

О. М. ФЕДОСЕЄНКО

КЕРУВАННЯ ТА УПРАВЛІННЯ МІКРОМЕРЕЖЕВИМИ КЛАСТЕРАМИ: РОЗВИТОК ТА МАЙБУТНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Робота досліджує потенціал кластерної технології мікромереж та її вплив на вирішення проблем, пов'язаних з енергетикою та довкіллям. За останні десятиліття суттєво зросло зацікавлення у використанні мікромереж для забезпечення стійкості та надійності енергетичних систем, особливо з урахуванням зростаючого використання відновлювальних джерел енергії. Кластери мікромереж координують розподіл потужності між мікромережами та основною мережею, ефективно розв'язуючи проблеми, такі як підвищення напруги, гармоніки, низький коефіцієнт потужності, зворотні потоки потужності та недоліки в схемах захисту. Однак перед впровадженням кластеризації мікромереж потрібно подолати деякі виклики, особливо з точки зору проектування. У статті критично оглядаються проблеми проектування кластеризації мікромереж. Розглядаються переваги та виклики, що виникають у процесі розвитку мікромереж, зокрема проблема недостатньої адаптації до великомасштабних джерел відновлювальної енергії. У дослідженні аналізуються різні архітектури мікромережових кластерів та методи їх взаємодії. Класифікація кластера мікромережі проведена за різними архітектурами на основі розташування з'єднань. Також проводиться порівняння різних технологій передачі електроенергії в межах мікромережових кластерів, зокрема систем змінного струму та постійного струму, з оцінкою переваг і недоліків кожної технології. Значну увагу приділяється контролю та керуванню мікромережовими кластерами, висвітлюються можливості ієрархічних та розподілених структур управління для забезпечення оптимального розподілу потужності та регулювання напруги та частоти. На завершення статті розглядаються перспективні напрями подальших досліджень, спрямованих на поліпшення інтеграції великомасштабних джерел відновлювальної енергії, розробку інтелектуальних систем управління та енергоменеджменту, а також створення надійних систем контролю та керування мікромережовими кластерами.

Ключові слова: мікромережові кластери, відновлювальна енергія, енергозбереження, архітектури мікромереж, технології передачі електроенергії, контроль та керування, ієрархічна структура управління, розподілена структура управління, надійність та ефективність мікромережових кластерів.

О. М. ФЕДОСЕЄНКО

CONTROL AND MANAGEMENT OF MICROGRID CLUSTERS: DEVELOPMENT AND FUTURE RESEARCH

The paper explores the potential of microgrid clustering technology and its impact on addressing energy and environmental challenges. Over the past decades, there has been a significant interest in using microgrids to ensure stability and reliability in power systems, especially considering the increasing utilization of renewable energy sources. Microgrid clusters coordinate power distribution between microgrids and the main grid, effectively addressing issues such as voltage rise, harmonics, low power factor, power backflows, and deficiencies in protection schemes. However, before implementing microgrid clustering, certain challenges need to be overcome, particularly in terms of design considerations. The paper critically reviews the design challenges of microgrid clustering, highlighting the advantages and challenges that arise during the development of microgrids, especially the problem of inadequate adaptation to large-scale renewable energy sources. The research analyzes various architectures of microgrid clusters and methods of their interaction. The classification of microgrid clustering is based on different architectures according to connection locations. Additionally, a comparison of different power transmission technologies within microgrid clusters, such as alternating current and direct current systems, is conducted with an assessment of the advantages and disadvantages of each technology. Considerable attention is given to the control and management of microgrid clusters, elucidating the possibilities of hierarchical and distributed management structures to ensure optimal power distribution and voltage and frequency regulation. In conclusion, the paper examines promising directions for further research aimed at enhancing the integration of large-scale renewable energy sources, developing intelligent management and energy management systems, as well as establishing reliable control and management systems for microgrid clusters.

Keywords: microgrid clusters, renewable energy, energy conservation, microgrid architectures, electricity transmission technologies, control and management, hierarchical management structure, distributed management structure, reliability and efficiency of microgrid clusters.

Вступ. Зі зростанням розповсюдження розподілених джерел енергії, традиційна концепція мікромереж розвивається у напрямку кластеризації мікромереж, яка розбиває розподільчу систему на взаємопов'язані мікромережі з метою покращення стабільності, надійності та ефективності. Кластери мікромереж координують розподіл потужності між мікромережами та основною мережею, ефективно розв'язуючи проблеми, такі як підвищення напруги, гармоніки, низький коефіцієнт потужності, зворотні потоки потужності та недоліки в схемах захисту. Однак перед впровадженням кластеризації мікромереж потрібно подолати деякі виклики, особливо з точки зору проектування. У цій статті критично оглядаються проблеми проектування кластеризації мікромереж, класифікуються багато-мікромережі за різними архітектурами на основі

розташування з'єднань, оцінюються техніки керування, які застосовуються в кластеризації мікромереж, та представляються аспекти захисту багато-мікромереж. Висвітлюються можливі напрями подальших досліджень для поліпшення експлуатаційних аспектів кластерів мікромереж.

Попит на електроенергію постійно зростає, тоді як наявність копалин зменшується [1]. Це призвело до непередбачуваних змін в цінах на електроенергію [2]. Однак, з огляду на зростаючі занепокоєння через викиди парникових газів та необхідність в сталих джерелах енергії, відновлюване виробництво електроенергії здобуває все більшу увагу як засіб вдоволення майбутніх потреб в енергії [3]. Крім залежності від енергії та ризиків, пов'язаних із енергетичними дефіцитами, проблема впливу на довкілля у системах електропостачання є значущою

© О. М. Федосеєнко, 2023

проблемою [3], яка стає все більш важливою в суспільстві. Ризик енергетичних криз набуває особливої актуальності в разі відключення електроенергії, що може статися через технічні проблеми в електричній мережі, природні катастрофи або політичні конфлікти [4]. Такі кризи можуть призвести до значних економічних втрат та становити загрозу безпеці країни.

У зв'язку з цим, розподілені джерела енергії, такі як сонячна, вітрова, гідроелектрична та геотермальна енергія, отримали широке визнання як сталі, екологічно чисті та економічно вигідні альтернативи традиційних джерел енергії. Використання цих розподілених джерел енергії сприяє зменшенню залежності від імпорту палива, зменшенню викидів парникових газів та поліпшенню енергетичної незалежності.

Однак, на шляху до повної інтеграції розподілених джерел енергії є деякі виклики. Наприклад, незалежність від погодних умов і недостатність потужності можуть стати перешкодами для надійної постачання енергії [3]. Інтелектуальні системи керування та управління можуть вирішити ці проблеми шляхом ефективного керування розподіленими джерелами енергії, зберіганням енергії та управлінням споживачами енергії.

Крім того, важливим аспектом впровадження розподілених джерел енергії є інфраструктура зарядних станцій для електромобілів. Зростаюча популярність електромобілів потребує розширення мережі зарядних станцій для забезпечення зручного та доступного заряджання. Розробка інноваційних рішень у сфері енергетики та мобільності є важливим завданням для створення сталої та екологічно чистої енергетичної системи [3, 5].

Одним з викликів, пов'язаних з розподіленими джерелами енергії, є питання енергоефективності та зменшення втрат енергії в процесі передачі та конвертації. При використанні розподілених джерел енергії, які зазвичай розташовані ближче до місця споживання, важливо забезпечити мінімальні втрати енергії при передачі до кінцевих споживачів [5]. Це може вимагати вдосконалення систем передачі та розподілу електроенергії, використання ефективних технологій кабелів, трансформаторів та інших пристроїв.

Крім того, розвиток сховищ енергії є ще одним важливим аспектом. Сховища енергії дозволяють зберігати надлишкову енергію, що виробляється з розподілених джерел, для використання у періоди низького виробництва або пікового споживання [6]. Такі сховища можуть включати батареї, теплові акумулятори, системи зберігання газу чи стисненого повітря, які забезпечують гнучкість та стабільність постачання енергії [7].

Для подальшого розвитку розподілених джерел енергії також потрібні правильні регуляторні політики та підтримка з боку уряду. Це може включати стимулюючі програми, фінансові пільги, тарифні структури, що сприяють використанню розподілених

джерел енергії, а також встановлення стандартів ефективності та безпеки [5].

Узагалі, розподілені джерела енергії відіграють важливу роль у переході до сталої та екологічно чистої економіки. Однак, існують деякі виклики і питання, які потрібно вирішувати для подальшого розвитку цієї сфери.

Один з таких викликів полягає у забезпеченні стабільності постачання енергії з розподілених джерел. Оскільки розподілені джерела енергії, такі як сонячна чи вітрова, залежать від природних умов (погодних умов, денної та нічної пори), важливо мати механізми для балансування постачання та попиту на енергію [3, 5]. Це може включати використання сховищ енергії, акумуляційних систем, удосконалення прогнозування погодних умов та розвиток інтелектуальних систем управління енергорозподілом.

Іншим важливим питанням є інтеграція розподілених джерел енергії усередину існуючої енергетичної інфраструктури. Наразі більшість енергетичних систем побудовані на централізованому принципі залежності від великих електростанцій та мереж передачі [5]. Для успішної інтеграції розподілених джерел енергії потрібно вирішити технічні та регуляторні аспекти, що стосуються підключення, управління та координації роботи різних джерел енергії.

Також, важливо враховувати економічні аспекти розподілених джерел енергії. Втілення нових технологій та інфраструктури може потребувати значних інвестицій. Однак, з часом, завдяки технологічному прогресу, витрати на розподілені джерела енергії можуть знизитися.

Мета статті. Метою цієї статті є розгляд технологій кластерів мікромереж та її використання для вирішення проблем, пов'язаних з надійністю та ефективністю енергетики, особливо у контексті використання відновлювальних джерел енергії. Автори мають на меті проаналізувати переваги та виклики, пов'язані з розвитком мікромереж, і дослідити різні архітектури та методи взаємодії мікромережових кластерів. Метою є порівняти різні технології передачі електроенергії в межах кластерів мікромереж та проаналізувати їх переваги й недоліки. Особлива увага приділяється також контролю та керуванню мікромережевими кластерами, а також висвітлюються напрямки майбутніх досліджень, спрямовані на поліпшення інтеграції великомасштабних відновлювальних джерел енергії та розробку надійних систем управління мікромережевими кластерами.

Виклад основного матеріалу. Екологічні проблеми та зростаючий попит на електроенергію сприяють розвитку технологій мікромереж, які можуть працювати в режимі змінного (AC), постійного (DC) або змішаного змінного/постійного струму (AC/DC) [8–10]. Незважаючи на те, що розвиток мікромереж стає все більш повним, все ще існують певні виклики, такі як відсутність поглинаючої здатності для технологій відновлюваної енергії великого масштабу.

Тим часом, розвиток систем зберігання енергії та електромобілів потребує невідкладного впровадження розумних технологій мікромереж.

Тим часом, мікромережевий кластер – це метод самовідновлення та переконфігурації, який розбиває розподільну мережу на менші, керовані сітки. Він поєднує кілька мікромереж, розташованих близько одна до одної, створюючи мережу взаємопов'язаних мікромереж. Це має кілька економічних переваг як для мережі постачання, так і для мікромереж, включаючи підвищену надійність, стабільність та зниження витрат [11].

Коли головна мережа відмовляє, окремі мікромережі можуть мати проблеми зі забезпеченням попиту через інтермітентну природу розподіленого покоління енергії на основі відновлювальних джерел. Для вирішення цієї проблеми мікромережі в кластері можуть підтримувати одна одну під час автономної роботи за допомогою взаємопідключень. На рис. 1 показано приклад мікромережевого кластера, який складається з двох мікромереж [12]. Однак, підключення кількох мікромереж до кластера вимагає надійної системи управління та енергоменеджменту для забезпечення безпечної та ефективної роботи всього кластера як у підключеному до мережі, так і в автономному режимі.

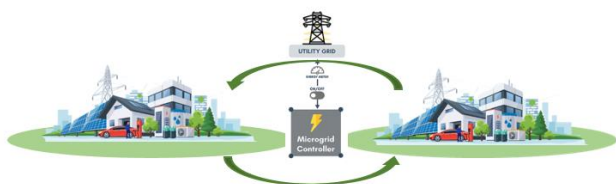


Рисунок 1 – Кластер, який складається з двох мікромереж

Архітектуру мікромережевих кластерів можна класифікувати на три типи залежно від структури мережі: паралельне підключення, кільцеве підключення та коміркове підключення. У паралельній архітектурі (рис. 2, 3) мікромережі підключаються паралельно до головної мережі за принципом радіальної архітектури, за розгалуженою топологією або топологією «зірка». У топології «зірка» (рис. 2) кілька мікромереж підключаються до головної мережі через спільну шину. Це дозволяє передавати надлишкову потужність до сусідніх мікромереж або головної мережі, а також заповнювати дефіцит потужності з сусідніх мікромереж або головної мережі.

У радіальній топології (рис. 3) більші мікромережі безпосередньо підключені до основної мережі, тоді як менші мікромережі підключені до великої мікромережі через окрему загальну шину, що дозволяє обмінюватися електроенергією через основну мережу.



Рисунок 2 – Архітектура кластеру мікромереж топологією «зірка»

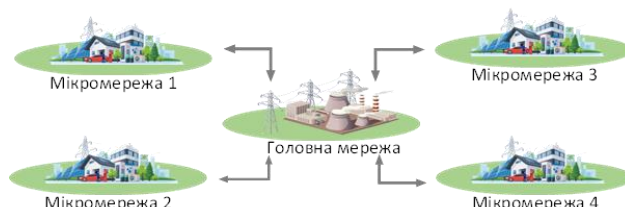


Рисунок 3 – Архітектура кластеру мікромереж радіальної топології

У кільцевій архітектурі кожна мікромережа підключена до двох сусідніх мікромереж у формі кільця, що дозволяє обмінювати енергію та інформацію між ними. Кільцева мережа має покращену надійність та стабільність у порівнянні з радіальною структурою, але керування та захист системи ускладнюється через наявність кількох шляхів для обміну електроенергією.

Мікромережі в кластерах також можуть мати мережеву архітектуру «мережа» (mesh), де всі мікромережі взаємопідключені, створюючи складну мережу. У такому типі конфігурації кожна мікромережа підключена до сусідніх мікромереж за допомогою мережі передачі електроенергії та зв'язку, як показано на рис. 4. В результаті кожна мікромережа може обмінюватися електроенергією з основною мережею та сусідніми мікромережами, що призводить до покращення експлуатаційних характеристик збільшенням стабільності та надійності завдяки зайвим з'єднанням. Однак керування та захист такої складної мережі є викликом. Розподіл та планування розподіленого виробництва в кожній мікромережі залежить від всіх підключених мікромереж та їхнього місцевого попиту та постачання, що ускладнює керування обміном електроенергії.



Рисунок 4 – Кільцева архітектура кластеру мікромереж

Табл. 1 порівнює різні архітектури кластерів мікромереж за різними факторами. Таблиця оцінює зростаючу потужність кластера, потужність зростання окремої мікромережі, загальну масштабованість та складність, пов'язану з кожною архітектурою.

Таблиця 1 – Порівняння архітектури кластерів мікромереж

| Архітектура | Зростання кластера мікромереж | Зростання окремої мікромережі | Загальна масштабованість | Складність |
|-------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------|------------|
| Паралельна | Низька | Середня | Низька | Низька |
| Кільцева | Висока | Середня | Середня | Середня |
| Коміркова | Висока | Висока | Висока | Висока |

Лінійні технології, що використовуються у кластерах мікромереж, можуть бути змінного струму (AC), постійного струму (DC) або гібридними [8–10]. Табл. 2 надає порівняння цих технологій. Системи змінного струму дозволяють змінювати рівень напруги та ізоляцію за допомогою трансформаторів, використовуючи встановлені методи захисту. Однак вони вимагають контролю потужності та частоти, є вразливими до тимчасових та динамічних порушень стабільності та супроводжуються високими експлуатаційними витратами через втрати, ефект скину та діелектричні втрати [9, 10]. Вони також потребують синхронізму та страждають від великих коливань потужності, що робить їх придатними тільки для коротких відстаней (<50 км).

Таблиця 2 – Порівняння технологій змінного (AC) та постійного струму (DC) при їх використанні у кластерах мікромереж

| Система | Переваги | Недоліки |
|--------------------------------|---|---|
| Системи змінного струму (AC) | <ul style="list-style-type: none"> • зміна рівня напруги • ізоляція за допомогою трансформаторів • використання встановлених методів захисту | <ul style="list-style-type: none"> • потребують контролю потужності та частоти, • вразливі до тимчасових та динамічних нестабільностей, • високі експлуатаційні витрати через втрати, ефект скину та діелектричні втрати • потребують синхронізму • страждають від великих коливань потужності |
| Системи постійного струму (DC) | <ul style="list-style-type: none"> • вища ефективність зі зменшеними втратами та меншою кількістю конверсійних ступенів • краща тимчасова та динамічна стабільність без електромагнітних перешкод • нижчі експлуатаційні витрати, пов'язані з провідниками та ізоляцією. | <ul style="list-style-type: none"> • інтерфейси є вартісними • складно встановлювати несправності через відсутність точки перетину з нулем. |

З іншого боку, системи постійного струму (DC) мають вищу ефективність зі зменшеними втратами та меншою кількістю конверсійних ступенів. Вони пропонують кращу тимчасову та динамічну стабільність без електромагнітних перешкод та нижчі експлуатаційні витрати, пов'язані з провідниками та ізоляцією. Однак їхні інтерфейси є вартісними, а встановлення несправностей складне через відсутність точки перетину з нулем [8].

Для підключення різних лінійних технологій загальноприйнятим є використання силових трансформаторів та електронних перетворювачів потужності. Силові трансформатори надають надійний та економічний спосіб зміни рівнів напруги в системах змінного струму (AC/AC) [9, 10]. Однак вони мають обмежену можливість керування та експлуатаційну продуктивність. З іншого боку, перетворювачі потужності електроніки мають кращу регуляцію напруги та високу контрольованість напруги. Вони можуть використовуватись для підключення будь-якої лінійної технології, будь то AC/AC, AC/DC або DC/DC. Однак вони мають певні недоліки, такі як вимоги до захисту, залежність від комунікації та високі витрати [8].

Досягнення оптимального розподілу потужності та регулювання напруги і частоти в кластері мікромереж може бути складною задачею через різні режими роботи та архітектури системи. Для цього застосовуються дві основні структури керування: ієрархічна та розподілена.

Ієрархічна структура керування розподіляє цілі керування на три рівні керування (Табл. 3). Первинний рівень керування відповідає за місцеві операції керування, такі як регулювання напруги та частоти, керування активною та реактивною потужністю, виявлення відключення від основної мережі та місцевий захист. Другий рівень керування забезпечує регулювання напруги та частоти через відхилення, спричинені діями керування на первинному рівні [11]. Крім того, він здійснює синхронізацію з мережею, оптимальну роботу розподілених джерел енергії та управління енергією в реальному часі. Третій рівень керування, у співпраці з розподіленим оператором електричних мереж, здійснює ринкові операції, такі як економічний розподіл та зобов'язання щодо одиниць потужності.

Розподілена структура керування складається з двох рівнів. У розподіленому первинному рівні керування, мікромережі керують регулюванням напруги, струму і частоти, виявленням ізолюваності, синхронізацією мережі та керуванням навантаженням в повній розподіленій формі. На другому рівні керування, кожна мікромережа обмінюється інформацією з іншими мікромережами та розподіленим оператором електричних мереж для виконання ринкових операцій та оптимального потоку енергії [11, 12].

Таблиця 3 – Ієрархічне управління мікромережами

| Рівень управління | Функції | Час відгуку, с |
|--------------------|---|----------------|
| Третинний контроль | <ul style="list-style-type: none"> Економічне розподіл Енергоменеджмент Управління перевантаженням | 20–300 |
| Вторинний контроль | <ul style="list-style-type: none"> Відновлення напруги Відновлення частоти (змінний струм) Покращення розподілу потужності | 2–10 |
| Первинний контроль | <ul style="list-style-type: none"> Стабільність напруги Стабільність частоти (змінний струм) Розподіл потужності Якість електропостачання | 0,2–1 |

Хоча ієрархічна стратегія керування може забезпечити кращу економічну експлуатацію кластера мікромереж, вона не підтримує зростання кластера мікромереж. З іншого боку, розподілена стратегія керування пропонує більшу гнучкість та масштабованість, дозволяючи реалізувати функціональність «підключи та працюй».

Майбутні дослідження у технології кластерів мікромереж можуть зосередитися на кількох ключових напрямках. По-перше, вирішення проблеми відсутності поглинальної потужності для великомасштабних технологій відновлювальної енергії у мікромережах є важливим. Можна розглянути розробку стратегій для поліпшення інтеграції та використання джерел відновлювальної енергії, таких як передові техніки прогнозування та оптимізовані методи планування. По-друге, потрібно вирішити питання стосовно потреби у розумних технологіях мікромереж, з урахуванням розвитку систем енергозбереження та електромобілів. Дослідження можуть спрямовуватися на покращення інтелектуалізації та автоматизації мікромереж за допомогою передових алгоритмів керування, машинного навчання та методів оптимізації в реальному часі. По-третє, необхідно розробити надійні системи керування та управління енергією для забезпечення безпечної та ефективної роботи кластерів мікромереж. Це може включати дослідження нових стратегій керування, протоколів комунікації та розподілені механізми координації для покращення продуктивності та стійкості.

Висновки. Розглянуто різні аспекти кластерів мікромереж, які розбивають систему розподілу на взаємопов'язані мікромережі для поліпшення стійкості, надійності та ефективності. Досліджено різні лінійні технології, використані в кластерах мікромереж, переваги та недоліки кожної технології, а також те, як вони взаємопов'язані за допомогою потужнісних трансформаторів та потужнісно-електронних перетворювачів. Крім того, обговорено проблеми, пов'язані з оптимальним розподілом потужності та регулюванням напруги та частоти в кластерах мікромереж, а також те, як їх можна

вирішити за допомогою ієрархічних та розподілених стратегій керування. Нарешті, розглянуто виклики, пов'язані з проектуванням кластерів мікромереж, класифікацію багатомікромережових архітектур, оцінку звітованих технік керування та аспекти захисту багатомікромережових систем. Також виділені напрямки майбутніх досліджень для покращення експлуатаційних аспектів кластерів мікромереж.

Список літератури

- Ahmad T., Zhang D. A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand: the story told so far. *Energy Reports*. 2020. Vol. 6. P. 1973–1991. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.07.020>.
- Martins F., Felgueiras C., Smitkova M., Caetano N. Analysis of fossil fuel energy consumption and environmental impacts in european countries. *Energies*. 2019. Vol. 12, no. 6. 964. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12060964>.
- Lau L. C., Lee K. T., Mohamed A. R. Global warming mitigation and renewable energy policy development from the Kyoto Protocol to the Copenhagen Accord—A comment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16, no. 7. P. 5280–5284. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.006>.
- Hutter C., Weber E. Russia-Ukraine war: short-run production and labour market effects of the energy crisis. *IAB-Discussion Paper*. 2022. No. 10. DOI: <https://doi.org/10.48720/IAB.DP.2210>.
- Sinsel S. R., Riemke R. L., Hoffmann V. H. Challenges and solution technologies for the integration of variable renewable energy sources—a review. *Renewable Energy*. 2020. Vol. 145. P. 2271–2285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.147>.
- Heinemann N., Alcalde J., Miocic J. M. et al. Enabling large-scale hydrogen storage in porous media – the scientific challenges. *Energy & Environmental Science*. 2021. Vol. 14, no. 2. P. 853–864. DOI: <https://doi.org/10.1039/d0ee03536j>.
- Choudhury S. Review of energy storage system technologies integration to microgrid: types, control strategies, issues, and future prospects. *Journal of Energy Storage*. 2022. Vol. 48. 103966. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.103966>.
- de Oliveira-Assis L., García-Triviño P., Soares-Ramos P. P. et al. Optimal energy management system using biogeography based optimization for grid-connected MVDC microgrid with photovoltaic, hydrogen system, electric vehicles and Z-source converters. *Energy Conversion and Management*. 2021. Vol. 248. 114808. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114808>.
- Nejabatkhah F., Li Y. W. Overview of power management strategies of hybrid AC/DC microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2015. Vol. 30, no. 12. P. 7072–7089. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpel.2014.2384999>.
- Fu Y., Zhang Z., Li Z., Mi Y. Energy management for hybrid AC/DC distribution system with microgrid clusters using non-cooperative game theory and robust optimization. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2020. Vol. 11, no. 2. P. 1510–1525. DOI: <https://doi.org/10.1109/tsg.2019.2939586>.
- Muhtadi A., Pandit D., Nguyen N., Mitra J. Distributed energy resources based microgrid: review of architecture, control, and reliability. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2021. Vol. 57, no. 3. P. 2223–2235. DOI: <https://doi.org/10.1109/tia.2021.3065329>.
- Ranjbar S., Al-Sumaiti A. S., Sangrody R., Byon Y.-J., Marzbani M. Dynamic clustering-based model reduction scheme for damping control of large power systems using series compensators from wide area signals. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2021. Vol. 131. 107082. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107082>.

References

- T. Ahmad and D. Zhang, “A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand: The story told so far,” *Energy Reports*, vol. 6, p. 1973–1991, Nov. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.07.020>.
- F. Martins, C. Felgueiras, M. Smitkova, and N. Caetano, “Analysis of fossil fuel energy consumption and environmental impacts in

- European countries,” *Energies*, vol. 12, no. 6, Mar. 2019, Art. no. 964, doi: <https://doi.org/10.3390/en12060964>.
3. L. C. Lau, K. T. Lee, and A. R. Mohamed, “Global warming mitigation and renewable energy policy development from the Kyoto Protocol to the Copenhagen Accord—A comment,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 7, p. 5280–5284, Sep. 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.006>.
 4. C. Hutter and E. Weber, “Russia-Ukraine war: Short-run production and labour market effects of the energy crisis,” *IAB-Discussion Paper*, no. 10, May 2022, doi: <https://doi.org/10.48720/IAB.DP.2210>.
 5. S. R. Sinsel, R. L. Riemke, and V. H. Hoffmann, “Challenges and solution technologies for the integration of variable renewable energy sources—a review,” *Renewable Energy*, vol. 145, p. 2271–2285, Jan. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.147>.
 6. N. Heinemann et al., “Enabling large-scale hydrogen storage in porous media – the scientific challenges,” *Energy & Environmental Science*, vol. 14, no. 2, p. 853–864, 2021, doi: <https://doi.org/10.1039/d0ee03536j>.
 7. S. Choudhury, “Review of energy storage system technologies integration to microgrid: Types, control strategies, issues, and future prospects,” *Journal of Energy Storage*, vol. 48, Apr. 2022, Art. no. 103966, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.103966>.
 8. L. de Oliveira-Assis et al., “Optimal energy management system using biogeography based optimization for grid-connected MVDC microgrid with photovoltaic, hydrogen system, electric vehicles and Z-source converters,” *Energy Conversion and Management*, vol. 248, Nov. 2021, Art. no. 114808, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114808>.
 9. F. Nejabatkhah and Y. W. Li, “Overview of power management strategies of hybrid AC/DC microgrid,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 12, p. 7072–7089, Dec. 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/tpel.2014.2384999>.
 10. Y. Fu, Z. Zhang, Z. Li, and Y. Mi, “Energy management for hybrid AC/DC distribution system with microgrid clusters using non-cooperative game theory and robust optimization,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 2, p. 1510–1525, Mar. 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/tsg.2019.2939586>.
 11. A. Muhtadi, D. Pandit, N. Nguyen, and J. Mitra, “Distributed energy resources based microgrid: Review of architecture, control, and reliability,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 57, no. 3, p. 2223–2235, May 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/tia.2021.3065329>.
 12. S. Ranjbar, A. S. Al-Sumaiti, R. Sangrody, Y.-J. Byon, and M. Marzband, “Dynamic clustering-based model reduction scheme for damping control of large power systems using series compensators from wide area signals,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 131, Oct. 2021, Art. no. 107082, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107082>.

Надійшла (received) 19.07.2023

Відомості про автора (-ів) / About the Author (-s)

Федосєнко Олена Миколаївна (Olena Fedoseienko) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри передачі електричної енергії; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3701-381X>; e-mail: olena.fedoseienko@khp.edu.ua.