

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ГЕНЕРУЮЧИХ ДЖЕРЕЛ В АВТОНОМНИХ ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОСИСТЕМАХ

М.М. Сивенко*, О.О. Мірошник**

Державний біотехнологічний університет,
вул. Алчевських 44, Харків, 61002, Україна
e-mail: michael.syvenko@btu.kharkov.ua

Представлено проблему визначення оптимальних параметрів зберігання електричної енергії та генеруючих джерел в автономних локальних електросистемах. Наведено детальне обґрунтування ролі накопичувачів електроенергії при наявності відновлюваних джерел енергії в автономних локальних електросистемах з стохастичним режимом роботи. Наведено основні положення використовуваної моделі автономних локальних електросистем. Досліджено залежність параметрів накопичувача електроенергії в залежності від складу генерації. Розглянуто можливість вирішення задачі визначення параметрів накопичувачів електроенергії шляхом імітації роботи реальної системи. Обумовлено результати багатокритеріального вибору потужності та енергоємності накопичувача електроенергії з використанням економічних критеріїв. Розроблено математичну модель визначення оптимальних параметрів накопичувачів електричної енергії для автономних локальних електросистем з використанням змішаного цілочисельного програмування з оптимізацією з урахуванням економічних показників. Досліджено залежності параметрів накопичувачів електричної енергії від складу генерації автономних локальних електросистем. Бібл. 7, рис. 2.

Ключові слова: локальні електромережі, відновлювана енергетика, накопичувачі електроенергії, генерація, автономні джерела.

Вступ. На сьогоднішній день енергетична галузь перебуває у стані значного посилення роботи у сфері розробки та застосування відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), наближаючись до розосередженої енергосистеми та принципів раціонального використання енергоресурсів запроваджуючи Smart Grid. Тобто відбувається децентралізація процесів електропостачання та запровадження автономних локальних енергосистем (АЛЕС).

У структурі автономних локальних електросистем (АЛЕС) активно використовуються джерела генерації на основі відновлювальних джерел енергії (ВДЕ).

При складанні моделі оптимізації накопичувачі розглядалися разом з генеруючими джерелами. Накопичувачі електричної енергії характеризуються відмінними від генераторів технічними параметрами і характеристиками. Тому було приділено більше уваги цим елементам в роботі системи. Визначення оптимальних параметрів накопичувачів електричної енергії для АЛЕС здійснюється, в першу чергу, виходячи з техніко-економічних міркувань.

Загальне завдання зазвичай вирішується як двоступенева задача: виходячи, в першу чергу, з технічних міркувань підбирається потужність і ємність накопичувача, а потім, з урахуванням економічної оцінки, підбирається його тип. Така постановка задачі є комплексно складною, незважаючи на деякі спрощення. При виборі потужності і ємності накопичувачів все одно доводиться враховувати економічну складову, а при виборі типу і технічну.

Основна мета полягає в тому, щоб визначити два параметри: потужність і ємність накопичувачів електричної енергії. Вибір типу накопичувача електричної енергії здійснюється після визначення цих параметрів, відповідно до сфери їхнього застосування, економічних, географічних, технічних та інших параметрів [1–3].

Матеріали і методи досліджень. Очевидно, що в роботі автономних локальних електросистем з використанням генераторів, що працюють на основі ВДЕ, постійно виникають незбалансовані ситуації. Використання накопичувачів просто необхідно, щоб знизити ймовірність таких ситуацій. При розрахунку на позитивні значення дисбалансів приймаються ситуації, в яких генерація перевищує попит, а як негативна – коли попит перевищує генерацію.

Основні параметри пристроїв зберігання електричної енергії можна розрахувати за допомогою наступних співвідношень. Потужність зберігання електричної енергії:

$$P_{\text{збер}} = \max|\Delta P|, \quad (1)$$

де $|\Delta P|$ – різниця між загальною потужністю генеруючих джерел в ізолюваній системі і потужністю споживачів для цього режиму.

Смність накопичувачів визначається таким виразом:

$$R_{\text{збер}} = \frac{\max \int |\Delta P| dt}{\eta_{\text{збер}}}, \quad (2)$$

де $\eta_{\text{збер}}$ – ККД накопичувачів електричної енергії.

Як керовані генеруючі джерела використовуються дизельні генератори, а як джерела генерації на основі ВДЕ – вітроенергетичні та сонячні електростанції [5].

У рамках дослідження застосовується імітація роботи реальної системи зі зміною параметрів її функціональних елементів. Водночас використовується пошук різних варіантів, зокрема з різною часткою генерації з ВДЕ. Це дає змогу відповісти на питання про те, що буде відбуватися за різними параметрами в кожному окремому випадку. Для вивчення взаємозв'язку між часткою генерації на основі ВДЕ в АЛЕС і параметрами зберігання електричної енергії, необхідних в даному випадку, представимо 11 варіантів. Різниця у варіантах полягає в різній частці генерації ВДЕ, яка коливалася від 0 до 100 % (з кроком 10 %).

У першому варіанті передбачається, що необхідна енергія повністю виробляється дизельними генераторами, тоді як в останньому варіанті електроенергія повністю генерується вітровим і сонячними електростанціями.

Всі варіанти враховували наявність накопичувачів електричної енергії, встановлена потужність яких визначається як різниця між загальною встановленою потужністю, що генерується при використанні ВДЕ, і мінімальною потужністю навантаження:

$$P_{\text{збер}} = (P_{\text{вг}} + P_{\text{сг}}) - \min(P_{\text{нав}}), \quad (3)$$

де $P_{\text{вг}}$ – енергія, що генерується вітровими генераторами; $P_{\text{сг}}$ – електроенергія, що генерується сонячними електростанціями; $P_{\text{нав}}$ – потужність навантаження.

Загальна потужність, що виробляється генераторами на основі ВДЕ, повинна бути завідомо більшою, ніж значення мінімальної потужності накопичувача. Ця обставина дає змогу накопичувати надлишкову енергію (більше тієї, що пішла на покриття поточного навантаження) виробленої на основі ВДЕ, оскільки одним з припущень є те, що електроенергія, вироблена на основі ВДЕ, має пріоритет при заповненні графіка навантаження. Традиційні генератори викопного палива (в даному випадку дизельні) використовуються тільки тоді, коли сумарної потужності ВДЕ і накопичувачів недостатньо для покриття поточного навантаження [4, 7].

При визначенні вартості електричної енергії (з урахуванням експлуатаційних витрат, в тому числі паливної складової), що виробляється дизельними генераторами, використовувалася наступна квадратична функція:

$$(P) = a \cdot P^2 + b \cdot P + c, \quad (4)$$

Максимальні потужності генераторів вибираються за умови, що вони покривають максимальне (пікове) навантаження ізолюваної системи, мінімальна потужність визначається технічними можливостями генераторів.

Цільова функція витрат для дизельних генераторів представлена наступним виразом:

$$OF_1 = \min \sum_{i=1}^n C_i(X_i, P_i(t)), \quad (5)$$

де C_i – вартість виробництва електроенергії; X_i – бінарна змінна; $P_i(t)$ – потужність i -го дизельного генератора.

Обмеження для даної цільової функції представлені у виразі (6):

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n P_i(t) = P_{\text{збер}}(t) - P_{\text{вг}}(t) - P_{\text{сг}}(t) \pm P_{\text{збер}}(t) \\ X_i \cdot P_i^{\min} < P_i(t) < X_i \cdot P_i^{\max} \end{cases}, \quad (6)$$

де $P_{\text{нав}}(t)$ – потужність навантаження в АЛЕС; $P_{\text{вг}}(t)$ – електроенергія, що генерується ВЕС; $P_{\text{сг}}(t)$ – електроенергія, що генерується СЕС.

Під час розрахунків величина $P_{\text{накоп}}$ при зарядці і розрядці накопичувачів розглядається як навантаження або генерація відповідно. Таким чином, це значення в розрахунках приймається як позитивне в тому випадку, коли накопичувач заряджається, так і негативне в тому випадку, коли він розряджається [6, 7].

Основна відмінність розглянутої процедури полягає в тому, що при визначенні оптимальних параметрів накопичувачів електричної енергії склад генераторів вважається встановленим. Розрахунок проводиться на один рік. Загальна сума річних витрат енергосистеми складається з наступних компонентів:

$$C_p = C_f + C_{\text{ав}} + C_{\text{ндв}} + C_{\text{внн}}, \quad (7)$$

де C_f – вартість палива; $C_{\text{ав}}$ – амортизаційні відрахування на систему накопичувачів електроенергії; $C_{\text{ндв}}$ – вартість електроенергії, що не відпущена споживачам через недостатню ємність накопичувача; $C_{\text{внн}}$ – витрати на виробництво електроенергії від ВДЕ, неінтегрованої накопичувачем в АЛЕС протягом одного року.

Тобто можуть виникнути ситуації, коли при повній зарядці накопичувачів подальша інтеграція ними потужності з ВДЕ неможлива (така потужність називається неінтегрованою в систему). У цьому випадку необхідно скоротити виробництво енергії з ВДЕ, а в подальшому збільшити потужність накопичувачів.

У зв'язку із зазначеним оптимізована функція буде мати наступний вигляд:

$$OF_2 = \min(C_p). \quad (8)$$

Розрахунок проводився для одинадцяти варіантів, виходячи з терміна служби накопичувача у 10 років та коефіцієнта дисконтування 10 %. Очевидно, що зростання загального обсягу електроенергії, що генерується з використанням ВДЕ, вимагає збільшення ємності накопичувачів.

Інвестиційні витрати на установку накопичувачів електроенергії стають рентабельними тільки в тому випадку, якщо енергія, вироблена ВДЕ, становить більше 30 % річного споживання електроенергії. Ця обставина в основному обумовлена величиною недовідпуску електроенергії споживачам [1].

На рис. 1 наведено залежність параметрів накопичувачів від частки генерації від ВДЕ.

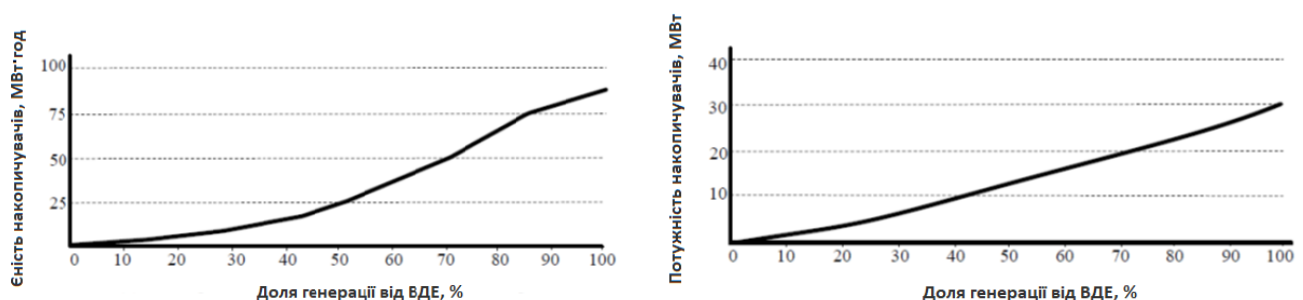


Рис. 1

Було проведено аналіз впливу складу генерації за допомогою ВДЕ на ємність накопичувачів. Було досліджено три випадки:

1. частка вітрогенерації склала 0 %, сонячної генерації – 100 %;
2. частка вітрогенерації – 100 %, сонячної генерації – 0 %;
3. частка вітрогенерації – 50 %, сонячної генерації – 50 %

Наприклад, якщо енергосистема повністю живиться енергією з використанням енергії сонячних електростанцій, то потрібні накопичувачі ємністю 80 МВт·год. Використання в АЛЕС тільки вітрогенерації знижує величину оптимальної ємності накопичувача практично до 25 МВт·год., як це показано на рис. 2, де номери кривих відповідають розглянутим варіантам. Така обставина обумовлена більшою тривалістю роботи вітрових електростанцій на добу (рік).

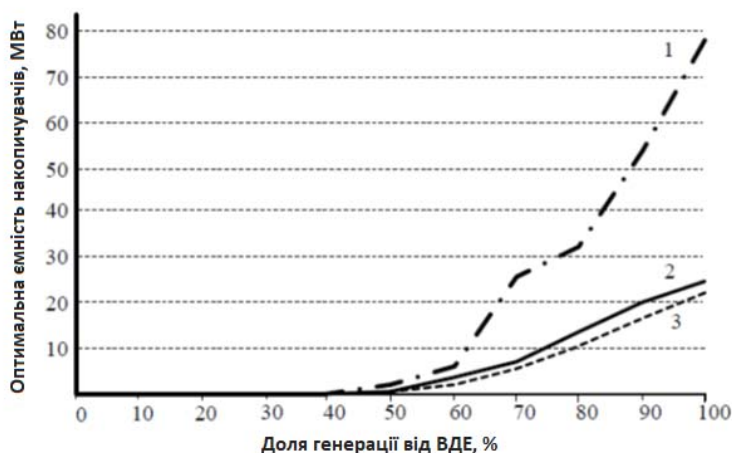


Рис. 2

зельного генератора.

У реальних умовах збільшення і зменшення потужності генератора відбувається не миттєво, тому розрахунки враховують швидкість набору і зниження потужності дизельних генераторів.

Ці розрахунки дають змогу зробити оцінку роботи системи, а також дозволили визначити оптимальні параметри накопичувачів електричної енергії, необхідні для інтеграції всієї виробленої енергії за допомогою ВДЕ. Для цього залишкове навантаження (потужність), покрите традиційними дизельними генераторами і накопичувачем, оцінюється як

$$P_i(t) = P_{\text{max}}(t) - P_{\text{min}}(t) - P_{\text{res}}(t). \quad (10)$$

У результаті при такому варіанті (без системи зберігання енергії) залишкове навантаження проаналізованої АЛЕС може бути як позитивним, так і негативним. Позитивні і негативні значення означають відповідно, що в АЛЕС спостерігається перевищення або дефіцит. Надлишок в основному пов'язаний з генерацією електричної енергії вітровими і сонячними електростанціями [2].

На основі аналізу залишкового навантаження потужність накопичувача електричної енергії можна оцінити за виразом:

$$P_{\text{max}} = \begin{cases} \min P_i(t) \\ \max P_i(t) \end{cases}. \quad (11)$$

Для оцінки потужності накопичувачів електричної енергії можуть бути використані два різних підходи. Накопичувач може бути розроблений як для того, щоб максимізувати інтеграцію електроенергії, що генерується з ВДЕ, або для мінімізації кількості недовідпущеної електричної енергії споживачам [6]. У першому випадку слід враховувати максимальне значення залишкового навантаження (11), а в другому випадку слід враховувати його мінімальне значення (11).

З метою зниження інвестиційних витрат модель оптимізації аналізується з економічної точки зору.

Для визначення оптимальної ємності накопичувача використовувалися рівновагові критерії: 1) вартість палива C_f ; 2) амортизаційні відрахування для системи зберігання енергії $C_{\text{ав}}$; 3) вартість виробництва електроенергії з ВДЕ, яка не інтегрована в АЛЕС протягом одного року $C_{\text{ндв}}$; 4) вартість електроенергії, недовідпущеної споживачам протягом одного року (збиток) $C_{\text{внн}}$.

Таким чином, цільова функція вартості буде наступною:

$$OF_2 = \min(C_f + C_{\text{ав}} + C_{\text{ндв}} + C_{\text{внн}}). \quad (12)$$

Висновок. Для мінімізації величини недовідпуску електроенергії можуть бути реалізовані декілька варіантів: зміна (в сторону збільшення) параметрів накопичувачів

Для визначення параметрів накопичувачів електроенергії, необхідних для функціонування АЛЕС, знову розглянемо систему, що складається з дизельних генераторів, вітрових і сонячних електростанцій.

Цільова функція для цього випадку представлена таким виразом:

$$OF_1 = \min \sum_{i=1}^F C_i(P_i(t)). \quad (9)$$

де C_i – витрати на виробництво електроенергії дизельних генераторів; F – кількість дизельних генераторів; $P_i(t)$ – потужність i -го ди-

електроенергії; збільшення частки традиційної генерації; збільшення частки генерації на основі ВДЕ.

Очевидно, що є необхідним ітераційний процес для пошуку компромісного вирішення. У цьому випадку був прийнятий спрощений варіант і для цих цілей пропонується знайти нову потужність генераторів на основі ВДЕ, що безумовно спричинить за собою зміну параметрів накопичувачів [5].

Слід зазначити, що в даному дослідженні зроблено допущення, що при розрахунках не враховуються втрати, які присутні в реальній системі.

При розрахунку в подальшому приймається система накопичувачів з повною інтеграцією електроенергії, що генерується ВДЕ і з розрахованим можливим недовідпуском електроенергії. З прикладу видно, що повна інтеграція виробленої енергії ВДЕ і відсутності недовідпуску електроенергії вимагає досить великих накопичувачів, які використовуються лише частково.

1. Петрук В.Г., Коцюбинська С.С., Мацюк Д.В. Аналіз сучасного стану альтернативної енергетики та рекомендації по екологізації паливно-енергетичного комплексу України. Зб. матеріалів II-го Всеукр. з'їзду екологів з міжнар. участю. Вінниця, 2016.
2. Кузнєцов М.П., Мельник О.А. Оптимальна побудова електроенергетичного комплексу на основі відновлюваних джерел енергії. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2018. Вип. 51. С. 28–32.
3. Кулік М.М., Горбулін В.П., Кириленко О.В. Концептуальні підходи до розвитку енергетики України (аналітичні матеріали). Інститут загальної енергетики НАН України, 2017.
4. Кузнєцов М.П., Лисенко О.В., Мельник О.А. Особливості стохастичної оптимізації гібридних енергосистем на базі ВДЕ. *Відновлювана енергетика*. 2018.
5. M. Dali, J. Belhadj, X. Roboam. Hybrid solar–wind system with battery storage operating in grid-connected and standalone mode: control and energy management – experimental investigation. *Energy*. 2010. Vol. 35. Pp. 2587–2595.
6. Trunova I., Miroshnyk O., Savchenko O., Moroz O., Pazyi V., Shchur T., Kasner R., Baldowska-Witos P. Scheduling of preventive maintenance of an power equipment of the agricultural enterprises. *Journal of Physics: Conference Series*. Volume 1781, Issue 1, 0120182020 International Conference on Applied Sciences, ICAS 2020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1781/1/012018>
7. Mahto T., Mukherjee V. Energy storage systems for mitigating the variability of isolated hybrid power system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015.

DETERMINATION OF THE OPTIMAL PARAMETERS OF ELECTRICAL ENERGY STORAGE AND GENERATING SOURCES IN AUTONOMOUS LOCAL ELECTRICAL SYSTEMS

M.M. Syvenko, O.O. Miroshnyk

State Biotechnological University,
str. Alchevskikh, 44, Kharkiv, 61002, Ukraine
e-mail: michael.syvenko@btu.kharkov.ua

The problem of determining the optimal parameters of electric energy storage and generating sources in autonomous local power systems is presented. A detailed justification of the role of electricity storage in the presence of renewable energy sources in autonomous local power systems with a stochastic mode of operation is given. The main provisions of the used model of autonomous local electrical systems are given. The dependence of the electricity storage parameters depending on the composition of the generation was investigated. The possibility of solving the problem of determining the parameters of electricity storage devices by simulating the operation of a real system is considered. The results of the multi-criteria selection of the power and energy capacity of the electricity storage unit using economic criteria are determined. A mathematical model for determining the optimal parameters of electric energy storage for autonomous local electrical systems using mixed integer programming with optimization based on economic indicators has been developed. The dependence of the parameters of electric energy storage devices on the composition of the generation of autonomous local electrical systems has been studied. Bibl. 7, fig. 2.

Keywords: local power grids, renewable energy, electricity storage, generation, autonomous sources.

1. Petruk V.G., Kotsyubynska S.S., Matsyuk D.V. Analysis of the current state of alternative energy and recommendations for greening the fuel and energy complex of Ukraine. Zb. materialiv II-ho Vseukr. zizdu ekologiv z mizhnar. uchastiu. Vinnytsia, 2016. (Ukr)
2. Kuznetsov M.P., Melnyk O.A. Optimal construction of an electric power complex based on renewable energy sources. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*. 2018. Iss. 51. Pp. 28–32. (Ukr)

3. Kulik M.M., Horbulin V.P., Kyrilenko O.V. Conceptual approaches to the development of the energy industry of Ukraine (analytical materials). Institute of General Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2017. (Ukr)
4. Kuznetsov M.P., Lysenko O.V., Melnyk O.A. Peculiarities of stochastic optimization of hybrid energy systems based on RES. *Renewable Energy*. 2018. (Ukr)
5. Dali M., Belhadj J., Roboam X. Hybrid solar–wind system with battery storage operating in grid-connected and standalone mode: control and energy management – experimental investigation. *Energy*. 2010. Vol. 35. Pp. 2587–2595.
6. Trunova I., Miroshnyk O., Savchenko O., Moroz O., Pazyi V., Shchur T., Kasner R., Bałdowska-Witos P. Scheduling of preventive maintenance of an power equipment of the agricultural enterprises. Journal of Physics: Conference Series. *International Conference on Applied Sciences, ICAS 2020*. Volume 1781. Issue 1. 0120182020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1781/1/012018> (Ukr)
7. Mahto T., Mukherjee V. Energy storage systems for mitigating the variability of isolated hybrid power system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015.

Надійшла: 08.06.2023

Прийнята: 26.07.2023

Submitted: 08.06.2023

Accepted: 26.07.2023