

МЕТОДИ КЕРУВАННЯ ПІДКЛЮЧЕННЯМ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ ДО ІСНУЮЧОЇ МЕРЕЖІ

Налбандян М.В.¹, Мазуренко В.Б.²

¹Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, аспірант, Україна

²Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара,

к.т.н., доцент, Україна

Анотація. Децентралізація виробництва електричної енергії є одним з найбільш ефективних способів підвищення надійності систем енергопостачання. У сучасних умовах найбільш поширеною стає енергетична модель, коли кінцевий споживач поєднує як споживання, так і виробництво енергії з використанням альтернативних джерел. При цьому виникає низка технічних проблем, пов'язаних з автоматичним керуванням генерацією, з оцінкою якості енергії, отриманої від різноманітних джерел та з робастною комутацією цих джерел. Існуючі методи комутації розраховані на єдину точку підключення усіх джерел до комутаційної системи, що суттєво ускладнює приєднання нових джерел та створення розподіленої системи генерації енергії. З метою удосконалення існуючих схем запропонована модель, яка дозволяє розподілене підключення джерел живлення до мережі у багатьох точках комутації, забезпечує їхню синхронізацію та моніторинг якості енергії від кожного джерела.

Ключові слова: розподілена система, альтернативні джерела живлення, керування, метод, автоматизована система, комутація, інтеграція, якість, модель.

На сьогоднішній день глобальна енергетична інфраструктура переважно функціонує за принципом централізованого електропостачання, що передбачає виробництво основної частини електроенергії на великих генерувальних об'єктах. Після генерації електроенергія транспортується через магістральні лінії електропередачі до розподільчих систем, які забезпечують її постачання кінцевим споживачам. Централізована енергетична модель передбачає концентрацію виробничих потужностей у великих енергогенерувальних центрах, з подальшим транспортуванням електроенергії через багаторівневу систему магістральних та розподільчих мереж. Така структура дозволяє досягти високої економічної ефективності завдяки реалізації «ефекту масштабу» – зниження питомих витрат на одиницю

виробленої електроенергії внаслідок великого обсягу виробництва. Крім того, розміщення електростанцій у районах із сприятливими природними або ресурсними умовами – наприклад, теплових електростанцій поблизу вугільних або газових родовищ, а гідроелектростанцій на потужних водних артеріях – дозволяє раціонально використовувати доступні енергетичні ресурси та мінімізувати логістичні витрати. Такий підхід забезпечує стабільне постачання енергії на значні відстані, що є особливо важливим для задоволення потреб урбанізованих і промислово розвинених регіонів. Доставка електроенергії до кінцевого споживача потребує розгалуженої інфраструктури, зокрема будівництва та обслуговування ліній електропередач, що неминуче спричиняє додаткові витрати та впливає на кінцеву вартість електроенергії. У відповідь на ці виклики останніми роками спостерігається зростання інтересу до децентралізованих систем генерації, зокрема завдяки здешевленню відновлюваних джерел енергії – передусім сонячних і вітрових установок – та широкому впровадженню накопичувальних систем з великою ємністю. Це сприяє зміні традиційної моделі енергопостачання та розвитку локальної генерації, орієнтованої на мінімізацію втрат при передачі енергії та зменшення залежності від централізованих джерел. За інформацією Міжнародної енергетичної агенції (IEA) [1], світове виробництво сонячної електроенергії продемонструвало суттєве зростання: з 99 ТВт·год у 2012 році до понад 1596 ТВт·год у 2023 році. Прогноз IEA передбачає подальше нарощування обсягів генерації сонячної енергії до понад 6000 ТВт·год до 2030 року, що підтверджує стійку тенденцію до декарбонізації та переходу до стійких джерел енергії. (рис. 1).

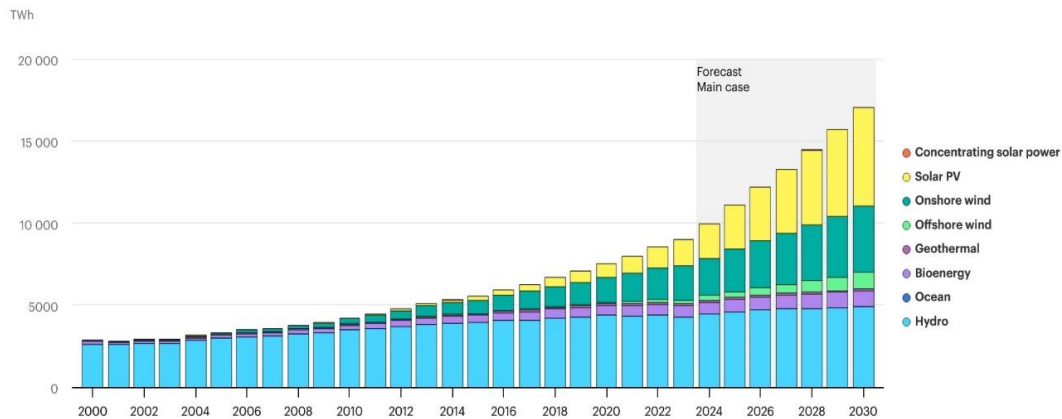


Рисунок - 1. Історичні дані та прогнози ІЕА для всіх секторів і технологій відновлюваної енергетики

Концепція розподіленої енергетики передбачає встановлення альтернативних джерел енергії компактних розмірів чи мобільної конструкції безпосередньо на території споживачів або поруч з нею. Потужність генерації таких джерел обирається з огляду на енергетичні потреби споживача та зазвичай становить від одиниць до сотень кВт, при цьому споживач залишається приєднаним до загальної мережі електропостачання, що дозволяє компенсувати брак енергії за несприятливих умов її генерації або навпаки, спрямовувати надлишкову енергію до мережі, якщо генерація перевищує власні потреби споживача. У розподілених системах дисбаланс між генерацією та споживанням енергії має систематичний характер, зважаючи на погодинну залежність добового споживання енергії (зумовлену виробничими процесами, побутовим споживанням, зарядкою електромобілів та ін.) та природні фактори, які впливають на її генерацію (хмарність, сила вітру). Зазвичай максимуми генерації та споживання не збігаються у часі – так, протягом світлового дня є сприятливі умови генерації сонячної енергії, але споживання для побутових потреб та зарядки електромобілів зростає саме у вечірні та нічні години. Ефективна комутація наявних джерел та систем накопичення енергії дозволяє не тільки знизити навантаження на енергосистему та мінімізувати кінцеву вартість електроенергії для споживача, але й забезпечити безперервне енергопостачання за умов, коли деякі з джерел стають недоступними з тих чи інших причин (пошкодження ліній електропередач, вихід з ладу обладнання, заходи з ремонту та технічного обслуговування, тощо).

У попередніх дослідженнях розглядалися різні методи комутації та управління системами, що містять кілька джерел енергії. Пропонувалися стратегії, що здійснюють вибір джерела на основі заданих пріоритетів, адаптивний вибір джерела, різні алгоритми розподілу навантаження між кількома джерелами. Так, у дослідженні [2] було розглянуто модель динамічного балансування навантаження між доступними джерелами живлення (звичайна загальна мережа, сонячні панелі та вітрові генератори) та споживачами енергії (зарядка електромобілів та майнінг криптовалют) на основі аналізу погодинного споживання, та проведено симуляцію цієї моделі. Основним висновком роботи є те, що застосовуючи проактивні стратегії управління електромережами, оператори енергосистем можуть забезпечити повну інтеграцію відновлюваних джерел енергії, зарядки електромобілів і операцій з видобутку криптовалют, зберігаючи при цьому стабільність і ефективність мережі. У роботі [3] запропоновано задачу оптимального керування системою управління енергією з урахуванням динаміки в генераторах і системах накопичення енергії. Компоненти електроенергії, включені в систему електроенергії, такі як генератор, шина, випрямляч і акумуляторна система, моделюються в цій задачі оптимального керування. На основі цього формулювання представлена триетапна архітектура оптимізації для отримання оптимальних політик керування. У [4] наведено детальний огляд літератури станом на 2024 рік щодо стратегій керування автоматичним керуванням генерацією (Automatic Generation Control, AGC) для енергетичних систем, що містять нові джерела енергії. Включення нових джерел в енергосистему значно впливає на її стабільність, надійність, економічність і безпеку. Щоб пом'якшити ці ефекти, важливо вибрати відповідну стратегію керування для AGC. Дослідження [4] зосереджено на всіх видах різних стратегій керування для нових енергоємних систем, таких як ПІД-регулювання, нечітке керування, керування штучною нейронною мережею тощо, а також порівнює та розглядає ці різні методи керування. Крім того, у цій роботі підсумовано та обговорено застосування інтелектуальних алгоритмів оптимізації та систем накопичення енергії для стратегій керування. Також обговорюються проблеми

та перспективні напрямки сучасних досліджень енергосистем з новими джерелами енергії.

В усіх наявних дослідженнях підключення альтернативних джерел здійснюються через єдину точку комутації. Тобто, є єдина комутаційна система, яка має $N > 1$ входів від джерел електропостачання та вихід, до якого підключається споживач енергії. Ця система приймає рішення щодо використання того чи іншого джерела та безпосередньо здійснює комутацію. Безумовна перевага такого підходу – це низька складність такої системи. Але вона має кілька суттєвих недоліків. Перш за все, така система являє собою єдину точку відмови. Самі джерела енергопостачання та лінії електропередач від них до споживача можуть бути продубльовані, що дозволяє здійснювати безперервне живлення у разі їхнього пошкодження. Але у разі відмови самої комутаційної системи внаслідок виникнення технічної несправності, пожежі, повені або інших форс-мажорних обставин можливо переривання електропостачання. Єдина точка комутації потребує фізичного під'єднання всіх наявних джерел до комутаційної системи. Таке підключення передбачається під час проектування об'єкта споживача, але будівництво та підключення нових джерел зазвичай не передбачено цим проектом. Зважаючи на можливі великі розміри як об'єкта споживача так само й альтернативних джерел генерації (так, потужність генерації сонячних панелей у середньому сягає 150 Вт/м^2 , що для забезпечення потужності живлення промислового підприємства 150 кВт потребує встановлення панелей загальною площею 1000 м^2), не завжди наявна технічна можливість розташування таких джерел поряд з точкою комутації. Окрім того, розглянуті у літературі методи комутації джерел та балансування навантаження не запроваджують моніторинг якості електричної енергії та відповідність її параметрів (напруга, частота, відхилення форми змінної напруги від синусоїдальної, стабільність у часі, тощо) вимогам стандартів. Такий безперервний моніторинг та накопичення статистичної інформації, як і саму фізичну комутацію кожного джерела до загальної мережі доречно здійснювати за допомогою автоматизованих систем на базі мікропроцесорних контролерів, які постійно обмінюються одна з одною

інформацією щодо параметрів відповідних джерел. Спираючись на цю інформацію, кожний контролер формує свій власний екземпляр єдиної розподіленої бази даних, яка використовується для прийняття рішень щодо комутації.

Висновки. Проведено аналіз існуючих методів інтеграції альтернативних джерел живлення у децентралізовані системи енергопостачання з урахуванням різноманітних критеріїв комутації (якість генерації, баланс наявного бюджету потужності генерації та потреб споживання, вартість виробництва енергії).

ЛІТЕРАТУРА/REFERENCE

1. The International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/renewable-energy-progress-tracker> (дата звернення: 11.04.2025)
2. Gül, O. Dynamic Load Flow in Modern Power Systems: Renewables, Crypto Mining, and Electric Vehicles. Sustainability 2025, 17, 2515.
3. DOI: 10.3390/su17062515
4. Y. Zhang, Y. Yu, R. Su and J. Chen, "Power Scheduling in More Electric Aircraft Based on an Optimal Adaptive Control Strategy," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 67, no. 12, pp. 10911-10921, Dec. 2020.
5. DOI: 10.1109/TIE.2019.2960718.
6. Ming Kuang, Youwen Tian, Qingyu Liu, et al. A Review of Control Strategies for Automatic Generation Control of Power Systems Containing New Energy Sources. Authorea. August 24, 2023. DOI: 10.22541/au.169285387.70260947/v1

METHODS FOR MANAGING THE CONNECTION OF ALTERNATIVE POWER

SOURCE TO EXISTING GRID

Marko Nalbandian, Valerij Mazurenko

Abstract. *Decentralization of electricity production is one of the most effective strategies to improve the reliability of energy supply systems. Nowadays, the most common energy model is one where the end user combines both consumption and production of energy using alternative sources. This raises a number of technical issues related to automatic generation control, assessment of the quality of energy from various sources, and robust switching of these sources. Existing methods of switching are designed for a single point of connection of all sources to the switching system, which significantly complicates the connection of new sources and the creation of a distributed power generation system. In order to improve the existing schemes, we propose a model that allows distributed connection of power sources to the grid at many switching points, ensures their synchronization and monitoring of the energy quality from each source.*

Keywords: *distributed system, alternative power sources, managing, method, automated system, switching, integration, quality, model.*