

УДК 621.316

DOI: 10.31388/2078-0877-19-2-208-215

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ДЛЯ КОМБІНОВАНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

Лисенко О. В., к. т. н.

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного
Тел. (0619) 42-11-74

Анотація – робота присвячена вирішенню задачі стохастичної оптимізації. У якості критеріїв оптимізації запропоновані наступні формулювання: сумарна генерована енергія практично рівна спожитій, тобто мінімізується математичне очікування небалансу; значення небалансу потужності мають бути якомога меншими; наявність резервного джерела з заданим режимом роботи; обмеження по надлишку енергії, тобто по втратах генерування; обмеження по дефіциту енергії, тобто по втратах споживання; мінімізація вартості обладнання. Визначено, що в термінах оптимізації комбінованої енергосистеми задача мінімізації собівартості електроенергії, забезпечення певної кількості енергії, якщо режим її надходження несуттєвий, відноситься до *M*-моделі. У вигляді *M*-задачі може формулюватися і потреба в мінімізації втрат споживання (LPSP-критерій) чи втрат енергії (EXC-критерій) при фіксованих обмеженнях. У випадку комбінованих енергосистем на основі ВДЕ втрати енергії чи споживання спричинені розкидом значень потужності відносно очікуваних значень, тому таку задачу краще формулювати в термінах *D*-моделі. Варіантом *P*-задачі є забезпечення нормативної частоти струму. Умови *P*-задачі частіше можуть фігурувати в якості обмеження, оскільки основною цільовою функцією все ж виступають вартісні показники. Зазначено, що часто в задачах стохастичної оптимізації необхідно спостерігати за змінами математичного очікування і дисперсії одночасно, не допускати перевищення ними заданих значень або допускаючи це перевищення з певною імовірністю. Для вирішення цієї проблеми розглядаються моделі зі змішаними умовами (двокритеріальні та багатокритеріальні задачі).

Ключові слова – методи оптимізації, відновлювані джерела енергії, збитки, комбіновані енергосистеми.

Постановка проблеми. Оптимальне співвідношення окремих елементів в комбінованих енергосистемах на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) визначається з урахуванням багатьох важливих факторів, а саме: забезпеченості традиційними джерелами енергії; кліматичними (метеорологічними) умовами; структурою систем енергопостачання і енергоспоживання; вимогами до якості електричної і теплової енергії; вимогами до графіка енергопостачання; екологічними та економічними факторами, тощо. Особливістю локальних енергосистем є потреба в оптимізації складу генеруючих потужностей та їх характеристик, режимів сумісної роботи. Така оптимізація має враховувати особливості споживання енергії, вимоги до надійності забезпечення, наявний потенціал відновлюваних джерел енергії (сонячної, вітрової), вартісні показники. Поєднання фотоелектричних панелей і вітрових установок підвищує загальну вихідну енергію. Проте система накопичення енергії повинна забезпечувати безперервне живлення і перекрити можливий дефіцит електроенергії з відновлюваних джерел. Останнім часом, при зростанні питомої частки ВДЕ в енергетиці, з'являється значна кількість публікацій щодо методів обчислювальної оптимізації для досягнення техніко-економічної ефективності в гібридних системах. Оптимізація здійснюється по економічних показниках, таких як чиста приведена вартість системи, собівартість енергії і т.д. При цьому в якості додаткових умов вимагається певна надійність енергозабезпечення. Ці показники використовуються для визначення технічної та економічної ефективності конкретного проекту.

Аналіз останніх досліджень. Для досягнення техніко-економічної оптимальності комбінованих систем можуть бути застосовані різні методи оптимізації. Були запропоновані різні способи, деякі на основі більш традиційних підходів, таких як цілочисельне і інтервальне лінійне програмування, методи релаксації, квадратичного програмування та симплекс-пошуку, проте зростає число евристичних підходів, особливо генетичних алгоритмів і групової оптимізації. Представлені в літературі методи зокрема включають [1]:

- 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 Optimizatin);
- модель нормалізації (Simulated Annealing);
- гібридизовані методи розв'язку (Hybridized Solutions);

– комерційне програмне забезпечення (Commercial Software) та інші.

У загальному випадку оптимізаційні задачі можуть бути розбиті на три групи: детерміновані, ті що вирішуються в умовах неповноти інформації, і істотно стохастичні задачі. [2]

Окремим випадком стохастичного є статистичний опис. Ця форма опису використовується тоді, коли вдається оцінити лише вибірки деякої випадкової величини (в практичних завданнях так найчастіше і буває), на підставі якої і будуються відповідні емпіричні характеристики (щільність розподілу, функція розподілу, тощо).

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Метою роботи є визначення оптимального співвідношення окремих елементів в комбінованих енергосистемах на основі відновлюваних джерел енергії.

Основна частина. 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 імовірність певних режимів, а також імовірні темп та амплітуда коливань поточних значень в режимі реального часу. При оптимізації потужностей енергосистеми першочерговим є визначення довготривалих показників, зокрема середніх значень (або математичних сподівань). При цьому змінну складову системи «вітер-сонце» можна представити осередненими показниками, а саме коефіцієнтами використання встановленої потужності.

Представимо баланс потужності в автономній електроенергетичній системі у вигляді

$$P_{\Delta}(t) = P_{Ren}(t) + P_{Ak}(t) - P_L(t), \quad (1)$$

де $P_{Ren} = P_W + P_{PV}$ – потужність відновлюваних джерел енергії (вітру та сонця), що мають випадкову природу, P_{Ak} – потужність (стан зарядки) акумуляторної батареї, P_L – потужність навантаження (споживання). $P_W^0, P_{PV}^0, P_{Ak}^0$ – номінальні потужності.

Зазначені потужності є функціями часу.

Критерій оптимізації, або цільова функція, виходячи з найбільш уживаних вимог до комплексних енергосистем на базі ВДЕ, може мати наступні формулювання.

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

2) Значення небалансу потужності мають бути якомога меншими: $D(P_{\Delta}) \rightarrow \min$.

3) Передбачено резервне джерело (наприклад, дизель-генератор чи міні-ГЕС) з заданим режимом роботи: $P_A = f_D(t)$ (А-модель).

4) Обмеження по надлишку енергії, тобто по втратах генерування: $\min(\max P_A)$, або

5) Обмеження по дефіциту енергії, тобто по втратах споживання: $\max(\min P_A)$ (ММ-моделі).

6) Мінімізація вартості обладнання (детермінований критерій):

$$C_W \cdot P_W^0 + C_{PV} \cdot P_{PV}^0 + C_{Ak} \cdot P_{Ak}^0 \rightarrow \min, \quad (2)$$

де C_x – питома вартість відповідного обладнання.

Так, якщо критерієм є собівартість електроенергії, то цільова функція має вигляд:

$$f(T) = \int_0^T \sum_i^N c_i y_i(t) dt \rightarrow \min, \quad (3)$$

де c_i – питома вартість одиниці електричної енергії від i -го генеруючого елемента (чи групи елементів) певного типу; $y_i(t)$ – кількість одиниць електричної енергії, отриманої від i -го елемента; N – кількість елементів; T – час експлуатації.

Для оцінки інвестиційної привабливості важлива сукупна вартість проекту за весь термін експлуатації; для цього визначають так звану «чисту теперішню вартість» з застосуванням дисконтування капіталу. Генеруюча складова може містити вітрові, сонячні установки, акумулююче обладнання тощо, для яких властиві різні терміни амортизації та рівень експлуатаційних витрат, що важливо враховувати при оптимізації, проте для розрахунку собівартості можна запровадити приведені показники. Адже вироблена електроенергія, як правило, пропорційна номінальній потужності генеруючого обладнання; зазвичай приймається, що вартість обладнання також пропорційна його потужності.

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 заряду/розрядки акумулятора;

– крім того, $P_{Ak}(t+1) - P_{Ak}(t) \leq P'_{Ak}$ – обмеження по швидкості процесу заряду/розрядки.

Традиційна модель потужності СЕС (чи фотомодуля) описується формулою:

$$P_{PV} = \eta_{PV} \cdot A_{PV} \cdot G_t, \quad (4)$$

де A_{PV} – площа фотопанелей (м^2); G_t – сонячна радіація ($\text{Вт}/\text{м}^2$); η_{PV} – коефіцієнт ефективності, залежний від температури модуля та повітря.

Модель ВЕС (чи вітроустановки) задається кривою потужності $P_w(V)$, при цьому швидкість вітру V ($\text{м}/\text{с}$) перераховується на висоту осі ротора. Як правило, використовується залежність виду:

$$P_w(V) = \begin{cases} p(V), & V \in (V_0, V_m) \\ 0, & V \notin (V_0, V_m) \end{cases} \quad (5)$$

Вироблена електроенергія визначається формулою:

$$E = T \int_0^{\infty} P(x) f_x(x) dx, \quad (6)$$

де $f_x(x)$ – диференційна функція імовірності розподілу змінної x (для вітроустановок це швидкість вітру, для фотомодулів – сонячна радіація); $P(x)$ – потужність як функція координати x ; T – загальний час роботи.

В термінах оптимізації гібридної енергосистеми задача мінімізації собівартості електроенергії, наприклад, відноситься до M -моделі. Інші варіанти M -задачі – забезпечення певної кількості енергії, якщо режим її надходження несуттєвий. Якщо ж задоволення попиту важливе в кожен момент часу, ставиться задача пошуку мінімальної по вартості конфігурації енергосистеми, що задовольняла б попит, тобто при обмеженні виду:

$$\sum_i^N p_i(t) + SOC(t) \geq p_L(t), \quad (7)$$

де N – кількість, а p_i – потужність генеруючих модулів (вітроустановок, фотопанелей); SOC – стан зарядки акумуляторної батареї; p_L – потужність навантаження.

У вигляді M -задачі може формулюватися і потреба в мінімізації втрат споживання ($LPSP$ -критерій) чи втрат енергії (EXC -критерій) при фіксованих обмеженнях. Однак слід враховувати, що у випадку гібридних енергосистем на основі ВДЕ втрати енергії чи

споживання спричинені розкидом значень потужності відносно очікуваних значень, тому таку задачу краще формулювати в термінах D -моделі. D -задача матиме вигляд: при заданому σ_x потрібно знайти таке x_c , яке забезпечує мінімальне значення σ_f .

Варіантом P -задачі є забезпечення нормативної частоти струму. Тут є обмеження імовірнісні і абсолютні. В свою чергу коливання частоти пов'язані з небалансом потужності, тому відповідні умови можуть бути перераховані в терміни потужності стосовно досліджуваної енергосистеми. Умови P -задачі частіше можуть фігурувати в якості обмеження, оскільки основною цільовою функцією все ж виступають вартісні показники.

Слід зазначити, що часто в задачах стохастичної оптимізації необхідно спостерігати за змінами математичного очікування і дисперсії одночасно, не допускати перевищення ними заданих значень або допускаючи це перевищення з певною імовірністю. Для вирішення цієї проблеми розглядаються моделі зі змішаними умовами (двокритеріальні та багатокритеріальні задачі) [3], що потребуватиме встановлення ієрархії критеріїв в термінах Парето-оптимальності.

Орієнтування на максимальні відхилення балансу енергії при виборі акумуляторних батарей може призвести до економічно невиправданої їх ємності. При оптимізації за критерієм математичного сподівання доцільно виходити з середнього рівня можливого накопичення, а для P -критерію визначити допустиму імовірність небалансу (надміру чи нестачі потужності). Таким чином, коректне формування вимог до гібридної енергосистеми та вдале формулювання оптимізаційної задачі дозволять забезпечити як економічну привабливість, так і задовільні умови щодо надійності энергозабезпечення споживачів.

Врахування поточного небалансу потужностей вимагає моделювання режимів генерування та споживання енергії як неперервного процесу. При використанні методів типу Монте-Карло елементарною подією може бути реалізація випадкового процесу певної скінченої тривалості, наприклад добова складова флуктуацій як випадкова функція часу [4]. Такий підхід можливий в задачах на оптимізацію інтегральних показників, наприклад вартості чи собівартості. Однак навіть в таких задачах, якщо мова йде про акумулювання енергії чи про комбінування різнотипних джерел енергії, де важливою є послідовність в часі певних значень, бажано розглядати мінімально можливі інтервали часу [5]. На практиці їх тривалість визначається інтервалом вимірювання фактичних значень, що використовуються для статистичної обробки та подальшого математичного моделювання.

Висновки. Для вирішення задач стохастичної оптимізації застосовують два види методів: прямі і непрямі.

Прямі методи передбачають безпосереднє рішення задачі, описаної системою стохастичних диференціальних рівнянь. До цих методів можна віднести градієнтні методи, методи усереднень, штрафів і ін. Методи подібного типу є досить складними і громіздкими.

Якщо цільову функцію, використовуючи апарат теорії ймовірностей і математичної статистики, можна задати в явному вигляді в залежності від вектора управління, то застосовують непрямі методи вирішення стохастичних задач. У цьому випадку з'являється можливість зведення задачі стохастичної оптимізації до задачі нелінійного програмування, і розробці алгоритму цього зведення.

Література:

1. *Okinda V. O., Odera N. A.* A review of techniques in optimal sizing of hybrid renewable energy systems // *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2015. Vol. 4, Issue 11. P. 153-163.
2. *Гитман М. Б.* Введение в стохастическую оптимизацию: учеб. пособие. Пермь: ПНИПУ, 2014. 104 с.
3. *Niknam T.* A modified honey bee mating optimization algorithm for multiobjective placement of renewable energy resources // *Applied Energy*. 2011. Issue 88. P. 4817-4830.
4. *Кузнецов М. П.* Побудова математичної моделі режиму споживання електроенергії // *Відновлювана енергетика*. 2017. № 4. С. 33-42.
5. *Лысенко О. В.* Оцінка випадкових властивостей рівнів споживання електроенергії // *Відновлювана енергетика*. 2018. № 1. С. 26-35.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

О. В. Лысенко

Аннотация – работа посвящена решению задачи стохастической оптимизации. В качестве критериев оптимизации предложены следующие формулировки: суммарная генерируемая энергия практически равна потребленной, то есть минимизируется математическое ожидание небаланса; значение небаланса мощности должны быть как можно меньшими; наличие резервного источника с заданным режимом работы; ограничения по избытку энергии, то есть по потерям генерирования; ограничения по дефициту энергии, то есть по потерям потребления; минимизация стоимости оборудования.

OPTIMIZATION TASK RESOLUTION FOR HYBRID POWER SYSTEM

O. Lysenko

Summary

The work is devoted to solving the problem of stochastic optimization. As the optimization criteria, the following formulations are proposed: the total generated energy is practically equal to consumption, that is, the mathematical expectation of the imbalance is minimized; the value of power imbalance should be as low as possible; availability of a backup source with a given mode of work; limit on energy surplus, that is, on generation losses; restrictions on energy shortages, that is, on consumption losses; minimize the cost of equipment. It is determined that in the terms of optimization of the hybrid power system, the task of minimizing the cost of electricity, providing a certain amount of energy, if the mode of its receipt is insignificant, refers to the M-model. In the form of the M-task, the need to minimize consumption losses (LPSP-criterion) or energy losses (EXC-criterion) can be formulated with fixed restrictions. In the case of combined power systems based on RES, energy losses or consumption are caused by the spread of power values relative to the expected values, therefore, it is better to formulate such a problem in terms of the D-model. The option of the P-problem is to provide a standard current frequency. The conditions of the P-problem more often may appear as a constraint, since the main target function is still value figures. It is noted that often in tasks of stochastic optimization it is necessary to observe changes in mathematical expectation and dispersion at the same time, not to allow them to exceed the given values or to admit this excess with a certain probability. For solving this problem models with mixed conditions (two- and multicriteria tasks) are considered.