'язання, що потребує окремих досліджень.

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». – 2017. – 66 с.
2. Badwawi R.A., Mallick T.K. A Review of Hybrid Solar PV and Wind Energy System // Smart Science – 2015, V. 3, №3. – P. 127–138.
3. Billinton Roy. Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods / Roy Billinton, Wenyuan Li. Springer Science+Business Media, LLC, 1994. – 361 p.
4. Кузнецов М.П., Ужейко С.О. Імовірнісні аспекти використання відновлюваних джерел енергії в зоні відчуження Чорнобильської АЕС // Відновлювана енергетика – 2016, №3. – С. 6–12.
5. Victor O. Okinda, Nichodemus A. Odero. A Review of Techniques In Optimal Sizing of Hybrid Renewable Energy Systems. IJRET // International Journal of Research in Engineering and Technology. – 2015, V. 4, №11. – p. 153–163.
6. Taher Niknam. A Modified Honey Bee Mating Optimization Algorithm For Multiobjective Placement of Renewable Energy Resources / Applied Energy 88, 2011. – p. 4817–4830.
7. СОУ-Н ЕЕ ЯЕК 04.156:2009 «Основні вимоги щодо регулювання частоти та потужності в ОЕС України. Настанова».
8. Наконечний С.І., Савіна С.С. Математичне програмування: Навч. посіб. — К.: КНЕУ, 2003. – 452 с.

ОСОБЕННОСТИ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ НА БАЗЕ ВИЭ

М.П. Кузнецов¹, доктор технических наук, **О.В. Лисенко**², кандидат технических наук, **А.А. Мельник**³, аспирант.

¹Институт возобновляемой энергетики НАН Украины
02094 г. Киев, ул. Гната Хоткевича, 20А.

²Таврический государственный агротехнологический университет
72310 г. Мелитополь, ул. Богдана Хмельницкого, 18.

³Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского»
03056 г. Киев, пр-т Перемоги, 37.

Оптимальное сочетание различных типов возобновляемой энергии, особенно ветровой и солнечной, должно учиты-

вать переменную природу энергоносителя и случайный характер текущей мощности. Итак, задачи оптимизации должны базироваться на стохастических подходах. Предложены различные варианты критериев и методов оптимизации, их выбор зависит от постановки задачи. Библ. 8.

Ключевые слова: возобновляемая энергия, энергосистема, критерии адекватности, стохастическая оптимизация.

REFERENCES

1. Energy Strategy of Ukraine up to 2035 «Safety, Energy Efficiency, Competitiveness». – 2017. – 66 p.
2. Badwawi R.A., Mallick T.K. A Review of Hybrid Solar PV and Wind Energy System // Smart Science – 2015, V. 3, №3. – P. 127–138.
3. Billinton Roy. Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods / Roy Billinton, Wenyuan Li . Springer Science+Business Media, LLC,1994. – 361 p.
4. Kuznietsov M., Uzheiko S. Probabilistic Aspects of Renewable Energy Using In The Chernobyl Zone // Vidnovluvana energetika – 2016, №3. – P.6-12.
5. Victor O. Okinda, Nichodemus A. Odero. A Review of Techniques In Optimal Sizing of Hybrid Renewable Energy Systems. IJRET // International Journal of Research in Engineering and Technology. – 2015, V. 4, №11. – p. 153–163.
6. Taher Niknam. A Modified Honey Bee Mating Optimization Algorithm For Multiobjective Placement of Renewable Energy Resources / Applied Energy 88, 2011. – p. 4817–4830.
7. SOU-N EE 04.156:2009 «Basic Requirements For Frequency and Power Regulation In The UES of Ukraine. Attitude».
8. Nakonechny S., Savina S. Mathematical programming: Teaching. manual. — K.: KNEU, 2003. – 452 c.

SYNOPSIS

Problems of RES integrating into grids need to be solved systematically, in order to use their capabilities efficiently, to avoid reducing the reliability of operating and the quality of energy, to ensure economic and environmental optimality. Existing approaches to power systems are predominantly deterministic, but the presence of variable energy sources requires a stochastic approach to optimality criteria and optimization tasks.

The optimal ratio of elements of the power system with renewable sources is established taking into account many factors. Optimization of the structure is carried out according to economic indicators, such as the cost of energy, as well as technical, taking into account the reliability of energy supply.

A correctly formulated extreme problem must contain a target function, or criterion, equations of state and restrictions. In the case of a combined power system, the power characteristics of system elements (power curves, battery charging characteristics, etc.) can be used as state equations. Restrictions in the form

of inequalities would describe the general parameters of the power system, as network throughput, consumer needs, energy potential. As an additional optimization criteria may be used such indicators as power loss index, load loss index, energy loss index and other that depend on the changing nature of wind and sun. System adequacy indexes may also be part of the constraints. In general, the task is to find the minimum cost of the system configuration, which would meet the demand for the adequate quality of energy.

Some examples of the stochastic programming tasks for some combined power systems are offered. The choice of a specific type of task depends on the requirements to the grid, available information and the purpose of the study. The obtained indicators of the power system adequacy has a probabilistic assessment, which ensures the possibility of taking into account different criteria and assessing the quality of energy supply.

РЕФЕРАТ

Проблеми інтеграції ВДЕ до енергосистем різного рівня необхідно вирішувати системно, щоб якомога ефективніше використовувати їхні можливості, уникнути зниження надійності режимів роботи електричних мереж та якості генерованої енергії, забезпечити оптимальність з урахуванням енергетичної, економічної та екологічної складових. Сучасні підходи до формування енергосистем носять переважно детермінований характер, проте наявність варіативних джерел енергії потребує стохастичного підходу до визначення критеріїв оптимальності та постановки задач оптимізації.

Оптимальне співвідношення окремих елементів енергосистеми на основі відновлюваних джерел визначається з урахуванням багатьох факторів. Оптимізація структури здійснюється за економічними показниками, такими як собівартість енергії, а також за технічними, – що враховують надійність енергопостачання.

Коректно поставлена екстремальна задача має містити цільову функцію, або критерій, рівняння стану та обмеження. У випадку комбінованої енергосистеми в якості рівнянь стану можуть бути використані енергетичні характеристики елементів системи (криві потужності, характеристика зарядки /розрядки акумуляторів тощо). Обмеження у вигляді нерівностей повинні описувати загальні параметри енергосистеми (пропускні здатності мереж, потреби споживача, енергетичний потенціал). Додатковими критеріями оптимізації можуть слугувати такі показники як індекс втрати живлення, індекс втрати очікуваного навантаження, індекс втрати енергії та інші, які залежать від мінливої природи вітру та сонця. Індокси адекватності системи можуть входити також до складу обмежень. Загалом ставиться задача пошуку мінімальної за вартістю конфігурації енергосистеми, яка б задовольняла попит одночасно забезпечуючи належну якість енергії.

Наведено деякі приклади постановок задач стохастич-

ного програмування, які можуть бути застосовані зокрема до енергосистем комбінованого типу. Вибір конкретного виду залежить від вимог до енергосистеми, наявної інформації та мети дослідження. Отримані показники адекватності енер-

госистеми отримують імовірнісну оцінку, що забезпечує можливість урахування різних критеріїв та оцінку якості енергозабезпечення.

Стаття надійшла до редакції 02.05.18

Остаточна версія 08.06.18

XVI МІЖНАРОДНА СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВИСТАВКА

ЕНЕРГЕТИКА

В ПРОМИСЛОВІСТІ-2018

**ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНЕ, ЕНЕРГЕТИЧНЕ УСТАТКУВАННЯ, ЕЛЕКТРИЧНІ ПІДСТАНЦІЇ,
ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ, КАБЕЛІ, ПРОВІДИ, ПРОМИСЛОВА СВІЛОТЕХНІКА,
АВТОМАТИЗАЦІЯ, КВПІА**

**XVI МІЖНАРОДНИЙ ФОРУМ
ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ КОМПЛЕКС
УКРАЇНИ: СЬОГОДЕННЯ ТА МАЙБУТНЄ**



ОРГАНІЗАТОР:
Міжнародний виставковий центр

ЗА ПІДТРИМКИ
Міністерства енергетики
та вугільної промисловості України

IEC Міжнародний виставковий центр
Україна, 02002, Київ, Броварський пр-т, 15
М "Лівобережна"
тел./факс: (044) 201-11-57
e-mail: lyudmila@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua, www.мвц.укр
www.tech-expo.com.ua

Технічний партнер: *Real Media*

6-8

листопада