

ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ТА ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ У РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

У статті аналізуються особливості та сформульовано рекомендації щодо найбільш ефективного використання систем накопичення енергії у розподільних системах і мікросистемах в умовах розширення впровадження локальних відновлюваних джерел енергії. Узагальнено інформацію щодо різних технологій акумулювання енергії та сформульовано рекомендації відносно ефективного їх застосування для різних додатків в електроенергетиці. Розглянуто функції, які можуть і повинні вирішувати системи накопичення енергії у розподільних мережах, у результаті чого обґрунтовується доцільність формування гібридних систем накопичення. На основі аналізу бібліографії та розгляду міжнародного досвіду визначено завдання, які потребують подальших поглиблених досліджень для обґрунтованого вибору структури, параметрів, місць розміщення та режимів роботи гібридних систем накопичення енергії з урахуванням специфіки побудови та режимів роботи вітчизняних систем розподілу електричної енергії за умов інтеграції в них різноманітних локальних джерел енергії.

Ключові слова: розосереджена генерація, системи накопичення енергії, розподільні мережі, мікросистеми, відновлювані джерела енергії.

Вступ. Зусилля урядів багатьох країн щодо виконання взятих на себе міжнародних зобов'язань пов'язаних із скороченням викидів змусили енергетичний сектор знизити залежність від традиційного виробництва електроенергії на основі викопного палива на користь відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), переважно у вигляді вітру та сонця. Незважаючи на те, що виробництво електроенергії з ВДЕ є більш екологічно лояльним, висока залежність від них може суттєво ускладнити експлуатацію систем розподілу електроенергії (СРЕ) [1].

Більш того, у процесі реконструкції та розвитку сучасних СРЕ, враховуючи дедалі ширше використання ВДЕ, в останні роки активно обговорюється питання формування, так званих, мікромереж і мікросистем (англ. *microgrids*), включаючи можливість їх роботи як у режимі підключення до централізованої мережі, так і автономно.

Відповідно до [2] мікросистеми визначаються як єдиний керований об'єкт, що складається з взаємопов'язаних навантажень і різних розподілених енергетичних ресурсів у межах певних електричних кордонів, який працює як у режимі підключення до мережі, так і в ізолюваному режимі, що виникає, як правило, у тому випадку, якщо це необхідно для підтримки якості електропостачання (наприклад, у разі відмови централізованого електропостачання).

Однак, незважаючи на вже наявний позитивний досвід, процеси проектування, керування й експлуатації мікросистем пов'язані з труднощами, зокрема, через нестабільність потужності генерованої ВДЕ, невизначеність графіків навантаження, низьку механічну інерцію, що створюється джерелами розосередженої генерації з інверторним інтерфейсом. Справді, при вирішенні зазначених питань ми опиняємося у ситуації, коли одночасно необхідно досягти кількох, найчастіше важко сумісних цілей: сприяти отриманню максимальної економічної вигоди всіма учасниками, задіяними у цьому процесі; максимально використовувати потенціал ВДЕ; виключити їх можливий негативний вплив на режими роботи електричних мереж; забезпечити як у режимі підключення до мережі, так і при переході до автономного (острівного) режиму роботи надійне електропостачання споживачів електроенергією нормованої якості.

Враховуючи всі наведені вище міркування, багато фахівців сходяться на думці, що найбільш перспективною формою використання локальної генерації є формування гібридних мікросистем, коли вони включають до своєї структури як традиційні джерела розосередженої генерації змінного струму, так і альтернативні джерела постійного струму.

Однак і така форма використання розосередженої генерації не є всеосяжним рішенням усіх проблем. Так, наприклад, оскільки мікросистема може працювати як у режимі підключення до мереж енергосистеми так і в острівному (ізолюваному) режимі, її стійкість повинна вивчатися та забезпечуватися для кожного з зазначених режимів окремо.

Численні дослідження, а також вже накопичений певний досвід багатьох країн свідчать, що впровадження систем накопичення енергії (СНЕ) може бути важливим напрямом для вирішення таких питань, як забезпечення стабільності напруги та частоти, дотримання інших показників якості електроенергії та вимог до надійності електропостачання, сприяти збільшенню обсягів інтегрованих у розподільні системи ВДЕ.

Мета та завдання

Інтеграція в розподільні системи ВДЕ зі змінною вихідною потужністю перетворила традиційну генерацію електроенергії з керованих і диспетчеризованих ресурсів на некеровані та недиспетчеризовані. Крім того, стохастична природа навантажень, що поступово ускладнюється появою в їх структурі зарядних станцій електромобілів, робить процес споживання енергії ще більш непередбачуваним. Вважається, що ефективним шляхом вирішення різноманітних проблем, що при цьому можуть виникнути, є впровадження СНЕ.

Але ефективність такого рішення значною мірою залежить від технологій накопичення енергії, вибору структури накопичувачів, параметрів окремих їх компонентів, місць розміщення та стратегії управління [3].

При цьому залишається достатньо питань щодо застосування СНЕ у конкретних умовах, враховуючи специфіку побудови та функціонування СНЕ певної країни, стан та особливості її економіки, нормативну та правову бази, що діють. До таких питань, акцентуючи увагу на використанні СНЕ саме в СНЕ, можна віднести:

- всебічний огляд СНЕ з погляду перспектив їх застосування у розподільних системах певної країни, включаючи бенчмаркінг, обґрунтування технології накопичення, вибір структури, параметрів і місць розміщення, а також правила їхньої ефективної зарядки-розрядки;
- аналіз різних аспектів використання СНЕ, таких як забезпечення якості електроенергії, зменшення впливу невизначеності навантаження та генерації з боку ВДЕ, підвищення стабільності роботи мікросистеми, забезпечуючи віртуальну інерцію. Як додаткові фактори повинні враховуватися питання підвищення ефективності роботи подібних систем за рахунок отримання можливості керування потоком потужності, управління електроспоживанням, зниження втрат енергії й оптимізації режиму напруги;
- ретельне обґрунтування оптимальних параметрів і локалізації СНЕ, а також критичний аналіз з точки зору отриманих переваг і сфери застосування, включаючи різні інструменти системного моделювання подібних систем, акцентуючи увагу на їх використання безпосередньо у розподільних системах;
- підтвердження важливості використання сучасних оптимізаційних методів (зокрема, гібридних метаевристичних) для отримання обґрунтованих рішень і демонстрація переваг даного підходу порівняно з іншими методами;
- дослідження питань, пов'язаних із оцінкою впливу СНЕ на навколишнє середовище, їхнього вкладу в енергетичну безпеку та розвитком суспільства в цілому.

Матеріал і результати досліджень

В електроенергетиці можуть використовуватись численні технології накопичення енергії, які, зазвичай поділяються на шість груп: електричні, механічні, електрохімічні, термохімічні, хімічні та теплові. Залежно від форми зберігання та характеристик її видачі в мережу, СНЕ може виконувати безліч функцій на ринку електричної енергії [4].

Функціональні можливості та сфери застосування технологій накопичення енергії залежать від їхніх характеристик. Одна група характеристик визначається номінальними значеннями потужності й енергії. Номінальна потужність характеризує швидкість заряду/розряду, а номінальна енергія відбиває тривалість розряду. Динамічні характеристики оцінюють час відгуку та швидкість лінійної зміни параметрів накопичувача. Час відгуку – це час, протягом якого накопичена енергія переходить зі стану нульового розряду до повного розряду, а швидкість зміни – швидкість, з якої може змінюватися вихідна потужність. Габаритні характеристики, що є важливим показником при використанні СНЕ в розподільних системах, залежать від потужності накопичувача та густини енергії.

До основних характеристик СНЕ, які принциповим чином впливають на вибір СНЕ в розподільних системах, відносять.

Щільність потужності (англ. *power density*) (Вт/кг або Вт/л) – це номінальна вихідна потужність, поділена на об'єм акумуляюючого пристрою. **Щільність енергії** (англ. *energy density*) розраховується як накопичена енергія поділена на об'єм. При цьому об'єм накопичувача – це обсяг усієї СНЕ, включаючи сам накопичувальний елемент, аксесуари та відповідні конструкції, а також перетворювальну систему [5]. Ці критерії важливі у ситуаціях, коли простір обмежений та/або якщо важлива вага накопичувача, що особливо актуально при використанні СНЕ у розподільних системах.

Загальна ефективність системи зберігання – це кількість енергії, яка виходить із системи по відношенню до кількості енергії накопиченої в ній. Для накопичувачів, які використовуються дуже часто,

що має місце в розподільних системах, надзвичайно важливо мати коефіцієнт корисної дії (ККД) понад 80 % через втрати енергії у кожному циклі.

Тривалість розряду – це час, протягом якого накопичувач може розряджатися при номінальній вихідній потужності без підзарядки. Деякі типи систем зберігання можуть розряджатися з відносно високою швидкістю протягом досить коротких періодів часу, але їхня ефективність у цих випадках нижча. Наприклад, накопичувач може працювати при номінальній потужності 1 МВт протягом трьох годин при ККД 80 %; та ж установка може забезпечити 1,5 МВт протягом 10 хвилин при ККД 65 % [6].

Життєвий цикл накопичувача. Тією чи іншою мірою більшість накопичувачів енергії деградує у міру використання (тобто під час кожного циклу заряду-розряду), а також у залежності від глибини розрядки. Швидкість деградації залежить від технології зберігання енергії, умов експлуатації й інших змінних. Цей показник є особливо важливим для електрохімічних батарей, для яких неглибокий розряд менш чутливий у порівнянні з глибоким розрядом.

Час відгуку (англ. *Response Time*) – це час, необхідний для переходу від повної відсутності розряду до розряду при номінальній вихідній потужності. Як правило, час відгуку накопичувача маленький на відміну від деяких типів генерації, яким потрібно у більшості випадків не менше декількох хвилин, перш ніж вийти на повну потужність, наприклад, для турбін внутрішнього згорання. В ідеалі накопичувач має працювати з максимальною ефективністю та номінальним часом відгуку за будь-якого рівня заряду.

Важливою характеристикою системи зберігання для деяких додатків є швидкість лінійної зміни розряду (англ. *Ramp Rate*) – швидкість, з якою може змінюватися її вихідна потужність. Як правило, швидкість наростання потужності накопичувача дуже висока, від мілісекунд до декількох секунд для її зміни від нуля до максимального значення, у залежності від технології.

Швидкість зарядки (англ. *Charge Rate*) – це швидкість, з якою можна заряджати накопичувач. Якщо накопичувач не зможе досить швидко заряджатися, йому не вистачить енергії для надання необхідної послуги. Наприклад, акумулятор найчастіше заряджається зі швидкістю, аналогічною швидкості його розрядки.

Час саморозряду (англ. *self discharge time*) – це час, протягом якого накопичувач зберігає свій заряд. Електрохімічні накопичувачі більш схильні до саморозряду через хімічні реакції, які в ньому відбуваються. Ця характеристика менш важлива у разі частого використання накопичувача. Для накопичувачів, які використовуються нечасто (тобто переважно працюють в режимі очікування), цей критерій може бути дуже важливим.

Зрозуміло, що впровадження СНЕ (особливо великомасштабне) потребує значних інвестицій, їхній правильний вибір на основі очікуваного економічного ефекту є складним завданням. Тут необхідно враховувати різні аспекти їх застосування, зокрема, технічні й економічні особливості різних технологій акумулювання енергії, ступінь їх зрілості з погляду комерціалізації, вплив на навколишнє середовище, завдання, які планується вирішувати за рахунок їх застосування. Наводити числові значення зазначених характеристики для різних СНЕ не має сенсу, тому, що наявні в літературі відповідні данні варіюються у занадто широкому діапазоні. Тому у таблиці 1 та 2 наведено лише загальну інформацію щодо переваг і недоліків окремих технологій накопичення енергії та рекомендації відносно можливих сфер їх застосування, перш за все, у розподільних системах [7].

Як вже зазначалось, СНЕ потенційно мають достатньо широку сферу застосувань в електричних мережах. Досить велику групу представляють дослідження пов'язані з питаннями їх залучення з метою забезпечення якості електричної енергії в розподільних системах. СНЕ може застосовуватися для швидких, негайних і потужних відгуків на збурення, що виникають, і які тривають до декількох секунд, так і для компенсації падіння напруги. Окрім цього у розподільних мережах у багатьох випадках доцільно використовувати СНЕ з метою компенсації реактивної потужності, з одночасним вирішенням завдання компенсації падіння напруги й усунення гармонійних спотворень. У СНЕ важливим аспектом є використання розосереджених СНЕ для усунення дисбалансу в розподілі навантаження між фідерами з метою більш ефективного використання існуючих в мережі засобів регулювання напруги.

Якість електроенергії в електричній мережі визначається, насамперед, як підтримка частоти та величини напруги в межах допустимого діапазону значень при забезпеченні його синусоїдальної форми.

Остання умова є досить актуальною, оскільки більшість ВДЕ приєднуються до мережі через обладнання силової електроніки, нелінійна вольт-амперна характеристика яких породжує гармоніки в системі. Одночасно наявність нелінійних навантажень, обсяг яких зростає за рахунок появи зарядних пристроїв для електромобілів, також призводить до виникнення гармонік струму та напруги в системі, але вони можуть бути скомпенсовані належним використанням електронних перетворювачів потужності СНЕ, які діють як активний фільтр.

Крім цього, стохастично змінювані навантаження, електроприймачі зі значним споживанням реактивної потужності та перехід від роботи паралельно з енергосистемою до ізольованої роботи є додатковими факторами, які призводять і до таких проблем з якістю електроенергії як коливання потужності, а, відповідно, і напруги, провалів і стрибків напруги, низькому коефіцієнту потужності.

Таблиця 1 – Переваги та недоліки технологій накопичення енергії

Технології	Переваги	Недоліки
Електричні		
Конденсатор	Швидкий час відгуку, велика кількість циклів	Низькі потужність, життєвий цикл та ефективність
Суперконденсатор	Великий життєвий цикл і висока ефективність	Низька енергетична щільність, токсичність
Надпровідні магнітні накопичувачі (SMES)	Великі потужність і життєвий цикл та висока ефективність	Негативний вплив на здоров'я
Механічні		
Стиснене повітря (CAES)	Велика потужність, низька питома вартість відносно потужності	Негативний вплив на оточуюче середовище
Гідроакмулювання (PHS)	Велика потужність, низька питома вартість відносно потужності	Складність розміщення
Маховики (FES)	Великі потужність та ефективність	Низька енергетична щільність
Електрохімічні		
Свинцево-кислотні	Низькі капітальні витрати	Низька енергетична щільність
NaS	Великі енергетична щільність та ефективність, майже відсутній саморозряд	Висока вартість, складність утилізації
Літій-іонні	Великі щільність потужності й енергії та висока ефективність	Складність утилізації в плані переробки літію
NiCd	Великі потужність, щільність потужності й енергії та висока ефективність	Висока токсичність
Ванадій-редокс батареї	Велика потужність	Низькі щільності потужності й енергії
ZnBr	Велика потужність	Висока вартість і низька енергетична щільність
Хімічні		
Паливні комірки	Практично нульовий саморозряд	Потреба заміні каталізатору

Таблиця 2 – Рекомендовані сфери застосування

Технології	Якість електроенергії	Інтеграція ВДЕ	Резервне електро-постачання	Зсув пікового навантаження	Підвищення однорідності графіків навантаження	Обертвий резерв	Розвиток електричних мереж	Регулювання напруги	Енергетичний менеджмент	Переміщення навантаження у часі
Електричні										
Конденсатор	+									
Суперконденсатор	+							±		
Надпровідні магнітні накопичувачі (SMES)	+	+				±		±		
Механічні										
Стиснене повітря (CAES)			±	+	+		+		+	+
Гідроакмулювання (PHS)			±	+	+		±		+	+
Маховики (FES)	+	+	±			±		±	±	
Електрохімічні										
Свинцево-кислотні	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
NaS	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Літій-іонні	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
NiCd	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Ванадій-редокс батареї	±	+	+	±	±	±	±	+	+	±
ZnBr	±	+	+	±	±	±	±	+	+	±
Хімічні										
Паливні комірки	±	+	±	±	±	±	±		±	±

Тому різке зниження та/або підвищення (у разі появи зворотного потоку потужності) напруги у споживачів можуть розглядатися як проблема якості електроенергії. Спільно з коливаннями напруги, що мають місце, дані фактори можуть призвести до відключення або неправильної роботи мережевого електрообладнання.

За таких ситуацій використання традиційних пристроїв регулювання під навантаженням та інших регуляторів напруги може бути неефективним. Тому необхідний інший механізм підтримки відхилень напруги в припустимому діапазоні задля стабільної роботи СРЕ.

Слід зазначити, що, оскільки в мікросистемі відношення активного опору лінії до її реактивного опору (R/X), на відміну від системи передачі електроенергії, є значним, вплив активної та реактивної потужностей на частоту та напругу не пов'язані між собою [8].

У режимі підключення до мережі мікросистема поглинає енергію з енергосистеми, коли виникає дефіцит потужності з боку її джерел, що генерують, і відправляє її назад в мережу, коли в ній виникає надлишкове вироблення енергії. У цьому випадку енергосистема компенсує невідповідність між генерацією та навантаженням і забезпечує стабільність частоти. Отже, в режимі підключення до мережі основною проблемою є не стабільність частоти, а стабільність напруги. У зв'язку з цим аналіз малих і великих збурень (перехідних процесів) може виконуватися, як правило, лише для режиму напруги.

В ізолюваному режимі, оскільки мікросистема електрично незалежна від основної мережі, вона відповідає за підтримку стабільності як напруги, так і частоти.

Крім цього, у розподільних системах часто може бути присутній великий обсяг як однофазних навантажень, так і однофазних джерел генерації. Тому для безпечної й ефективної роботи подібних систем необхідно додатково балансувати навантаження та генерацію між окремими фазами. Однофазні системи накопичення енергії можуть зменшити дисбаланс у фазах, якщо вони окремо інтегровані в кожен фазу та незалежно обмінюються активною та реактивною потужностями [9].

Впровадження СНЕ потребує ретельного визначення й урахування усіх переваг, які вони можуть забезпечити для електричних мереж. Тому, плануючи використання різноманітних накопичувачів в розподільних системах, дослідження стосовно зазначених вище аспектів їх використання мають бути значно розширені та поглиблені.

Додатково важливо зазначити, що при розгляді питань щодо якості електричної енергії практично відсутні дослідження відносно коливальних перехідних процесів, що є важливим питанням для розподільних мереж з ВДЕ, особливо з огляду на можливість формування «острівного» режиму їхньої роботи.

Важливою властивістю СНЕ в СРЕ, зокрема в мікросистемах, є можливість їх використання в якості джерела віртуальної інерції для підвищення стабільності частоти за рахунок компенсації низької інерції ВДЕ [10]. Тобто енергія, що зберігається в СНЕ, емулює кінетичну енергію, запасену в роторі синхронного генератора, яка може бути вивільнена у разі збурення або різкого дисбалансу між попитом і пропозицією. Акумуляторні СНЕ, суперконденсатори, надпровідні магнітні накопичувачі енергії та накопичувачі енергії на маховиках завдяки їхній швидкій динаміці є придатними засобами для демпфування коливань частоти в мікросистемах.

Інерція системи визначається як опір змінам частоти системи за рахунок накопичення/введення кінетичної енергії, що надходить від синхронно підключеної машини, що обертається, з системи/у систему під час виникнення дисбалансу потужності.

Кінетична енергія системи E_k розраховується як

$$E_k = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2} J_i \omega_{mi}^2 \right),$$

де J – момент інерції, кг·м²; ω_{mi} – кутова швидкість ротора i -ї машини, що обертається; n – загальна кількість машин.

Загальна характеристика інерції системи є відношенням загальної накопиченої кінетичної енергії в MJ при синхронній швидкості до номінального значення МВ·А базової системи:

$$H_{sys} = \frac{E_k}{S_{base}} = \frac{\omega_{sm}^2}{2S_{base}} \sum_{i=1}^n J_i,$$

де S_{base} – базова характеристика системи, МВ·А; ω_{sm} – синхронна швидкість системи, рад/с.

Видно, що загальна інерція системи залежить від кількості машин, що обертаються, об'єднаних у систему, а також кінетичної енергії, що накопичена в їхній обертовій масі. Для порівняння, миттєвий фізичний запас силового перетворювача є енергія, яку накопичено у його конденсаторі на стороні постійного струму, та вона є незначною у порівнянні з інерцією обертання синхронних машин.

Початкове значення, так званого показника *ROCOF* (англ. *Rate-of-Change-of-Frequency*), що визначається величиною дисбалансу потужностей та інерцією системи, може бути виражене як

$$ROCOF = \frac{f_0}{2H_{sys}} \frac{\Delta P}{S_{base}} = \frac{f_0 \Delta P}{2E_k},$$

де ΔP – розмір збурення; f_0 – номінальна частота системи.

Очевидно, що початкове значення показника *ROCOF* буде більшим, якщо більше збурення потужності або менше енергії, що накопичено в системі. Оскільки найбільш традиційні генератори замінюються джерелами з інтерфейсом перетворювача, величина H_{sys} та E_k знижується. Більш того, стохастичний характер відновлюваної генерації викликає частіші та сильні порушення балансу потужності. Комбінація цих двох факторів може призвести до збільшення значення *ROCOF* і, отже, до погіршення стабільності мережі.

Традиційно відхилення частоти, викликане зміною потужності та позаштатними ситуаціями, компенсується первинним частотним регулюванням в основному за рахунок генераторів, що обертаються. Однак властива їм зона нечутливості та повільна реакція зазвичай призводять до видачі необхідної потужності приблизно через 10–20 с, що є надто повільно для системи з низькою інерцією. За допомогою швидкодіючого джерела енергії, такого як СНЕ з інтерфейсом перетворювача, можна видавати потужність для ефективного пом'якшення коливань частоти та покращення показника *ROCOF*.

Ряд технологій зберігання енергії, є потенційними кандидатами для надання подібних послуг. Так, наприклад, маховики мають час відгуку менший ніж 4 мс і час розряду до 15 хв, літій-іонні, проточні та свинцево-кислотні батареї мають час відгуку до 40 мс і можуть розряджатися як протягом декількох хвилин, так і декількох годин, суперконденсатори забезпечують час відгуку до 10 мс і тривалість розряду, який здебільше не перевищує однієї години [11].

Послуги з балансування режиму енергосистеми традиційно реалізуються на трьох рівнях відповідно до часових шкал і включають: первинне, вторинне та третинне частотні регулювання. Останнім часом у низці країн через прагнення зменшити інерцію було розроблено низку нових послуг з регулювання частоти, які характеризуються швидким відгуком на зміну частоти (англ. *FFR – fast frequency response*).

Зона нечутливості, коефіцієнт спаду, швидкість відгуку та тривалість є основними параметрами при вирішенні питань регулювання частоти. У даний час підвищення точності управління та використання силових перетворювачів (особливо для асинхронних генераторів) може значно зменшити зону нечутливості, у той час як заздалегідь задана зона нечутливості, як і раніше, широко використовується для зменшення зносу обладнання.

З точки зору мережі, більш вузька зона нечутливості та менший коефіцієнт посилення регулювання можуть покращити стабільність частоти електромережі. Однак, з іншого боку, вони можуть викликати надмірне зношування машин, що обертаються, та прискорену деградацію електрохімічних систем акумулювання.

Швидкість відгуку частотної характеристики в основному визначається часовою затримкою T_{delay} та швидкістю наростання K_p потужності. Часова затримка включає час вимірювання, передачі q активації пристрою. Висока швидкість наростання має велике значення для корисності послуги регулювання частоти, отже, системи накопичення енергії, пов'язані з перетворювачем потужності, є придатними засобом реалізації послуги швидкого відгуку на зміну частоти (*FFR*).

Обґрунтування оптимальних параметрів СНЕ включає визначення оптимальної потужності й енергетичної ємності з метою мінімізації експлуатаційних витрат при збереженні цільових показників продуктивності. Дослідження, пов'язані з питанням розміщення й обґрунтування параметрів СНЕ, можуть класифікуватися відповідно сценарію використання, завдань, які необхідно виконати, й алгоритмів і методів, що для цього використовуються.

У той же час у розподільних системах особливий інтерес представляє комплексне вирішення зазначених питань, наприклад, коли оптимальне розміщення СНЕ вбудоване в завдання оптимальної реконфігурації розподільної мережі [12] з метою підвищення очікуваної ефективності її роботи.

Управління енергоспоживанням уже багато років сприймається як ефективний засіб оптимізації режимів електричних мереж. У цьому плані СНЕ можна розглядати і як кероване джерело енергії, і як кероване навантаження. Відповідно, зазначений чинник також має бути врахований при визначенні оптимальних умов впровадження СНЕ в розподільних системах.

Специфіка застосування СНЕ у СРЕ потребує підвищеної уваги до формування протоколів (бажано інтелектуальних) їх зарядки та розрядки шляхом контролю показника *SoC* (*state of charge*).

Неконтрольована зарядка та розрядка СНЕ впливає на термін їхньої служби та призводить до зниження ємності, що відомо як старіння СНЕ, результатом чого є скорочення їхньої продуктивності. Як правило, термін служби СНЕ характеризує кількість циклів із допустимим зниженням потужності менше

80 % від його номінального значення. Оскільки СНЕ є достатньо коштовними пристроями, продовження терміну служби є для них критично важливою проблемою.

Важливо наголосити, що відсутній єдиний підхід до вирішення цього завдання. Тут можуть використовуватися як дискретні моделі, наприклад, на основі використання погодинних графіків зміни параметрів режиму, так і безперервні, орієнтовані на вирішення завдання в реальному часі, у тому числі і з використанням різних оптимізаційних алгоритмів [13–15].

У багатьох дослідженнях наголошувалося, що для знаходження обґрунтованого та сталого вирішення проблеми оптимального вибору СНЕ у розподільній мережі з інтегрованими до неї ВДЕ, обов'язково необхідно врахувати та змодельовати невизначеність навантажень і генерації з боку ВДЕ. Але в переважній більшості випадків для цієї мети застосовувалися методи, у тій чи іншій формі, орієнтовані на використання ймовірнісної інформації.

Разом із тим, можливість отримання необхідної інформації для переконливого застосування будь-яких ймовірнісних методів (зокрема визначення закону розподілу та його параметрів) на рівні СНЕ є досить спірною, особливо коли йдеться про проектну постановку завдання. Швидше за все, тут мають бути використані інші підходи для коректного обліку невизначеності інформації, оскільки врахування цього чинника є принципово важливим для вирішення питань оптимального розміщення й експлуатації СНЕ у розподільних мережах.

Вибір оптимальних місць розміщення та параметрів СНЕ у розподільній мережі є непростим завданням у математичному сенсі. У численних роботах використовувалися різні методи оптимізації: класичні, аналітичні та метаевристичні. Хоча ці підходи до оптимізації вже були застосовні для вирішення деяких завдань, вони всі мають певні недоліки. Класичні методи мають обмеження для енергосистем із високою розмірністю (що є типовим для розподільних систем). Зокрема, метод лінійного програмування відносно легко реалізувати, але зазвичай важко уявити адекватні моделі, які відповідають завданню, що розглядається, у вигляді набору лінійних рівнянь. Аналітичні методи підходять для невеликих і спрощених систем із невеликою кількістю змінних стану хоча і відносно швидко дають дуже точні результати. Тим не менш, їх важко реалізувати для великих і складних систем, пов'язаних із реальними розмірами та різноманітними характеристиками притаманними СНЕ. Окрім того вони можуть генерувати неточні рішення для завдань реального часу.

Метаевристичні підходи найбільше підходять для вирішення складних проблем у розподільних мережах і здатні забезпечити точні, ефективні й оптимальні рішення. Проте метаевристичні методи також мають деякі обмеження, оскільки вони не завжди пропонують оптимальне рішення, крім того у багатьох реальних завданнях деякі обмеження не можуть бути враховані. До цієї категорії відносять генетичні алгоритми, оптимізацію рою часток, штучну бджолину сім'ю, оптимізацію мурашиної колонії, хаотичні алгоритми та низку інших.

Хоча метаевристики мають деякі переваги, вони не володіють сильними можливостями глобального та локального пошуку і, отже, не завжди гарантують глобально оптимальне рішення порівняно з класичними підходами, такими як лінійне програмування. У багатьох випадках можна опинитися в пастці локальних оптимумів під час пошуку глобального оптимуму.

Складним виявляється облік і низки обмежень, які необхідно врахувати при вирішенні цього завдання у СНЕ. Наприклад, встановлення СНЕ не повинно бути дозволено в деяких вузлах розподільних мереж через проблеми з необхідними зонами відчуження. Однак у переважній частині існуючих досліджень екологічними та географічними обмеженнями нехтують при формулюванні проблеми.

Дослідження продовжуються з метою покращення існуючих підходів і гібридизації метаевристичних підходів за рахунок їх поєднання з іншими підходами або їх модифікаціями, що може забезпечити більш ефективні рішення [16].

Об'єднання метаевристик із іншими алгоритмами оптимізації, що отримало назву гібридний метаевристичний підхід, може забезпечити глобально оптимальні рішення для різних завдань, які вирішуються у СНЕ з розподіленими засобами генерування й акумулювання енергії [16]. Наприклад, в [17] використовується алгоритм штучної бджолиної колонії об'єднаний з оптимізацією рою часток для усунення недоліків і забезпечення добре збалансованого гібрида з потужними можливостями локального та глобального пошуків.

Висновки. На відміну від енергосистем, де передбачається використання потужних СНЕ, орієнтованих переважно на реалізацію одного-двох конкретних завдань, у розподільних мережах перед системами накопичення одночасно ставиться багато різнопланових цілей, які ефективно реалізувати, орієнтуючись на єдину технологію, практично неможливо. Таким чином, для розподільних мереж актуальною є постановка питання щодо орієнтації на гібридні системи накопичення.

За умов орієнтації на гібридні СНЕ виникає принципово нова проблема визначення оптимальних параметрів окремих компонентів таких систем, що практично не висвітлювалося в опублікованих роботах з даної проблематики. Додаткова складність розв'язання цього завдання полягає у необхідності її комплексного розв'язання, оскільки, по-перше, параметри окремих складових гібридної СНЕ швидше за

все є взаємозалежними, а по-друге, необхідно врахувати залучення СНЕ у вирішення низки оптимізаційних задач притаманних саме СНЕ.

Через високу вартість СНЕ всі їхні потенційні переваги використання у розподільних мережах і мікросистемах мають бути чітко визначено й оцінено. Слід зазначити, що, крім вартості самої технології накопичення енергії, має бути знижена вартість і допоміжного обладнання, а також монтажу, інтеграції та введення подібних систем в експлуатацію. Іноді ця складова досягає 60–70 % загальної вартості СНЕ.

З метою полегшення впровадження накопичувачів енергії доцільним є створення комплексного стандарту, що дає змогу оцінювати та порівнювати якість і продуктивність різних технологій, надає допомогу користувачам накопичувачів енергії обґрунтувати їх тип і параметри, а також оптимальне розміщення для отримання максимальної вигоди.

Мають бути сформовані відповідні правила для сприяння розгортанню накопичувачів енергії у СНЕ та мікросистемах і заохочення інвестицій з боку зацікавлених сторін. Регулюючі органи повинні надати інвесторам чіткі ринкові моделі, а також адекватні стимули, тоді як нормативні обмеження, що заважають зацікавленим сторонам отримувати дохід, мають бути зняті.

A.F. Zharkin¹, academician of the NAS of Ukraine, Dr. Sc. (Eng.), Prof., **ORCID** 0000-0001-5996-0901

V.A. Popov², Dr. Sc. (Eng.), Prof., **ORCID** 0000-0003-3484-4597

O.S. Yarmoliuk², Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0001-8571-2573

V.O. Natalych², student, **ORCID** 0000-0003-0242-626X

¹ **Institute of Electrodynamics, National Academy of Sciences of Ukraine**

² **National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»**

FEATURES OF ORGANIZATION AND USE OF ENERGY STORAGE SYSTEMS IN DISTRIBUTION NETWORKS

The article analyzes the features and formulates recommendations for the most effective use of the energy storage systems in electrical distribution systems and microgrids in the context of expanding the use of local renewable energy sources. Information about various energy storage technologies is summarized and recommendations are formulated regarding their best applying for various applications in the electric power industry. The tasks that can and should be solved by energy storage systems in distribution networks are considered, as a result of which the expediency of forming hybrid storage systems is substantiated. Based on the analysis of the bibliography and consideration of international experience, the main problems have been identified that require further research for a reasonable choice of the structure, parameters, locations and modes of operation of hybrid energy storage systems, taking into account the specifics of the structure and operation of domestic electric distribution systems with local energy sources. Under the implementation of hybrid energy storage systems, a fundamentally new problem of determining the optimal parameters of individual components of such systems arises, which was practically not covered in published works on this issue. Additionally, difficulty in solving this task is the need for its complex solution, since, firstly, the parameters of the individual components of the hybrid energy storage system are most likely interdependent, and secondly, it is necessary to take into account the involvement of the storage systems in the solution of a number of optimization problems inherent in the electrical distribution systems. In order to facilitate the use of energy storage devices, it is advisable to create a comprehensive standard that allows you to evaluate and compare the quality and performance of different technologies, helps energy storage users justify the type and parameters, as well as optimal placement for maximum benefit.

Keywords: distributed generation, energy storage systems, distribution networks, microsystems, renewable energy sources.

References

1. Muruganantham B., Gnanadass R., Padhy N. Challenges with renewable energy sources and storage in practical distribution systems. *Renew Sustain Energy Rev.* 2017. Vol. 73. Pp. 125–134. DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.089.
2. Dan T. Ton, Merrill A. Smith. The U.S. Department of Energy's Microgrid Initiative. *The Electricity Journal.* 2012. Vol. 25 (8). Pp. 84–94. DOI: 10.1016/j.tej.2012.09.013.
3. Wade N.S., Taylor P.C., Lang P.D., Jones P.R. Evaluating the benefits of an electrical energy storage system in a future smart grid. *Energy Policy.* 2010. Vol. 38 (11). Pp. 7180–7188. DOI: 10.1016/j.enpol.2010.07.045.
4. Schoenung S.M., Eyer J.M., Iannucci J.J., Horgan S.A. Energy storage for a competitive power market. *Annual Review of Energy and the Environment.* 1996. Vol. 21 (1). Pp. 347–370. DOI: 10.1146/annurev.energy.21.1.347.
5. Chen H., Cong T., Yang W., Tan C., Li Y., Ding Y. Progress in electrical energy storage system: a critical review. *Progress in Natural Science.* 2008. Vol. 19 (3). Pp. 291–312. DOI: 10.1016/j.pnsc.2008.07.014.
6. Eyer J., Corey G. Energy storage for the electricity grid: benefits and market potential assessment guide. Albuquerque, New Mexico and Livermore, California: Sandia National Laboratories, 2010. 232 p.

7. Choton K. Das, Octavian Bassa, Ganesh Kothapallia, Thair S. Mahmoudb, Daryoush Habibi Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 91. Pp. 1205–1230. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.068.
8. Nazaripouya H., Wang Y., Chu P., Pota H.R., Gadh R. Optimal sizing and placement of battery energy storage in distribution system based on solar size for voltage regulation. Proc. 2015 IEEE *Power & Energy Society General Meeting*. USA, CO, Denver, 26–30 July 2015. № 15502148. DOI: 10.1109/PESGM.2015.7286059.
9. Sun Sun, Ben Liang, Min Dong, Joshua A Taylor, Phase Balancing Using Energy Storage in Power Grids Under Uncertainty. Proc. IEEE *Transactions on Power Systems*. September 2016. Vol. 31 (5): № 16230408. Pp. 3891–3903. DOI: 10.1109/TPWRS.2015.2492359.
10. Lamichhane S., Nazaripouya H., Mehraeen S. Microgrid stability improvements by employing storage. Proc. IEEE *Green Technologies Conference*. April, 2013. Pp. 250–258. DOI: 10.1109/GreenTech.2013.46.
11. Luo X., Wang J., Wojcik J.D., Wang J., Li D., Draganescu M., Li Y., Miao S. Review of Voltage and Frequency Grid Code Specifications for Electrical Energy Storage Applications. *Energies*. 2018. Vol. 11, no. 5. Pp. 1070. DOI: 10.3390/en11051070.
12. Santos S.F., Fitiwi D.Z., Cruz M.R., Cabrita C.M., Catalão J.P. Impacts of optimal energy storage deployment and network reconfiguration on renewable integration level in distribution systems. *Applied Energy*. 2017. Vol. 185 (1). Pp. 44–55. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.10.053.
13. Wang Y., Tan K., Peng X.Y., So P.L. Coordinated control of distributed energy-storage systems for voltage regulation in distribution networks. Proc. IEEE *Transactions on Power Delivery*. June 2016. Vol. 31 (3). № 16003723. Pp. 1132–1141. DOI: 10.1109/TPWRD.2015.2462723.
14. Nottrott A., Kleissl J., Washom B. Energy dispatch schedule optimization and cost benefit analysis for grid-connected, photovoltaic-battery storage systems. *Renewable Energy*. 2013. Vol. 55. Pp. 230–240. DOI: 10.1016/j.renene.2012.12.036.
15. Teng J-H., Luan S-W., Lee D-J., Huang Y-Q. Optimal charging/discharging scheduling of battery storage systems for distribution systems interconnected with sizeable PV generation systems. Proc. IEEE *Transactions on Power Systems*. May 2013. Vol. 28 (2). № 13934132. Pp. 1425–1433. DOI: 10.1109/TPWRS.2012.2230276.
16. Prakash P., Khatod D.K. Optimal sizing and siting techniques for distributed generation in distribution systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 57. Pp. 111–130. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.099.
17. KiRan M.S., GüNdü Z.M. A recombination-based hybridization of particle swarm optimization and artificial bee colony algorithm for continuous optimization problems. *Applied Soft Computing*. 2013. Vol. 13 (4). Pp. 2188–2203. DOI: 10.1016/j.asoc.2012.12.007.

Надійшла 26.08.2022
Received 26.08.2022