

КОЗАЧУК ОЛЕГ

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7143-3530>e-mail: Olegxname@gmail.com

ЛЕЖНІЮК ПЕТРО

Інститут відновлюваної енергетики НАН України

<https://orcid.org/0000-0002-9366-3553>e-mail: lezhpdp@gmail.com

ФОРМУВАННЯ ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ В СКЛАДІ ОБ'ЄДНАНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ

В даній час відновлювані джерела енергії (ВДЕ) розпорошені в електроенергетичних системах (ЕЕС) територіально, що ускладнює формування локальних (місцевих) електроенергетичних систем (ЛЕС), які, працюючи в нормальних режимах паралельно з ЕЕС як балансуєчі групи, в екстремальних випадках здатні працювати ізольовано в автономному режимі. Проте розпорошеність ВДЕ не дозволяє ефективно формувати ЛЕС таким чином, щоб вони забезпечували на потрібному рівні надійність електропостачання споживачів електроенергії. В статті пропонується інтегрувати ВДЕ в розподільні електричні мережі у вигляді окремих microgrid (MG), які є ключовою частиною переходу до ЛЕС з функціонуванням на принципах SMART Grid. Місцеві MG окрім джерел генерування і споживачів мають також засоби накопичення певної кількості енергії. Для забезпечення техніко-економічної ефективності MG об'єднуються в інтелектуальну систему керування, що дозволяє більш раціонально використовувати ресурси MG, ефективно взаємодіяти з розподільчою мережею і здійснювати можливості активних споживачів електроенергії в процесі балансування режиму ЛЕС. В роботі запропоновано ієрархічну структуру інтелектуальної системи ЛЕС. Структуровані таким чином ЛЕС з інтелектуальними електричними мережами можуть під час обмеження централізованого електрозабезпечення не втрачати ВДЕ, а в повній мірі використати їх переваги разом з системами зберігання енергії для надійного електропостачання споживачів.

Ключові слова: локальні електроенергетичні системи, автономний режим, відновлювані джерела енергії, інтелектуальна система керування.

KOZACHUK OLEG

Vinnytsia National Technical University

LEZHNIUK PETRO

Institute of Renewable Energy

FORMATION OF LOCAL ELECTRIC ENERGY SYSTEMS IN THE COMPOSITION OF THE UNIFIED ENERGY SUPPLY SYSTEM

At present, renewable sources of energy (RSE) are geographically diffused in energy supply systems, which complicates the formation of local electric energy systems (LEES), which operating in normal modes in parallel with the energy system as balancing groups, in extreme cases can operate in isolation in autonomous mode. However, the diffuse distribution of RSE does not allow for the effective formation of LEES in such a way that they ensure the required level of reliability of electricity supply to electricity consumers. The article proposes to integrate RSE into distribution power grids in the form of separate microgrid (MG), which is a key part of the transition to a power grid operating on the principles of SMART Grid. Local MGs, in addition to generation sources and consumers, also have the means to accumulate a certain amount of energy. To ensure the technical and economic efficiency, MGs are combined into an intelligent control system, which allows for more rational use of MG resources, efficient interaction with the distribution grid, and the use of active electricity consumers in the process of balancing the LEES mode. The paper proposes a hierarchical structure of the intellectual system of LEES. Thus structured, LEES with intelligent power grids can not lose RSE during the limitation of centralized power supply, but fully use their advantages together with energy storage systems for reliable power supply to consumers. Thanks to the intelligent system proposed in this paper, the LEES implements the principles of SMART Grid and functions as an informative energy system. The LEES formed in this way can operate as a balancing group within the ESS, performing the tasks of the distribution system operator depending on the voltage and power of its MG components. Since LEES are a part of the ESS, they operate under the conditions and according to the rules, without disrupting the functioning of the ESS, which currently provides a stable power supply. This applies to all modes of operation of LEES.

Key words: local electric energy systems, autonomous mode, renewable sources of energy, intelligent control system.

Вступ та постановка завдання

Завдяки розбудові відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в електроенергетичних системах, зокрема в розподільних електричних мережах, появилася можливість створювати системи електропостачання споживачів на основі ВДЕ. Поза тим, що це забезпечує певні переваги щодо енергоефективності електропостачання, є можливість формування локальних електроенергетичних систем (ЛЕС) на основі ВДЕ як балансуєчих групи в електроенергетичній системі (ЕЕС) [1, 2]. В [3] показана структура такої ЛЕС, в склад якої крім ВДЕ обов'язково входить система зберігання (накопичення) енергії (СЗЕ). В СЗЕ можуть входити малі ГЕС, електрохімічні накопичувачі та когенераційні установки на природному газі та біогазі з добавками водню.

В ЛЕС генерування ВДЕ, а це в основному фотоелектричні і вітрові електростанції (ФЕС, ВЕС), залежить від природних умов і має непостійну, змінну в часі потужність. Так само змінним в ЛЕС є графік споживання електроенергії. Навіть, якщо середні потужності генерування і споживання електроенергії в такій ЛЕС як балансуєчій групі будуть співрозмірними, то виникає проблема балансування в ній режиму. В ЛЕС

необхідно створювати автоматизовану або, враховуючи сучасний стан апаратного і програмного забезпечення в галузі, інтелектуальну автоматичну систему керування (АСК) режимом ЛЕС [4]. Функції АСК полягають в тому, щоб підтримувати в ЛЕС прогнозований графік генерування ВДЕ на наступну добу та узгоджувати його з графіком споживання. При цьому використовуються активні споживачі, які, коригуючи свій технологічний процес, впливають на сумарний графік споживання/генерування ЛЕС стосовно ЕЕС [5]. Коли ЛЕС працює з профіцитом, то надлишок електроенергії запасастся СЗЕ або може передаватися в ЕЕС. Якщо ФЕС і ВЕС в силу своїх природних обмежень не можуть покривати графік навантаження ЛЕС, то задіюється СЗЕ або послуги ЕЕС. За таких умов ЛЕС можуть зберігати працездатність і забезпечити електропостачання споживачів як в нормальному паралельному режимі з ЕЕС, так і в автономному режимі.

Оскільки ЛЕС є частиною ЕЕС, то вони повинні діяти в умовах і за правилами, не порушуючи функціонування ЕЕС, яка на сьогодні забезпечує стійке електропостачання. Це стосується всіх режимів роботи ЛЕС. Тому важливо, виходячи з реальних технічних можливостей і стану генеруючих потужностей та електричних мереж, визначитися з якими характеристиками і які задачі можуть вирішувати ЛЕС як балансуєчі групи ЕЕС. Через обмеженість технічних і людських ресурсів процес формування ЛЕС може бути поетапним. Окремі частини системи розвиваються згідно певного плану і формуються згідно певної концепції. Відповідність прийнятої концепції контролюється інтегральним показником якості використання ресурсів за кінцевим результатом [6]. За основу концепції формування плану (дорожньої карти) формування ЛЕС в ЕЕС може бути прийнята «Концепція «розумних» електричних мереж як інтелектуальної системи». В ній закладається технічна політика розвитку електроенергетичних систем, наукові основи на принципах SMART Grid, а також форми підготовки кваліфікованих кадрів.

Метою статті є обґрунтування умов і принципів виокремлення частини ЕЕС у формі локальних електроенергетичних систем, які є балансуєчими групами і здатні функціонувати в автономному режимі під час втрати електричних зв'язків з мережами ЕЕС.

Локальна електроенергетична система як балансуєча група

На першому етапі формування ЛЕС з відновлюваними джерелами енергії для балансування її потужності доцільно дослідити можливості використання добре відпрацьованих та відносно не дорогих методів, таких, наприклад, як активні споживачі [5, 7]. Для дослідження проблеми споживання відновлюваної енергії розглянемо ЛЕС як балансуєчу групу, яка наведена на рис. 1. В неї входить фотоелектрична станція як джерело електроенергії, система зберігання енергії та споживачі електроенергії. Джерелами електроенергії є ФЕС, а також джерела централізованого живлення від ЕЕС (атомні електричні станції (АЕС), теплові електростанції (ТЕС), гідроелектростанції (ГЕС), гідроакумулюючі електростанції (ГАЕС)).

Баланс електроенергії в ЛЕС, показаний на рис. 1, як в балансуєчій групі запишеться:

$$\pm P_{EES}(t) + P_{FES}(t) \pm P_{CZE}(t) - P_{cn}(t) - P_{ac}(t) - \Delta P(t) = 0, \quad (1)$$

де $P_{EES}(t)$ – потужність від ЕЕС; $P_{FES}(t)$ – потужність ФЕС; $\pm P_{CZE}(t)$ – потужність системи зберігання енергії; $P_{cn}(t)$ – потужність споживачів електроенергії, які працюють за своїм графіком; $P_{ac}(t)$ – потужність активних споживачів, які працюють за скоригованим графіком; $\Delta P(t)$ – технологічні витрати в електричних мережах.

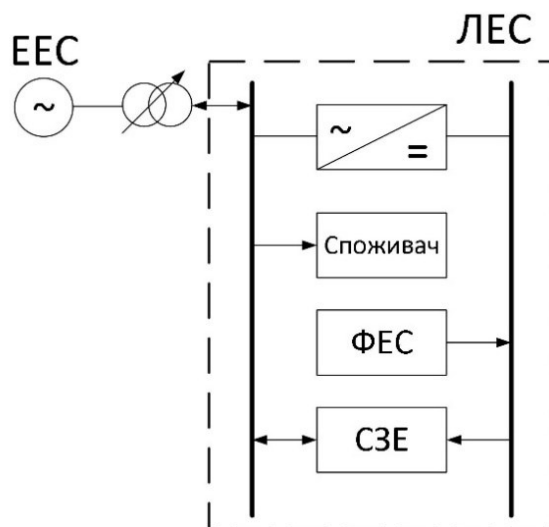


Рис. 1. Локальна електроенергетична система як частина ЕЕС

На рис. 2 показано приклад покриття добового графіка навантаження ЛЕС, наведеної на рис. 1. Завданням є сформулювати ЛЕС як балансуєчу групу. Для цього, прогнозуючи графік генерування і споживання на наступну добу, складається баланс електроенергії (див. рис. 2,а):

$W_H = \sum_{i=1}^{24} P_{H_i}(t)$ – електроенергія сумарного навантаження, включно втрат; $W_{\Phi EC} = \sum_{j=t_n}^{t_k} P_{\Phi EC_j}(t)$ – електроенергія, вироблена ФЕС, де t_n, t_k – час початку і закінчення генерування; $W_{C3E} = \sum_{j=t_1}^{t_2} P_{\Phi EC_j}(t) - \sum_{j=t_1}^{t_2} P_{H_i}(t)$ – надлишок електроенергії в ЛЕС, яка може передаватись в систему зберігання енергії або в ЕЕС.

Визначається кількість електроенергії навантаження в години, коли генерування ФЕС відсутнє:

$W_{EEC} = W_H - W_{\Phi EC} + \Delta W$ – електроенергія, яку необхідно для балансу в ЛЕС взяти з ЕЕС або з СЗЕ. Тут можливі два варіанти: коли ЛЕС працює паралельно з ЕЕС і коли вона працює автономно. В першому варіанті дефіцит електроенергії в ЛЕС покривається з ЕЕС – напряму або через СЗЕ. Для роботи в автономному режимі електроенергії СЗЕ повинно бути достатньо для покриття навантаження в «нічний» час. Щоб забезпечити автономний режим ЛЕС, необхідно збільшити потужність ФЕС, як це показано на рис. 2,б, і, відповідно, збільшити ємність СЗЕ. Інший спосіб – обмеження потужності споживачів і задіяння потенціалу активних споживачів, як це показано в [5].

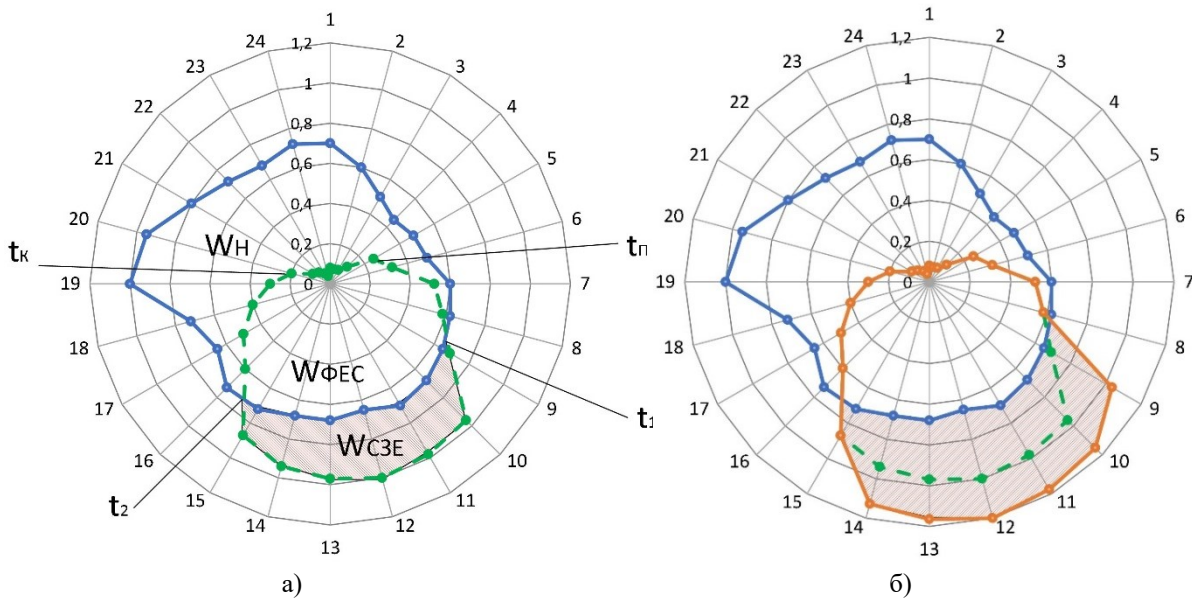


Рис. 2. Приклади покриття добового графіка електроспоживання ЛЕС
 — графік навантаження; - - графік генерування ФЕС; — графік генерування розширеної ФЕС

Інтелектуальна система керування режимом ЛЕС

У склад виокремленої в ЕЕС локальної системи входять джерела електроенергії, резервна система накопичення енергії та споживачі електроенергії, які об'єднані розвиненими електричними мережами різної напруги. З точки зору системи керування ЛЕС є складним розосередженим об'єктом, який складається з окремих агентів, призначених реагувати на змінні поточні аспекти ЛЕС і формувати колективні дії для забезпечення надійного електропостачання споживачів. Автономні агенти приймають рішення з керування і складають мультиагентну систему [2, 4, 8].

На рис. 3 показана ієрархічна структура інтелектуальної системи ЛЕС. На верхньому рівні локальний агент ЛЕСА є елементом нижнього рівня оператора системи розподілу (ОСР). За умови паралельної роботи з ЕЕС на цьому рівні ЛЕСА здійснює функції балансувальної групи в складі ЕЕС, координуючи свої дії з ОСР. На цьому рівні основним поточним завданням є прогноз споживання і генерування електроенергії в ЛЕС і здійснення обміну електроенергією з ЕЕС. Для цього формується база даних через запити на інформацію агентів середньої ланки microgrid MGA і MGA_i. Під час відділення ЛЕС з ЕЕС змінюються завдання і зміст функцій, які мають виконуватися АСК. На ЛЕСА покладаються функції внутрішнього балансування потужності і електроенергії та підтримування техніко-економічних показників системи електропостачання в допустимих значеннях. В першу чергу це стосується підтримування в ЛЕС частоти і напруги на шинах споживачів. Це здійснюється колективними діями агентів середнього і технічного рівня шляхом подачі на них відповідних робочих команд. Здійснюється оптимальне керування активними споживачами в межах споживання енергії W_{C3E} [5], а також обмеження, за необхідності, потужності неактивних споживачів.

Агент MGA є агентом системи накопичення енергії, агентом керованих розосереджених джерел енергії, а також всередині добової корекції генерування за командою ЛЕСА. Він керує спільною СЗЕ, підтримуючи частоту, а також керує джерелами реактивної потужності, підтримуючи напругу. Агенти MGA_i представляють собою microgrid, які відповідають за зв'язок зі своїми агентами на технічному рівні: ФЕС, активний споживач, неактивний споживач, місцеві СЗЕ. Ними здійснюється оптимізація техніко-економічних параметрів на основі даних від місцевих агентів і завантажується результат оптимізації відповідної зони microgrid (надлишок/дефіцит потужності, стан накопичувача енергії, можливості активного споживача). Вони відповідають за зв'язок для завантаження відповідних даних і отримання робочих команд.

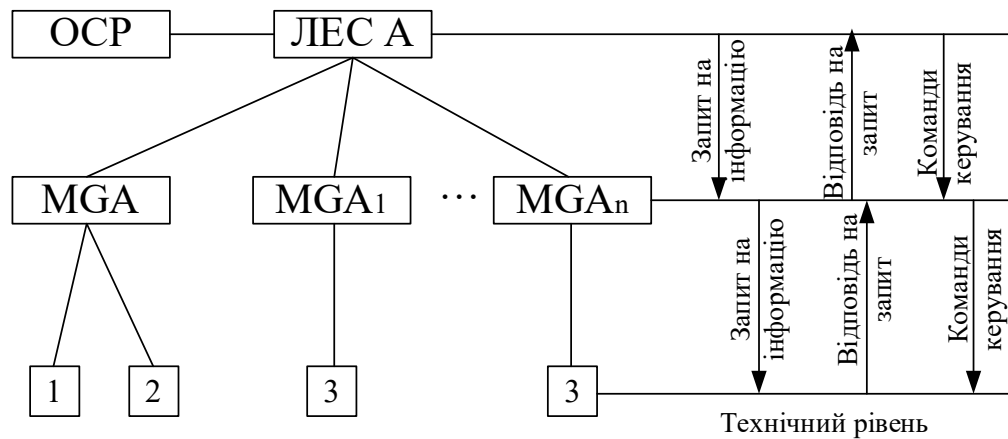


Рис. 3. Ієрархічна структура інтелектуальної системи ЛЕС

На агента ЛЕСА покладаються також функції комутації ЛЕС з електричною мережею ЕЕС. За паралельної роботи ЛЕС і ЕЕС точка їх примикання є опорною точкою по напрузі. В ній спільними діями ОСР і ЛЕСА підтримується такий рівень напруги, який забезпечує передачу електроенергії з ЕЕС в ЛЕС і навпаки. При переведенні ЛЕС на ізолювану роботу можливі два варіанти: вимушений, коли з якоїсь причини втрачається напруга в електричній мережі, або за нормального режиму, коли від'єднання ЛЕС здійснюється з ініціативи ОСР або ЛЕСА. В цих випадках відпрацьовуються команди на МГА згідно програмного забезпечення АСК і ЛЕС переводиться в автономний режим. При під'єднанні ЛЕС до ЕЕС перед подачею команди на вимикач виконуються всі процедури, які пов'язані з синхронізацією двох електричних мереж.

Висновки

В статті запропонована ієрархічна структура інтелектуальної системи локальної електроенергетичної системи, яка може працювати як паралельно з ЕЕС, так і ізолювано від неї. Завдяки інтелектуальній системі в ЛЕС реалізуються принципи SMART Grid і вона функціонує як інформативно-енергетична система. Сформована таким чином ЛЕС може працювати як балансуєча група в складі ЕЕС, виконуючи завдання оператора системи розподілу в залежності від напруги і потужності її складових МГА. В автономному режимі ЛЕС в залежності від ємності системи зберігання енергії може бути повноцінним резервом відновлюваних джерел енергії і використовуватися для оптимізації потоків потужності та підтримання частоти і напруги. Ефективним є участь активних споживачів електроенергії для узгодження графіків генерування і споживання в ЛЕС як способу балансування в ній потужності та електроенергії.

Література

1. Кириленко О.В., Білов І.В., Парус Є.В., Трач І.В. Оцінка ефективності використання систем накопичення електроенергії в електричних мережах // Технічна електродинаміка. – 2021. – №2. – С. 44–45. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.044>
2. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими. За ред. О. В. Кириленка. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. – 400 с.
3. Petro Lezhniuk, Oleh Kozachuk, Natalia Komenda, Juliya Malogulko. Electrical power and energy balance in the local electrical system by using reconciliation of the generation and consumption schedules // Przegląd Elektrotechniczny. – 2023. – №9. – pp. 57–63. DOI:10.15199/48.2023.09.10
4. W. Jiang, K. Yang, J. Yang, R. Mao, N. Xue and Z. Zhuo, "A Multiagent-Based Hierarchical Energy Management Strategy for Maximization of Renewable Energy Consumption in Interconnected Multi-Microgrids," in IEEE Access, vol. 7, pp. 169931-169945, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2955552
5. Лежнюк Петро, Козачук Олег, Галузінський Олександр. Використання активних споживачів для балансування електроенергії в електричній мережі // Вісник Хмельницького національного університету (Технічні науки). – 2023. – №3. – С. 214–221. DOI 10.31891/2307-5732-2023-321-3-214-221
6. Andrzej Smolarz, Petro Lezhniuk, Stepan Kudrya, Viacheslav Komar, Iryna Hunko and others. Increasing Technical Efficiency of Renewable Energy Sources in Power Systems // Energies 2023, 16, 2828. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16062828>.
7. Денисюк С.П., Дерев'яно Д.Г., Белоха Г.С. Синтез моделей локальних електроенергетичних систем з джерелами розосередженої генерації // Технічна електродинаміка. – 2022. №4. – С. 48–53. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.04.048>
8. Xing, X., Jia, L.: Energy management in microgrid and multi-microgrid. IET Renew. Power Gener. 00, 1–29 (2024). <https://doi.org/10.1049/rpg2.12816> (<https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/rpg2.12816>)

References

1. Kyrylenko O.V., Blinov I.V., Parus E.V., Trach I.V. Evaluation of efficiency of use of energy storage system in electric networks // *Technical electrodynamics*. – 2021. – No. 2. – Pp. 44–45. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.044>
2. *Intelligent power grids: elements and modes*. Edited by O. V. Kyrylenko. - Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2016. 400 p.
3. Petro Lezhniuk, Oleh Kozachuk, Natalia Komenda, Juliya Malogulko. Electrical power and energy balance in the local electrical system by using reconciliation of the generation and consumption schedules // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2023. – №9. – pp. 57–63. DOI:10.15199/48.2023.09.10
4. W. Jiang, K. Yang, J. Yang, R. Mao, N. Xue and Z. Zhuo, "A Multiagent-Based Hierarchical Energy Management Strategy for Maximization of Renewable Energy Consumption in Interconnected Multi-Microgrids," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 169931-169945, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2955552
5. Petro Lezhniuk, Oleh Kozachuk, Oleksandr Haluzynskyi. The use of active consumers for balancing electricity in the power grid // *Bulletin of Khmelnytskyi National University (Technical Sciences)*. - 2023. - №3. - P. 214-221. DOI 10.31891/2307-5732-2023-321-3-214-221
6. Andrzej Smolarz, Petro Lezhniuk, Stepan Kudrya, Viacheslav Komar, Iryna Hunko and others. Increasing Technical Efficiency of Renewable Energy Sources in Power Systems // *Energies*. – 2023. – 16, 2828. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16062828>.
7. Denysiuk S.P., Derevianko D.G., Bieloha H.S. Synthesis of models of local power systems with distributed generation sources // *Technical electrodynamics*. – 2022. No. 4. – Pp. 48–53. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.04.048>
8. Xing, X., Jia, L.: Energy management in microgrid and multi-microgrid. *IET Renew. Power Gener.* 00, 1–29 (2024). <https://doi.org/10.1049/rpg2.12816>