

ПРИСТРОЇ ТА СИСТЕМИ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

Д. А. Маєвський, О. Ф. Винаков, О. А. Кетрарь
Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. В статті проведено огляд поточного стану та перспектив розвитку пристроїв та систем розподіленої генерації. Проведено аналіз основних джерел розподіленої генерації, виконано порівняння цих джерел та показано перспективи їх розвитку в Україні. Доведено необхідність приділяти увагу сучасним методам акумулювання енергії. Дано пропозиції щодо подальших досліджень систем розподіленої генерації. Зроблено висновок, що системи розподіленої генерації можуть значно підвищити надійність систем електропостачання та їх стійкість до негативних впливів.

Ключові слова: розподілена генерація; електрична система; сонячна енергетика; сонячні електростанції, вітроенергетика; модульні ядерні реактори; інтелектуальні мережі.

Вступ

В статті проведено огляд сучасних пристроїв розподіленої генерації. Розподілена генерація (РГ) - це процес виробництва електроенергії, який включає в себе генерацію електроенергії в різних джерелах та її подальше розподілення між споживачами.

Метою статті є побудова підходів до створення надійних та стійких систем електропостачання, таких, що часткова або повна руйнація будь-якої її частини не вплине на працездатність усієї системи.

Події, що сталися у 2022 році в Україні - напад країни агресора, бомбардування цивільних та енергетичних об'єктів, «блек ауті» - це все має трагічні наслідки, але це все розкрило що діюча енергетична система має, окрім переваг, велику кількість недоліків. Вихід з ладу крупного джерела електропостачання (електростанції або вузлової підстанції) тягне за собою знеструмлення досить великої кількості електроспоживачів. Це має суттєві наслідки для економіки та життєдіяльності людей. Тому питання використання пристроїв розподіленої генерації як джерел електричної енергії, що здатні забезпечити споживачів електроенергією нормуючої якості та в необхідному обсязі, має дуже велику актуальність!

Джерела розподіленої генерації – це джерела електричної енергії, які з'єднанні безпосередньо з розподіленою електричною мережею або підключені до такої мережі зі сторони електроспоживачів [1,3].

© Маєвський Д. А., Винаков О.Ф., Кетрарь О.А., 2023

Можна виділити такі основні джерела розподіленої генерації:

- Сонячна енергетика;
- Вітрова енергетика;
- Гідроенергетика - малі гідроелектростанції;
- Теплоенергетика - твердопаливні ТЕЦ;
- Генератори (дизель, бензин, газ);
- Генератори на основі біомаси;
- Модульні ядерні реактори.

Сучасний стан розподіленої генерації

Використання джерел розподіленої генерації має актуальність вже багато років. Так, наприклад, у статті [1] зроблено висновки про те, що: джерела розподіленої генерації мають різноплановий вплив на електричні мережі. Там же звернено увагу на те, що впровадження РГ потребує перегляду стратегії керування, організації експлуатації та планування розвитку електричних мереж. Основними задачами в плані розвитку систем РГ автори [1] вважають мінімізацію втрат електричної енергії в електромережах, нормалізацію рівня напруги в вузлах, підвищення надійності електроживлення споживачів, попередження про можливі помилки у плануванні електричних мереж та забезпечення їх ефективного використання.

В роботі [2] автори стверджують, що модернізація сучасних систем електропостачання та розвиток розосереджених джерел електроенергії тісно пов'язані з технологіями SmartGrid. Планований техніко-економічний ефект від впровадження розосереджених джерел електроенергії може бути досягнутий шляхом узгодження в часі оптимізації процесів вироблення, транспортування і споживання електроенергії.

У статті [4] розглянуто побудову інтелектуальних електричних мереж SmartGrid, введено поняття мікромережі (Microgrid) як енергосистеми невеликого масштабу, що працює як автономно, так і як сегмент основної електромережі.

Можна вважати, що ідея побудови великої електричної мережі на базі напівавтономних мікромереж, яку висловлено в [4], може бути взята за основу побудови концепції систем розподіленої генерації.

Сьогодні знаходять широке застосування локальні системи Microgrid. Проблема оптимізації підключення малих виробників енергії до загальної мережі – це проблема відсутності ефективних технологій. Дослідження в цій області розпочав Роберт Х. Лассетер (Robert H. Lasseter), професор електротехніки Вісконтського університету в Медісоні (США) [3]. Переваги мікромережових технологій – зниження втрат енергії, зростання ефективності та доступності надійного високоякісного енергопостачання. Локальна система Microgrid включає, як правило, кілька джерел генерації та розподільчих підстанцій, комплекси збереження енергії, регулятори потоків електроенергії, що дозволяє Microgrid функціонувати як в автономному режимі, так і бути зв'язаною із зовнішньою енергосистемою. Microgrid забезпечує підвищення надійності енергопостачання за рахунок оперативного перемикання споживачів між загальною енергосистемою і місцевими джерелами енергії у випадку перевантажень та стрибків напруги. Перевагами мікромережових технологій є їхня легка та швидка адаптація до споживачів на противагу централізованим системам енергопостачання. Координація систем Microgrid в інтелектуальній мережі здійснюється на різних рівнях напруги за допомогою:

- Центру керування групою Microgrid (висока напруга розподіленої мережі);
- Microgrid координатора (Smart концентратор) (середня та низька напруга);
- Головної системи керування Microgrid (середня та низька напруга).

Фактично системи Microgrid вимагають створення «центральної нервової системи» для керування операціями розподілу ресурсів у своїй зоні: розосереджені ресурси повинні бути об'єднані та оптимізовані; ресурси повинні з'явитися у системних операторів як «віртуальні генератори», що є інтегровані в систему постачання. Наприклад, «Головна система керування Microgrid включає розосереджену

генерацію, керовані навантаження, розосереджене акумулювання енергії».

У статті [5] автори розглядають проблеми сумісної праці об'єктів розподіленої генерації з загальною мережею. Сучасні методи оптимізації засновані на інформаційно-комунікаційних технологіях. Вказується також, що не всі роботи з планування майбутніх енергосистем завершено, і тому інтенсивні дослідження повинні, як і раніше, проводитися, щоб зробити такі передові системи реальністю.

Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) можуть підключатися до електричних мереж, але такі розподілені генератори класично вважалися додатковими енергоблоками з низькою керованістю операторів системи передачі/розподілу електроенергії [5]. Ця некерованість не дозволяє ефективно використання потужності РГ. Системи РГ зазвичай підключені ближче до кінцевих споживачів порівняно з великими електростанціями, що дозволяє знизити загальні транспортні втрати.

Автори припускають, що мікромережі відіграватимуть важливу роль в електричних мережах майбутнього, в основному в розподільчих мережах низької напруги, де підключено переважну більшість систем РГ. Мікромережа концептуально розглядається як дрібномасштабна мережа, утворена системами РГ, пристроями акумулювання електроенергії та навантаженнями, електрично пов'язаними між собою та ієрархічно керованими. Мікромережа здатна працювати або як підключена до мережі, або як навмисно ізольована система [6].

У доповненні до генераторів, системи накопичення електроенергії також вважаються дуже важливими в мікромережах, особливо якщо відновлювані джерела енергії, що характеризуються наявністю стохастичної і переривистої поведінки [7], є основними енергетичними джерелами в мікромережі. В системах накопичення електроенергії найчастіше використовуються акумуляторні батареї. Тому, зі збільшенням ролі ВДЕ у РГ виникає проблема сировини. У статті [8] автори показують, що практично всі дослідження у цій галузі виявляють критичні межі доступності матеріалів».

Всебічний огляд критичності матеріалів для енергетичного переходу представлений Лундаєвим та ін. [9]. Цей аналіз ідентифікує сурму, хром, індій, марганець, молібден, нікель, срібло, цинк та цирконій як мінерали, які можуть серйозно обмежити перехід енергії без належного втручання, заміни матеріалів чи

значного відкриття нових ресурсів. Наприклад, попит на нікель до 2040 може скласти більше 200% від його попиту на 2020 через потребу в застосуванні акумуляторів для електромобілів і комунальних послуг [10]; проте нинішні запаси/ресурси можуть бути виснажені приблизно через чотири десятиліття навіть за рівня видобутку в 2020 [9].

За даними Greimetal., вилучення літію може досягти матеріальних меж у другій половині цього століття. [11]. Але Богданов у [12] і Халілі у [13] показують вихід із цієї ситуації не вступаючи в суперечність із ресурсною базою літію. Один із варіантів ґрунтується на надзвичайно високих показниках збору та переробки, близьких до 100%, що в кінцевому підсумку стане обов'язковим, що призведе до майже безвідходної економіки літієвих батарей, порівнянної з нинішнім станом свинцево-кислотних батарей. Другий варіант полягає у значному зниженні вартості вилучення літію з океанської води. Підраховано, що в океанах міститься у 6000 разів більше літію, ніж у суші, оскільки це шостий за поширеністю розчинений іон металу у океанах [14]. Нові дослідження дають надію, що видобуток літію з океану може стати відносно дешевим [15], [16].

Як вказує Kleijnetal. [17], матеріали можуть стати короткочасним вузьким місцем для енергетичного переходу, оскільки проекти з видобутку корисних копалин мають довший час виконання, часто близько 10–20 років.

Сучасні системи РГ мають більш високу керованість та ступінь працездатності порівняно із звичайними генераторами. Ця особливість дозволить цим системам відігравати головну і вирішальну роль у підтримки стійкості електричних мереж у майбутньому [5].

У разі збільшення ролі ВДЕ в мікромережах виникає проблема стабільності роботи енергосистеми. Як вказується в [18], стабільність енергосистеми може бути визначена як здатність енергосистеми підтримувати прийнятний стан та відновлювати рівновагу після збурення.

Основними змінними станами є частота системи живлення, напруга шини та кути ротора. [19]. Для забезпечення стабільності змінюються нормативи роботи електричних мереж. Якщо у перших блоках РГ нормативи вимагали їх відключення у разі виникнення порушень у мережі [20], то у сучасних мережах цей режим роботи більше не дозволено. Наприклад в [21] потрібно, щоб вітряні електростанції залишалися підключеними до електромережі при збоях в мережі. В деяких країнах ці вимоги були також поширені на фотоелектричні системи [22]. «В

більшості країн в даний час не дозволено створювати “острівці” під напругою при відключенні основної електричної мережі, щоб уникнути ризику [5]. Однак у майбутньому все може змінитися [23]. У цьому сценарії реалізація ієрархічних схем управління мікромережами дозволять здійснювати узгоджену взаємодію з управлінням та контролем роботи основної мережі, завдяки чому покращиться сумісність мікромереж з основною мережею, а також їхня ефективна інтеграція.

Серед послуг, що пропонуються мікромережами, можливість безпечної роботи в локальному режимі становить особливий інтерес, оскільки підвищує працездатність електричної мережі та покращує безперервність подачі електроенергії в локальну мережу у разі непередбачених обставин. Інтеграція технологій акумуляування електроенергії є ключовим питанням у розвитку майбутніх інтелектуальних електричних мереж [24], [25].

Інтеграція систем акумуляування електроенергії дозволить демпфувати коливання потужності в генеруючих об'єктах, енергоресурс яких є стохастичним, як у фотоелектричних (сонячних) та вітрових установках.

Розглянемо детальніше переваги та недоліки кожного виду систем розподіленої генерації.

1.1. Сонячна енергетика

Сонячна енергетика – це використання енергії Сонця з метою перетворення її в електричну або теплову енергію. Для цього використовуються сонячні панелі та колектори (теплова енергія).

Основні переваги сонячної генерації :

- Екологічно чиста енергія;
- Необмежений ресурс енергії Сонця;
- Незалежність від палива;
- Можливість використання у складі системи розподіленої генерації.

Основні недоліки сонячної генерації :

Висока початкова вартість;

- Залежність від погодних умов;
- Обмеженість часу використання тільки світловими годинами;
- Залежність об'ємів виробництва електроенергії сонячними електростанціями (СЕС) від займаної території.
- Екологічні наслідки при виробництві компонентів сонячних панелей.

Ці недоліки варто враховувати при плануванні та використанні сонячної енергії. Однак, при правильному використанні, переваги сонячної енергії переважають недоліки і роблять її однією з перспективних галузей. В [8] роздивляються сценарії розвідку ВДЕ.

Майже у всіх сценаріях після 2035 року, сонячна фотоелектрична енергія дедалі більше відбирає частку ринку у енергії вітру, тому що швидкість зниження вартості сонячної фотоелектричної енергії вища, і сонячна енергія, зрештою, стає дешевшою, ніж енергія вітру.

Як показано в [26] СЕС в Україні складають більше 70% ВДЕ.

1.2. Вітроенергетика

Вітроенергетика – це використання енергії вітру з метою перетворення її в електричну енергію. Для цього використовуються вітрогенератори.

Основні переваги вітрової генерації :

- Екологічно чиста енергія;
- Відновлювальне джерело енергії;
- Незалежність від палива;
- Незалежність виробництва від часу доби.
- Можливість використання у складі системи розподіленої генерації.

Основні недоліки вітрової генерації :

- Висока початкова вартість;
- Залежність від погодних умов;
- Високий рівень шуму;
- Залежність об'ємів виробництва електроенергії вітрогенераторами від займаної території;
- Негативний вплив на екосистему.

Вітряні електростанції ВЕС також як і СЕС потребують систем акумуляції електроенергії. Як накопичувачі значної потужності, що здатні працювати з потужними ВЕС, можуть виступати гідроакумуляційні електростанції. В статті [27] говориться: «Значна частка ВЕС розташована біля моря, що сприяє дослідженню процесу гідроакумуляції енергії вітру на морській воді.»

1.3. Гідроенергетика

Гідроенергетика – це використання енергії води з метою перетворення її в електричну енергію. Для цього використовуються генератори гідроелектростанцій.

Основні переваги гідрогенерації :

- Екологічно чиста енергія;
- Відновлювальне джерело енергії;

- Незалежність від палива;
- Незалежність виробництва від часу доби.
- Можливість використання у складі системи розподіленої генерації.

Основні недоліки гідрогенерації :

- Висока початкова вартість, значні капітальні витрати на будівництво та обслуговування;
- Негативний вплив на екосистему;
- Залежність від погодних умов;
- Наявність особливих вимог при проектуванні - будівництво можливе лише на річках, озерах або спеціально створених водосховищах.

Ці недоліки гідроенергетики характерні для ГЕС великої потужності. Як показано в статті [28], в Україні є великий потенціал середніх і малих річок. Загальний природний гідроенергетичний потенціал малих річок України оцінюється на рівні близько 12,5 млрд кВт*год на рік. В Україні вже працюють ГЕС малої потужності на річках: Південний Буг, Тересва, Псел та інші. Але за висновками в роботах Васильо П.Ф. обсяг технічно досяжного потенціалу гідроенергетичних ресурсів для малих річок України знаходиться у межах 3-15% його загального природного потенціалу.» Зовсім новий напрямок малої гідроенергетики розглянуто в статті [29]. Це використання скидного потенціалу зворотних вод технологічних процесів.

1.4. Теплоенергетика

Теплоенергетика – це використання енергії, що виробляється генераторами при спаленні різних видів палива, такі як вугілля, нафта, газ та біомаса.

Основні переваги теплової генерації:

- Надійність;
- Висока ефективність: ТЕС можуть досягати високих коефіцієнтів корисної дії (ККД),
- Широкий спектр палива;
- Можливість керування обсягом генерації в залежності від попиту.
- Можливість використання у складі системи розподіленої генерації.

В статті [30] автори показують, що в системах РГ, наряду з ВДЕ, необхідні «традиційні джерела енергії, які мають абсолютно керований процес генерування (когенераційні установки (КГУ), парогазові та газотурбінні установки (ПГУ, ГТУ) та ін.)»

1.5. Ядерна енергетика

Ядерна енергетика – це використання енергії атома з метою перетворення її в електричну та теплову енергію. В даному випадку розглядаємо можливість використання малих модульних реакторів (ММР) як джерело розподіленої генерації.

Основні переваги використання ММР:

- Надійність;
- Висока ефективність: ММР можуть досягати високих коефіцієнтів корисної дії (ККД),
- Енергонезалежність від поповнення запасів палива,
- З урахуванням модульності достатнє швидке будівництво в порівнянні з іншими джерелами.

Основні недоліки використання ММР:

- Висока початкова вартість, значні капітальні витрати на будівництво та обслуговування;
- Ризик ядерних аварій;
- Утилізація відходів.

В діючій Енергетичній стратегії України на період до 2035 р. атомна енергетика розглядається як одне з найбільш економічно ефективних низьковуглецевих джерел енергії. Енергетичною стратегією передбачається прийняття рішення та плану дій щодо заміщення потужностей АЕС, які будуть виводитися з експлуатації після 2030 р., та вибір реакторних технологій для будівництва нових атомних енергоблоків.

Е тенденція переходу до ММР. 31 серпня 2021 р. між "Енергоатомом" та Westinghouse Electric Company, LLC було підписано "Меморандум про взаєморозуміння" щодо розміщення реакторів Westinghouse AP-1000 в Україні, що передбачає реалізацію пілотного проекту з будівництва енергоблоків AP1000 на майданчику Хмельницької АЕС та на інших діючих майданчиках АЕС України.» AP-1000 — це апробована реакторна установка III+ покоління потужністю близько 1100 МВт, оснащена пасивними системами безпеки. Однією з її особливостей є скорочення термінів і вартості будівництва енергоблока завдяки особливостям стандартизації.[31]

В проектах III+ покоління спеціалісти прагнули вирішити три ключові проблеми: безпека, зниження вартості та нові технології збирання. Практично усі енергоблоки за новими проектами є маневровими та можуть приймати участь у регулюванні частоти та потужності. Енергоблоки AP-1000, здатні забезпечити можливість роботи в режимі добового регулювання потужності в діапазоні 100-50-

100% від номінального значення. При цьому діапазон регулювання складе близько 550 МВт.

Ще одна перспективна для енергетики України угода (21.04.2023р), це угода між «Енергоатом» та американською компанією HoltecInternational [32]. Угода передбачає будівництво на території України до 20 атомних енергоблоків із реакторами SMR-160. Передбачається, що перший реактор буде підключено до мережі до березня 2029 року.» SMR-160 є легководневим реактором під тиском потужністю 160 МВт. Як паливо він використовує низько збагачений уран.

2. Порівняння пристроїв розподіленої генерації (РГ)

Порівняння систем розподіленої генерації за критеріями: початкова вартість побудови, вартість 1 кВт/год. електроенергії та коефіцієнтом корисної дії наведено в таблиці 1 [33], [34], [35], [36].

Таблиця 1. Порівняння систем розподіленої генерації

Тип джерела РГ	Початкова вартість, грн.	Вартість електроенергії, грн. за 1 кВт*г	ККД, %
Сонячні електростанції СЕС 5,1 кВт	265913	43,54	18-22
Вітроелектростанції (ВЕС) 4 кВт	789603	75,2	25-35
Гідроелектростанції малі (МГЕС) 3-5кВт	223133	9,99	85
Теплоелектростанції, малі (МТЕС) 10кВт	1104340	29,44	30
Малі модульні реактори ММР	Від 11,25 млрд.	Від 25,68	30

3. Аналіз отриманих результатів

З аналізу таблиці 1 видно, що найдешевша електроенергія, з найвищим ККД, виробляється на малих гідроелектростанціях. Але у них є один істотний недолік – річки не завжди знаходяться там, де потрібна електроенергія, а передавати її на великі відстані, за низької напруги, економічно не вигідно. Тому використовувати малі гідроелектростанції можна у малих містах та селах, а для великих міст потрібно шукати інші ВДЕ.

При порівнянні перспективи використання різних видів ВДЕ, на перше місце виходить сонячна енергетика [8]. Однак у далекій перспективі (після 2040 р.) можливе збільшення частки ядерної енергетики за допомогою застосування ММР [31], [32].

Огляд літератури показує, що розвинуті країни поділяють багато уваги системам РГ і обов'язково розглядають системи ІЕМ як необхідні для керування системами РГ. Зокрема теоретичним дослідженням [6], також є практичні результати впровадження систем РГ[22,23]. В Україні прийнято розпорядження Кабміна України від 14 жовтня 2022 р. №908-р. «Про схвалення Концепції впровадження "розумних мереж" в Україні до 2035 року», в якому окремо позначена роль систем РГ «Вказується, що розподілена генерація може мати істотний вплив на локальні мережі, спричиняючи зворотне зміщення потоків енергії та зміну напруги в місцевих мережах, а також інших технічних параметрів роботи розподільних мереж.

Проблема узгодженої роботи ВДЕ у системах розподіленої генерації гостро стоїть у всьому світі і особливо в Україні, де необхідно відновлювати зруйновану війною енергосистему.

Висновки

Розподілена генерація має значні перспективи та надає велику кількість переваг та найбільш значущу – це висока надійність електропостачання. Для реалізації систем розподіленої генерації в Україні, потрібно провести дуже багато досліджень, зібрати та проаналізувати велику кількість статистичних даних. Кожен регіон нашої країни повинен розглядатися як елемент однієї єдиної системи, але з можливістю незалежного функціонування у випадках обставин непереборної сили. Для цього треба враховувати ресурси та можливості кожного регіону з метою подальшого їх максимально ефективного використання.

Список використаної літератури

1. Кириленко О. Технічні аспекти впровадження джерел розподіленої генерації в електричних мережах [Текст] / О. В. Кириленко, В. В. Павловський, Л. М. Лук'яненко // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 1. – С. 46–53. –Бібліогр.: 38 назв. – укр.
2. Лежнюк П. Д. Електроощадні технології в електричних мережах енергосистем. [Текст] / П. Д. Лежнюк, Л. Н. Добровольська, В. В. Кулик // Під редакцією Лежнюка П. Д. – Луцьк: ІВВ Луцького НТУ, 2018. – С. 328.

3. Кириленко О. В. Сучасні тенденції побудови та керування режимами електроенергетичних мереж. [Текст] / О. В. Кириленко, С. П. Денисюк // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит = Energysaving. Powerengineering. Energyaudit. – 2014. – № 9. – Спец. вып. Т. 2: Силовая электроника и энергоэффективность. – С. 82–94. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPIPress/15081>.

4. Rocabert J. Control of Power Converters in AC Microgrids / J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg and P. Rodríguez // in IEEE Transactions on Power Electronics. – 2012. – vol. 27, no. 11. –P. 4734–4749, Nov., doi: 10.1109/TPEL.2012.2199334.

5. Pepermans G. Distributed generation: Definition, benefits and issues. [Text] / G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, and W. D'haeseleer // Energy Policy. – 2005. – vol. 33, no. 6, –P. 787–798.

6. Green T. Control of inverter-based microgrids. [Text] / T. C. Green and M. Prodanovic. // Electr. Power Syst. Res. Distrib. Generation. – 2007. – vol. 77, no. 9. – P. 1204–1213

7. Arai J. Power electronics and its applications to renewable energy in Japan.[Text]/ J. Arai, K. Iba, T. Funabashi, Y. Nakanishi, K. Koyanagi, and R. Yokoyama.// IEEE Circuits Syst. Mag. – 2008. – vol. 8, no. 3–P. 52–66.

8. Breyer C. On the History and Future of 100% Renewable Energy Systems Research.[Text] / C. Breyer, [et al] //IEEE. Soc. – 2022. –P. 78176–78218.

9. Lundaev V. Review of critical materials for the energy transition an analysis of global resources and production databases and the state of material circularity.[Text] / V. Lundaev, [et al] //IEEE. Soc. – 2022. –P. 78220–78223.

10. Xu C. Future material demand for automotive lithium-based batteries. [Text]/ C. Xu.[et al] //Commun. Mater.– 2020. – vol. 1, no. 1. – P. 1–10.

11. Greim P. Assessment of lithium criticality in the global energy transition and addressing policy gaps in transportation. [Text]/P. Greim, A. A. Solomon and C. Breyer // Nature Commun. – 2020. – vol. 11, – P. 4570.

12. Bogdanov D. Low-cost renewable electricity as the key driver of the global energy transition towards sustainability.[Text]/ D. Bogdanov [et al] // Energy– 2021.– vol. 227.

13. Khalili S. Review on 100% renewable energy system analyses. [Text]/ S. Khalili and C.

- Breyer. // IEEE Access. – 2022. – vol.10, – P.125792–125834.
14. Bardi U. Extracting minerals from seawater: An energy analysis.[Text]/ U. Bardi // Sustainability.– 2010. – vol. 2, no. 4, –P. 980–992.
15. Li Z. Continuous electrical pumping membrane process for seawater lithium mining. [Text]/ Z. Li [et al] // Energy Environ. Sci.–2021.– vol. 14, no. 5. – P. 3152–3159.
16. C. Liu, Y. Li, D. Lin, P.– C. Hsu, B. Liu, G. Yan, et al., Lithium extraction from seawater through pulsed electrochemical intercalation. [Text]/ C. Liu [et al] //Joule.–2020.– vol. 4, no. 7,–P. 1459–1469.
17. Kleijn R. Resource constraints in a hydrogen economy based on renewable energy sources: An exploration. [Text]/ R. Kleijn and E. van der Voet// Renew. Sustain. Energy Rev.–2010.– vol. 14, no. 9.– P. 2784–2795.
18. Laaksonen H. Improvement of Power System Frequency Stability With Universal Grid-Forming Battery Energy Storages.[Text]/H. Laaksonen[et al] // IEEE. – 2023. – P.10826 –10841.
19. Kundur P. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions. [Text]/ P. Kundur[et al] // IEEE Trans. Power Syst.–2004.– vol. 19, no. 2.– P. 1387–1401.
20. Ye Z. Evaluation of antiislanding schemes based on nondetection zone concept. [Text]/Z. Ye, A. Kolwalkar, Y. Zhang, P. Du, and R. Walling // IEEE Trans. Power Electron. – 2004. – vol. 19, no. 5. – P. 1171–1176.
21. Matevosyan J. International comparison of requirements for connection of wind turbines to power systems. [Text]/ J. Matevosyan, C. Jauch, T. Ackermann, and S. M. Bolik // Wind Energy Journal. – 2005. –vol. 8, no. 3. – P. 295–306.
22. Offprint from the O. P. 12.2 outline(2008). Technical requirements for wind power and photovoltaic installations and any generating facilities whose technology does not consist on a synchronous generator directly connected to the grid. [Online]. [Електронний ресурс]. – Режим доступу :www.aeeolica.
23. Керівництво IEEE із проектування, експлуатації та інтеграції систем розподілених ресурсів з електроенергетичними системами, стандарт IEEE. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=5960749> (дата звернення: 20.07.2011). IEEE Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems, IEEE Standard 1547.4–2011
24. Roberts B. Capturing grid power[Text] / B. Roberts // IEEE Power Energy Mag.–2009 –vol. 7, no. 4,– P. 32–41.
25. Esmaili A. Energy storage for short-term and long-term wind energy support. [Text]/ A. Esmaili and A. Nasiri // in Proc. 36th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc. – 2010– P. 3281–3286.
26. Бурикін О. Дослідження методів контролю СЕС для балансування режимів електроенергетичних систем. [Текст] / О. Б. Бурикін і др. // Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XXII міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 20–21 травня 2021р.).–К.: Інтерсервіс, 2021.– С. 444–448.
27. Васько П. Гідроакмулювальні електростанції – технологічна основа інтеграції потужних вітро- та фотоелектричних станцій до складу електроенергетичної системи України. [Текст] / П. Ф. Васько, А. П. Вербовий, М. Р. Ібрагімова, С. Т. Пазич // Гідроенергетика України. – 2017. – № 1– 2. – С.20–25.
28. Васько П. Потенціал використання гідроенергетичних ресурсів основних малих річок України. [Текст] / П. Ф. Васько, А. В. Мороз // Відновлювана енергетика. – 2016. –№ 3. –С. 50–56.
29. Бриль А. Пілотний проект малої ГЕС на стічних водах міських очисних споруд на території України. [Текст] / Бриль А. О., Васько П. Ф., Мороз А. В. // Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XXII міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 20–21 травня 2021р.).–К.: Інтерсервіс, – 2021.– С. 690–693.
30. Кацадзе Т. Джерела розподіленої генерації в електричних мережах. [Текст] / Кацадзе Т. Л., Ернст В. В. // Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XXII міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 20–21 травня 2021р.).– К.: Інтерсервіс, – 2021. – С.181–184.
31. Власенко М. Усі енергоблоки за новими проектами є маневровими. [Текст] / Микола Власенко // Енергобізнес №51(1244) от 21.12.2021р.
32. Україна уклала угоду на будівництво 20 атомних реакторів SMR-160, – Енергоатом. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: Украина заключила сделку на строительство 20 атомных реакторов SMR-160, – Энергоатом (focus.ua).
33. Реклама компанії AltecoGroup [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://alteco.in.ua/solution/vetrogenerator/vetrogenerator-dlya-doma-2>.

<https://altego.in.ua/solution/solnechnaya-energetika/solnechnaya-stantsiya-dlya-doma-3kwt-variant-7a>.

34. Реклама компанії Ecoist. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ecoist.com.ua/mikrohidroelektrostantsija-pr5-g-20.htm>.

35. Реклама компанії prom. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://prom.ua/p1248021694-mini-test-powerlink.html?utm_source=google_product&utm_medium=cpc&utm_content=pla&utm_campaign=K_T_cpc_05_1&gclid=CjwKCAjwjYKjBhB5EiwAiFdSfn5D5Y4uz35v8S8GqLkeR4CbG0eqSITX4L1njftKfzy9Y_ZGs0XnRoCGD0QAvD_BwE

36. Хабр. У США сертифікували перший малий модульний ядерний реактор [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://habr.com/ru/news/712444>. (Дата звернення 24.01.2023).

References

1. O. V. Kyrilenko, V. V. Pavlovsky, L. M. Lukyanenko. (2011) Technical aspects of implementation of distribution generation sources in electric networks. [Tekhnichni aspekty v provadzheni dzherel rozpodilnoi heneratsii v elektrychnykh merezhakh] Technical electro-dynamics. –No. 1. P. 46–53. Bibliography: 38 titles.
2. P.D.Lezhniuk, L. N. Dobrovolska, V. V. Kulyk. (2018) Electricity-saving technologies in electric networks of energy systems. [Elektroshchadni tekhnolohii v elektrychnykh merezhakh enerhosystem] Lutsk: IVV Lutsk NTU., –P. 328.
3. O. V. Kyrilenko, S. P. Denisyuk. (2014) Modern trends in the construction and management of electric power networks. [Suchasni tendentsii pobudovy ta keruvannia rezhymamy elektroenerhetychnykh merezh] Energy saving. Power engineering. Energy audit. –No. 9. – Special. issue Volume 2: Power electronics and energy efficiency. – pp. 82–94 <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/15081>
4. J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg and P. Rodríguez, (2012) "Control of Power Converters in AC Microgrids", in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 11, pp. 4734–4749, doi: 10.1109/TPEL.2012.2199334.
5. G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, and W. D'haeseleer, (2005) "Distributed generation: Definition, benefits and issues," Energy Policy, vol. 33, no. 6, pp. 787–798,
6. T. C. Green and M. Prodanovic(2007) Control of inverter-based micro-grids. *Electr. Power Syst. Res. Distrib. Generation*, vol. 77, no. 9, pp. 1204–1213.
7. J. Arai, K. Iba, T. Funabashi, Y. Nakanishi, K. Koyanagi, and R. Yokoyama(2008) Power electronics and its applications to renewable energy in Japan, *IEEE Circuits Syst. Mag.*, vol. 8, no. 3, pp. 52–66, Third Quarter.
8. C. Breyer, S. Khalili (2022) On the History and Future of 100% Renewable Energy Systems Research. *IEEE. Soc.* pp. 78176–78218.
9. V. Lundaev, A. A. Solomon, T. Le, A. Lohrmann and C. Breyer, (2022) Review of critical materials for the energy transition an analysis of global resources and production databases and the state of material circularity. *IEEE. Soc.* pp. 78220–78223.
10. C. Xu, Q. Dai, L. Gaines, M. Hu, A. Tukker and B. Steubing.(2020) Future material demand for automotive lithium-based batteries., *Commun. Mater.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–10, Dec.
11. P. Greim, A. A. Solomon and C. Breyer.(2020) Assessment of lithium criticality in the global energy transition and addressing policy gaps in transportation, *Nature Commun.*, vol. 11, pp. 4570.
12. D. Bogdanov, M. Ram, A. Aghahosseini, A. Gulagi, A. S. Oyewo, M. Child, (2021) "Low-cost renewable electricity as the key driver of the global energy transition towards sustainability", *Energy*, vol. 227.
13. S. Khalili and C. Breyer(2022) Review on 100% renewable energy system analyses—A bibliometric perspective.
14. U. Bardi.(2010) Extracting minerals from seawater: An energy analysis, *Sustainability*, vol. 2, no. 4, pp. 980–992.
15. Z. Li, C. Li, X. Liu, L. Cao, P. Li, R. Wei(2021) Continuous electrical pumping membrane process for seawater lithium mining, *Energy Environ. Sci.*, vol. 14, no. 5, pp. 3152–3159.
16. C. Liu, Y. Li, D. Lin, P.-C. Hsu, B. Liu, G. Yan, (2020) Lithium extraction from seawater through pulsed electrochemical intercalation, *Joule*, vol. 4, no. 7, pp. 1459–1469.
17. R. Kleijn and E. van der Voet.(2010) Resource constraints in a hydrogen economy based on renewable energy sources: An exploration, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 9, pp. 2784–2795.
18. H. Laaksonen...all authers. (2023) Improvement of Power System Frequency Stability With Universal Grid-Forming Battery Energy Storages. *IEEE.*, pp.10826–10841.

19. P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, (2004) Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions, *IEEE* vol. 19, no. 2.– P. 1387–1401
20. Z. Ye, A. Kolwalkar, Y. Zhang, P. Du, and R. Walling, (2004) “Evaluation of antiislanding schemes based on nondetection zone concept,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 5, pp. 1171–1176..
21. J. Matevosyan, C. Jauch, T. Ackermann, and S. M. Bolik, (2005) “International comparison of requirements for connection of wind turbines to power systems,” *Wind Energy Journal*, vol. 8, no. 3, pp. 295–306.
22. Offprint from the O. P. 12.2 outline.(2008). Technical requirements for wind power and photovoltaic installations and any generating facilities whose technology does not consist on a synchronous generator directly connected to the grid. [Online]. Available: www.aeolica.es.
23. IEEE Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems, IEEE [Kerivnytstvo IEEE iz proektuvannia, ekspluatatsii ta intehratsii system rozpodilennykh resursiv z elektroenerhetychnymy systemamy, standart IEEE] Standard 1547.4–2011, 2011
24. B. Roberts.(2009) Capturing grid power, *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 7, no. 4, pp. 32–41.
25. A. Esmaili and A. Nasiri.(2010) Energy storage for short-term and long-term wind energy support, in *Proc. 36th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.* pp. 3281–3286.
26. O. B. Burykin et al. (2021) Study of SES control methods for balancing modes of electric power systems. [Doslidzhennia metodiv kontroliu SES dlia balansuvannia rezhymiv elektroenerhetychnykh system] *Renewable energy and energy efficiency in the XXI century: materials of the XXII international scientific and practical conference, Kyiv, Interservice*, P. 444–448.
27. P. F. Vasko, A. P. Verbovy, M. R. Ibrahimova, S. T. Pazich. (2017) Hydro storage power plants -technological basis of integration of powerful wind and photoelectric plants as part of the electric power plantsystems of Ukraine.[Hidroakumuliuvalni elektrostantsii – tekhnolohichna osnova intehratsii potuzhnykh vitrota fotoelektrychnykh stantsii do skladu elektroenerhetychnoi systemy Ukrainy], *Hydropower of Ukraine*. No. 1–2. P.20–25.
28. Vasko P. F., Moroz A. V. (2016) The potential of using hydropower resources of the main small rivers of Ukraine. [Potensial vykorystanniahidroenerhetychnykhresursivosnovnykh hmal'ykhrichokUkrainy.]*Renewable energy*. No. 3. P. 50–56.
29. Bryl A. O., Vasko P. F., Moroz A. V. (2021) A pilot project of a small hydroelectric power plant on the wastewater of urban sewage treatment plants in the territory of Ukraine. [Pilotnyi proekt maloi HES na stichnykh vodakh miskykh ochysnykh sporud na terytorii Ukrainy] *Renewable energy and energy efficiency in the XXI century: materials of the XXII international scientific and practical conference Kyiv, Interservice*. P. 690–693
30. Katsadze T. L., Ernst V. V. (2021) Sources of distribution generation in electric networks. [Dzherela rozpodilenoї heneratsii v elektrychnykh merezhakh] *Renewable energy and energy efficiency in the XXI century: materials of the XXII international scientific and practical conference Kyiv.: Interservice.*, P.181–184.
31. Mykola Vlasenko. (2021) All power units according to new projects are Maneutov. same. [Usi enerhobloky za novymy proektamy e manevrovymy] *Energy business* No. 51(1244). <https://e-b.com.ua/mikola-vlasenko-usi-energobloki-za-novimi-proektami-je-manevrovimi-2853>
32. Ukraine concluded an agreement on the construction of 20 SMR-160 nuclear reactors, [Ukraina uklala uhodu na budivnytstvo 20 atomnykh reaktoriv SMR-160]. *Energo-atom.* (focus.ua)
33. Alteco Group advertisement [Reklama kompanii Alteco Group]. - Access mode: <https://alteco.in.ua/solution/vetrogenerator/vetrogenerator-dlya-doma-2>
<https://alteco.in.ua/solution/solnechnaya-energetika/solnechnaya-stantsiya-dlya-doma-3kwt-variant-7a>
34. Advertisement of Ecoist company [Reklama kompanii Ecoist]. Access mode: <https://ecoist.com.ua/mikrohidroelektrostantsija-pr5-g-20.htm>
35. Advertisement of the prom company [Electronic resource]. Access mode: https://prom.ua/p1248021694-mini-tets-powerlink.html?utm_source=google_product&utm_medium=cpc&utm_content=pla&utm_campaign=K_T_cpc_05_1&gclid=CjwKCAjwjYKjBhB5EiwAiFdSfn5D5Y4uz35v8S8GqLkeR4CbG0eqSITX4L11njFtKfzy9Y_ZGs0XnRoCGD0QAvD_BwE
36. Hebrew (2023) The first small modular nuclear reactor was certified in the USA [U SShAsertyfikovalypershyimalyimodulnyiyadernyire aktor].Accessmode:<https://habr.com/ru/news/712444/>

DEVICES AND SYSTEMS OF DISTRIBUTED GENERATION

D. A. Maevsky, O. F. Vynakov, O. A. Ketrar.
National University "Odesa Polytechnic"

Abstract. *The article is devoted to the analysis of the features of various distributed generation systems from the point of view of their inclusion in a single distributed energy system. It is shown that the need to switch to distributed generation is associated with the need to create reliable power supply systems that can maintain their performance in the event of partial or complete destruction of any part of such a system.*

The devices of solar, wind and hydropower, as well as the possibility of using small modular nuclear reactors as devices for distributed generation are analyzed.

It is shown that the most promising for application are environmentally friendly solar cells. Wind generation and small hydropower plants can also be used to create sustainable and reliable power supply systems. Small modular reactors can be used to power large cities and industrial consumers.

The analysis of economic and energy parameters of various devices of distributed generation is carried out.

It is concluded that the elements of a distributed generation system can be not only individual devices, but also systems of such devices at the level of a territorial region.

Keywords: *distributed generation; electrical system; solar energy; solar power plants, wind energy; modular nuclear reactors; intelligent networks.*

Отримано 25.05.2023.



Масєвський Дмитро Андрійович, Національний університет «Одеська політехніка», доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електромеханічної інженерії.

Просп. Шевченка, 1, Одеса, Україна,

E-mail: Dmitry.A.Maevsky@gmail.com, тел. +38-048-705-84-54

Dmitry Maevsky, Odessa National Polytechnic University, Dr. of Science, Professor, Head of the Department of theoretical foundations and general electrical engineering, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine

ORCID ID:0000-0003-0666-6199



Винаков Олександр Федорович, Національний університет «Одеська політехніка», кандидат технічних наук, доцент кафедри електромеханічної інженерії.

Просп. Шевченко, 1, Одеса, Україна, E-mail: afvynakov@gmail.com, тел. +38-097-7873643

Vynakov Olexandr, National University «Odessa Polytechnic» Ph.D. in technical sciences, associate professor of the Department Electromechanical engineering, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine

ORCID ID:0000-0002-6630-8986



Кетрарь Олег Анатолійович, Національний університет «Одеська політехніка», аспірант кафедри електромеханічної інженерії.

Просп. Шевченко, 1, Одеса, Україна

E-mail: ketraroa@gmail.com, тел. +38-098-404-17-15

Ketrar Oleg, National University «Odessa Polytechnic», Postgraduate student of the Department of Electromechanical Engineering, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine

ORCID ID:0000-0003-0098-7450