

ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЗАДАЧ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ ЕЕС УКРАЇНИ: СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Отримано 10 серп. 2022; рекомендовано до публікації 27 вер. 2022
Доступно онлайн 30 вер. 2022

М. П. Болотний¹, Ю. Г. Лоєнко², О. О. Кармазін³

Автор для кореспонденції: Олексій Кармазін,
e-mail: alexey.karmazin@gmail.com

Застосування систем накопичення електричної енергії дозволяє створити нові можливості для підвищення якості керування електричними режимами та поліпшити показники функціонування електроенергетичних систем. На сьогодні для накопичення енергії дедалі ширше застосовуються нові типи накопичувачів – електрохімічні акумуляторні батареї, накопичувачі на стислому повітрі, надпровідникові накопичувачі, суперконденсатори, гідроакумулявальні електричні станції. Проведено короткий огляд основних типів накопичувачів енергії, що перебувають на різних стадіях розробки та впровадження. Представлено порівняння основних характеристик систем накопичення енергії, що використовуються в електроенергетиці. Визначено можливі сфери застосування систем накопичення енергії для регулювання усталених і перехідних режимів у ЕЕС України. Використання систем накопичення енергії дедалі ширше застосовуються в практиці регулювання режимів електроенергетичних систем і управління ними, підвищуючи надійність електропостачання споживачів.

Ключові слова. електроенергетична система, режимне управління, системи накопичення енергії, протиаварійне управління.

¹ канд. техн. наук.
<http://orcid.org/0000-0002-7366-2430>

² студентка.
<http://orcid.org/0000-0002-7712-535X>

³ канд. техн. наук.
<http://orcid.org/0000-0002-7628-6880>

^{1,2} НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна.

³ Інститут відновлюваної енергетики НАН. України, м. Київ, Україна.

ENERGY STORAGE SYSTEMS APPLICATION FOR OPERATION MANAGEMENT PROBLEMS IN ELECTRIC POWER SYSTEM OF UKRAINE. STATUS AND DEVELOPMENT PROSPECTS

Received 10 Aug. 2022; accepted 27 Sept. 2022.

Available online 30 Sept. 2022

N. Bolotnyi¹, Y. Loienko², O. Karmazin³

Author for correspondence: Oleksii Karmazin,
e-mail: alexey.karmazin@gmail.com

The use of electrical energy storage systems opens up new opportunities for improving the quality of electrical operation management and improves the performance of electrical power systems. Today, the new types of storage devices have been increasingly used for energy storage, recently. Among them are electrochemical energy storage, compressed-air storage, superconducting storage and supercapacitors, pumped-storage power plants. A brief review of main storage system types with various development and implementation levels is performed. The main energy storage systems characteristics are presented. They are comparing different energy storage technologies for power industry application. The energy storage possibilities have been determined for steady-state and transient operation in integrated power system of Ukraine. The energy storage are increasingly being

¹ Cand. of tech. Sciences.
<http://orcid.org/0000-0002-7366-2430>

² Student.
<http://orcid.org/0000-0002-7712-535X>

³ Cand. of tech. Sciences.
<http://orcid.org/0000-0002-7628-6880>

^{1,2} National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine.

³ Institute of renewable energy, NAS Ukraine, Kyiv, Ukraine.

used in the practice of power system operation and management. This is increasing the power supply reliability of consumers.

Keywords: *electric power system, operation control, energy storage systems, emergency control.*

Вступ. Використання накопичувачів електричної енергії створює можливості для підвищення якості показників керування режимами та функціонування електроенергетичних систем в цілому.

У сучасних умовах становлення нової промислової революції технології накопичення енергії дедалі більше застосовуються для регулювання усталених і перехідних режимів в електроенергетичних системах, незважаючи на високу вартість виготовлення. Так, станом на 2018 рік, комісією з регулювання в енергетиці США було прийнято рішення про допуск до участі в ринках електроенергії й потужності систем накопичення енергії, встановлених в операційних зонах енергокомпаній, в яких є ліцензія незалежного системного оператора або оператора систем передачі. Відповідно до рішень цієї комісії існуюча модель енергоринку, що була зорієнтована на традиційну генерацію, має бути переглянута для виходу на ринок систем накопичення енергії.

Будівництво гідроаккумуляторних електричних станцій (ГАЕС) обмежується наявністю басейнів води або значними капіталовкладеннями при штучному створенні басейнів. Останнім часом стрімко стали реалізовуватися проекти щодо введення в експлуатацію нових типів накопичувачів, як-от електрохімічні акумуляторні батареї, надпровідникові накопичувачі, накопичувачі на стислому повітрі, суперконденсатори.

Висока вартість систем накопичення енергії може компенсуватися такими перевагами:

- забезпечення інтеграції відновлюваних джерел енергії в енергосистему;
- оптимізації потокорозподілу в електричних мережах для скорочення обсягів будівництва додаткових елементів в енергосистемі;
- отримання додаткових швидкодіючих засобів регулювання режиму, що постачаються на ринок системних послуг;
- підвищення надійності електропостачання споживачів;
- іншими перевагами технічного або економічного характеру.

Комерційно вигідне виробництво, наприклад батарей для електромобілів, очікується до 2025–2030 рр. Динаміка зниження вартості для деяких типів накопичувачів наведена в [1].

Постановка завдання. Мета роботи: проаналізувати стан та перспективи розвитку систем накопичення енергії для регулювання усталених і перехідних режимів у електроенергетичних системах України згідно з діючими вимогами [Норми якості електричної енергії в Україні [2]:

Задачі дослідження:

- проаналізувати сучасний стан реалізованих проектів та перспектив розвитку технологій накопичення енергії;
- проаналізувати специфіку роботи систем накопичення енергії з урахуванням обмежень електричної мережі по якості електричної енергії;
- оцінити область можливого застосування систем накопичення енергії для задач протиаварійного та режимного керування режимами в ЕЕС України.

Виклад основного матеріалу. Для проведення дослідження використовувались методи аналізу і синтезу, методи порівняльного, експертного і статистичного аналізу даних, які представлені в наукових працях з проблем розвитку систем накопичення енергії, а також в матеріалах міжнародних аналітичних агентств і організацій. При формуванні прогнозу враховувалися наявність конкурентних переваг і технологічних або дослідних напрацювань, розробок або проектів, а також найперспективніші ніші застосування. Далі наведено основні типи систем накопичення енергії, які були реалізовані в електричних мережах.

Електрохімічні акумулятори. Різноманіття типів акумуляторів постійно збільшується. Найвідомішими з них є свинцево-кислотні, нікель-кадмієві, літій-іонні, натрій-сірчані, бром-цинкові, ванадієві, нікель-металгідридні. Найширше застосовуються в електроенергетичних системах літій-іонні акумулятори – для заміщення оборотного резерву потужності та регулювання частоти. Прогнозоване збільшення ринку літій-іонних батарей з 5,5 млрд доларів США в 2007 році до 35 млрд доларів – 2025-му [1]. Як приклад наведена система накопичення енергії зі встановленою потужністю 100 МВт і ємністю 129 МВт•год, яка була введена в експлуатацію та акумулює енергію з найближчої вітряної електростанції в Австралії [3].

Проточні електрохімічні акумулятори. Прикладом може слугувати ванадієвий проточний акумулятор встановленою потужністю 4 МВт, тривалістю розряду 6 год і часом відгуку 10 мс [4].

Системи накопичення енергії на стислому повітрі. В таких системах накопичення енергії повітря стискається й утримується під тиском у спеціальній ємності великого об'єму. Зазвичай для цих цілей використовуються печери в скельному ґрунті, соляні печери, пористі породи, водоносні шари або нафтогазоносні шари. Розвиток у значних масштабах обмежений наявністю доступних сховищ стисненого повітря. Тому поточні дослідження сфокусовані на розвитку систем зі спеціально створеними резервуарами для зберігання стисненого повітря.

Прикладом є система накопичення, побудована в 1978 році, встановленою потужністю 290 МВт і часом розряду 4 год [5]. Наприкінці 80-х років у США побудована система накопичення потужністю 110 МВт з часом розряду 26 год.

Ємнісні системи накопичення енергії. Системи накопичення енергії цього типу запасують електричну енергію у вигляді електростатичного заряду. Для промислового застосування використовуються суперконденсатори. На даний час ємнісні системи накопичення енергії перебувають в стадії дослідження і розробки прототипу. Дослідники в США і Австралії створили на базі графену надмісткий суперконденсатор, здатний запасати стільки ж енергії, скільки зберігається в літій-іонних батареях. Головна перевага запропонованого пристрою полягає в тому, що заряджати та розряджати він може за лічені секунди (хвилини) [6].

Роторні системи накопичення енергії. Накопичення енергії досягається за допомогою ретельно симетрованих дисків, з'єднаних з мотор-генератором, що конвертує енергію обертової маси в електричну, і навпаки. Час розряду роторних систем накопичення – від декількох секунд до декількох хвилин. У 2011 році була презентована перша роторна система накопичення енергії потужністю 20 МВт, яка призначена для регулювання частоти в операційній зоні незалежного системного оператора Нью-Йорка [7].

Надпровідникові магнітні системи накопичення енергії. Системи накопичення енергії такого типу запасують енергію в магнітному полі, створюваному постійним струмом, що протікає по котушці з надпровідного матеріалу, який розміщений в криогенному середовищі. Система накопичення енергії має дуже високий ККД і генерує в мережу активну та реактивну потужність, які доступні практично миттєво. Є приклад її успішного застосування в енергосистемі Bonneville Power Authority в 1980-х роках, де була встановлена система накопичення енергії потужністю 20 МВт і ємністю 2,4 МВт год. Основною функцією системи накопичення енергії було демпфування низькочастотних коливань [8].

Гідроакмулювальні електростанції. ГАЕС є найпоширенішим протягом тривалого часу видом систем накопичення електроенергії. Сумарна встановлена потужність ГАЕС на даний час складає близько 165 ГВт, або 97 %, в енергосистемах світу [1]. В Україні успішно експлуатується Дністровська ГАЕС, встановлена електрична потужність якої (сім насосів-турбін) у генерувальному режимі має складати 2268 МВт, у насосному режимі – 2947 МВт.

При порівнянні різних технологій накопичення енергії з погляду їх практичного застосування в електроенергетиці використовують різні характеристики накопичувачів, що визначаються їх фізичними властивостями. До таких характеристик належать:

- встановлена потужність – визначається величиною потужності, яку може віддати в ЕЕС система накопичення енергії;
- енергоємність – енергія, яку система накопичення енергії може запасти і видати в ЕЕС;
- тривалість відгуку (пуску) – час переходу системи накопичення енергії з неробочого стану (холостого ходу, режиму зарядки) у стан видачі енергії із заявленими параметрами;
- тривалість розряду – час, протягом якого потужність і енергія постачаються в ЕЕС без підзарядки.

Щільність потужності і енергії визначаються величинами потужності і енергії, що припадають на одиницю ваги накопичувача. Ця характеристика має значення при транспортуванні накопичувачів або в разі пересувних систем накопичення енергії.

У табл. 1 представлені основні характеристики та область застосування технологій зберігання електроенергії відповідно до класифікації [9]

Проведений аналіз основних експлуатаційних характеристик систем накопичення енергії дає можливість адаптувати технології систем накопичення з погляду особливостей функціонування електроенергетики України [10]:

розвиток великих промислових систем накопичення енергії, включаючи ГАЕС, твердотільні акумулювальні електростанції, взаємопов'язаних систем АЕС-ГАЕС і їх інтегрування як в ринок надання системних послуг, так і в інвестиційні програми найбільших електроенергетичних (генерувальних і мережевих) компаній (можливе формування кластерів за напрямками розвитку);

розвиток малої генерації та її включення в оптовий ринок через конструкцію віртуальних електростанцій, зокрема шляхом формування умов для електростанцій власної генерації споживачів;

активізацію розвитку технологій зберігання теплової енергії, в тому числі з використанням фазових переходів, а також використання біопалива для формування синтетичного газу.

Технології акумулювання і зберігання енергії є важливою складовою «нової» енергетики і в цілому нової промислової революції 4.0. Розвиток цих технологій з істотним відставанням від світових лідерів запускається в Україні. На даний момент ринок систем накопичення енергії в Україні більшою мірою представлений такими технічними рішеннями:

- Дніпровський каскад: Київська ГЕС (408,5 МВт), Київська ГАЕС (235,5/135 МВт (турбінний/насосний)), Канівська ГЕС (444 МВт), Канівська ГАЕС (1000/1040 МВт (турбінний/насосний)), Кременчуцька ГЕС (632,9 МВт), Середньодніпровська ГЕС (352 МВт), Дніпровська ГЕС (1569 МВт), Каховська ГЕС (351 МВт), Каховська ГЕС-2 (проект 250 МВт);

Область застосування	Технологія системи накопичення енергії	Відпуск енергії споживачеві	Встановлена потужність системи накопичення енергії, МВт	Періодичність типових циклів	Тривалість процесу розряду	Час відгуку на команду
Керування навантаженням за заданим графіком	Електрохімічні, ємнісні, індуктивні накопичувачі, ГАЕС, ТАЕС	Електроенергія, тепла енергія	1–2000	1–29 разів на добу	15 хв – 1 доба	< 15 хв
Керування точками перевантаження в електричних мережах		Електроенергія, тепла енергія	10–500	0,14–1,25 рази на добу	2–4 год	> 1 год
Перерозподіл інвестицій в об'єктах інфраструктури	Пневмоповітряні акумулятори	Електроенергія, тепла енергія	1–500	0,75–1,25 рази на добу	2–5 год	> 1 год
Регулювання напруги у вузлах	електрохімічні акумулятори	Електроенергія	1–40	10–100 разів на добу	1 с – 1 хв	0,001–1 с
Використання тепла газів, що відходять	Теплові накопичувачі, термодинамічні, пневмоповітряні акумулятори, накопичувачі	Теплова енергія	1–10	1–20 разів на добу	1 год – 1 доба	< 10 хв
Комбінований цикл вироблення теплової та електричної енергії (наприклад, ТЕЦ)		Теплова енергія	1–5	1–10 раз на добу	1 хв – 1 год	< 15 хв
Автономний пуск електростанції (без використання зовнішнього джерела електропостачання)	водень, ТАЕС, ГАЕС	Електроенергія	0,1–400	< 1 рази на рік	1–4 год	< 1 год
Ізольовані енергосистеми	Електрохімічні, ємнісні, індуктивні накопичувачі, ГАЕС, ТАЕС, водневі елементи.	Електроенергія, тепла енергія	0,001–0,01	0,75–1,5 рази на добу	3–5 год	< 1 год
Зміна попиту і скорочення піків споживання		Електроенергія, Теплова енергія	0,001–0,01	1–29 разів на добу	1 хв – 1 год	< 15 хв
Сезоне зберігання	ГАЕС ТАЕС	Електроенергія, тепла енергія	500–2000	1–5 разів на рік	Декілька діб – місяць	1 доба
Регулювання частоти змінного струму	електрохімічні, ємнісні, індуктивні накопичувачі	Електроенергія	1–2000	20–40 разів на добу	1–15 хв	1 хв
Ціновий арбітраж		Електроенергія	100–2000	0,25–1 разів на добу	8–24 год	> 1 год
Вироблення енергії на основі використання ВДЕ	електрохімічні акумулятори	Електроенергія, тепла енергія	1–400	0,5–2 рази на добу	1 хв – 1 год	< 15 хв
«Гарячий» резерв, що обертається	електрохімічні	Електроенергія	10–2000	0,5–2 рази на добу	15 хв – 2 год	< 15 хв
«Холодний» резерв		Електроенергія	10–2000	0,5–2 рази на добу	15 хв – 2 год	< 15 хв

Таблиця 1. Основні характеристики застосування технологій зберігання електроенергії

Table 1. The main characteristics of energy storage systems

- Дністровський каскад: Дністровська ГЕС (702 МВт), Дністровська ГЕС-2 (40,8 МВт), Дністровська ГАЕС (проект 2268/2947 МВт (турбінний/насосний), фактична 972/1248 МВт (турбінний/насосний)).
- Південнобузький каскад: Ташлицька ГАЕС (проект 1900/1350 МВт, фактично 320/450 МВт (турбінний/насосний)), Олександрівська ГЕС (11,5 МВт).
- Малі річки: Сухорабівська ГЕС (300 кВт), Теребле-Ріцька ГЕС (27 МВт), Шишацька ГЕС (550 кВт).

Сьогодні розвиток галузі систем накопичення енергії в Україні стримується сукупністю чинників, характерних для незрілого ринку високотехнологічної продукції, яка за своїми показниками поки що не зайняла стійкої позиції на ринку. Основним таким фактором є порівняно висока вартість систем накопичення енергії. Унікальні функції систем накопичення енергії (підвищення надійності, поліпшення якості електроенергії та показників ефективності власної генерації, резервування, оптимізація графіка споживання), завдяки яким може бути забезпечено виняткове застосування цих систем на практиці,

досі достатньою мірою не забезпечують їх економічну ефективність [11].

Серед найбільш значущих бар'єрів, що перешкоджають розвитку ринку систем накопичення енергії, необхідно виділити такі:

- в умовах діючої моделі оптового ринку електроенергії та потужності накопичувачі не є економічно ефективними та інвестиційно привабливими об'єктами;
- існують обмеження нормативного правового і технічного регулювання електроенергетики, відсутня системна послуга «згладжування мінімумів навантаження» або статус особливого системного генератора;
- спостерігається високий рівень імпортозалежності, практично немає власних технологічних продуктів систем накопичення енергії повного циклу виробництва;
- відсутні успішно реалізовані демонстраційні проекти, які підходять для подальшого масштабування в енергосистему.

Шляхи застосування систем накопичення енергії для задач керування режимами в ЕЕС України. Під час виникнення великих дефіцитів активної потужності, відділення великої ЕЕС від енергооб'єднання, асинхронних режимів відбуваються значні зміни частоти і активної потужності. Підтримання частоти в допустимих межах здійснюється за допомогою оперативного й автоматичного регулювання частоти.

Так, первинне регулювання частоти обмежує відхилення частоти при дефіциті активної потужності в ЕЕС за рахунок мобілізації первинних резервів потужності на енергоблоках, яка реалізується автоматичними регуляторами частоти обертання турбін, що змінюють потужність генераторів у межах наявних на них первинних резервів регулювання та регульовального ефекту навантаження за частотою.

Величина необхідного сумарного нормованого первинного резерву енергооб'єднання на завантаження і розвантаження визначається найбільшим розрахунковим дефіцитом активної потужності, який приймається рівним 1000 МВт. Час повної мобілізації нормованого первинного резерву регулювання частоти становить 30 с.

Вторинне регулювання частоти передбачає використання вторинного резерву потужності для компенсації дефіциту активної потужності, ліквідації перевантаження транзитних ЛЕП, відновлення як частоти, так і використаних резервів первинного регулювання. Для розміщення резервів вторинного регулювання залучаються маневрені гідралічні й теплові електростанції. Максимальний час усунення дефіцитів потужності засобами вторинного регулювання становить 15 хв [8].

Системи накопичення енергії можуть ефективно застосовуватися як резерв первинного і вторинного

регулювання частоти, час їх пуску становить 1–3 с. Це створює умови використання систем накопичення енергії для одночасного виконання функції як первинного, так і вторинного резерву активної потужності. Усунення дефіциту активної потужності за кілька секунд поліпшить якість регулювання частоти при виникненні значних дефіцитів активної потужності.

ЕЕС України являє собою енергооб'єднання з міжсистемними зв'язками обмеженої пропускної здатності. Відключення будь-якої ЛЕП високої напруги викликає значне зниження максимально допустимих перетоків у контрольованих перетинах. З огляду на це, розміщення вторинних резервів активної потужності та їх сумарний обсяг визначаються більшою мірою збереженням існуючого рівня максимально допустимих перетоків при ослабленні контрольованих перетинів, ніж покриттям аварійних дефіцитів потужності.

Напруга в електричній мережі змінюється залежно від навантаження та вироблення електроенергії в певний момент, вказівок диспетчера зі зміни режиму, аварійних ситуацій в ЕЕС (відключення генераторів, трансформаторів, ЛЕП). Відповідно до стандарту «Правила запобігання розвитку і ліквідації порушень нормального режиму електричної частини енергосистем» [13] при роботі зі зниженою напругою і виникненні тенденції зниження напруги вживаються заходи щодо обмеження передачі потужності по ЛЕП і енергоспоживання у вузлах із зниженою напругою.

Якщо рівень напруги після вжитих заходів щодо її відновлення залишається нижче аварійно допустимого значення, відключають чергами навантаження в тому вузлі, де відбулося зниження напруги, до підвищення напруги вище мінімально допустимого значення. Відключення споживачів можна уникнути, якщо в пунктах підключення навантаження використовувати системи накопичення енергії, керування якими здійснюється за рівнем напруги.

При зниженні напруги нижче аварійно допустимого рівня на шинах розподільних підстанцій вмикаються системи накопичення енергії, знижуючи перетоки потужності та падіння напруги в ЛЕП. Як системи накопичення енергії для цього випадку можуть застосовуватися швидкодіючі накопичувачі, які використовуються для автоматичного резервування електропостачання відповідальних споживачів, так і більш повільні, наприклад роторні, накопичувачі.

Наступною сферою застосування систем накопичення енергії може бути інтеграція в енергосистему відновлюваних джерел енергії. Вироблення енергії вітроелектростанціями або фотоелектричними станціями носить імовірнісний характер і залежить від метеоумов. Це ускладнює керування режимом при наявності значної генерації відновлюваних джерел. Прикладом може слугувати енергія великих ВЕС, що працюють паралельно з ЕЕС. Наприклад, в ENTSO-E потужність відновлюваних джерел енергії (у відповідності зі стратегією 20+20+20)

повинна була до 2020 року досягти 20 % сумарної генерації енергооб'єднання. В 2017 році сумарна встановлена потужність ENTSO-E склала 1 136 795 МВт, а сумарне споживання потужності – 3597 ТВт·ч [15].

Стохастичний характер генерації породжує необхідність технічних рішень для перетворення генерації із нестабільної в постійну видачу потужності. Одним із таких рішень є застосування накопичувачів великої потужності, створення технічних комплексів «ВДЕ – система накопичення енергії». Це дасть змогу виключити стохастичний характер генерації та спростити керування потоками потужності від відновлюваних джерел енергії. В цьому разі доцільно використовувати накопичувачі великої енергоємності – ГАЕС або накопичувачі на стислому повітрі.

Ще однією функцією може бути вирівнювання добових диспетчерських графіків навантаження в ЕЕС. Відомо, що добовий графік навантаження ЕЕС має нічний мінімум і два максимуми – ранковий і вечірній. Накопичуючи електроенергію в період нічного мінімуму, коли її вартість мінімальна, і видаючи її в періоди максимумів, накопичувач сприяє згладжуванню добового графіка. Це дозволяє зменшити наявну потужність в ЕЕС, знизити перетоки потужності по ЛЕП систем передачі в періоди максимумів. Як накопичувачі, що застосовуються для згладжування добових графіків навантаження, використовуються ГАЕС або накопичувачі на стислому повітрі, що дають змогу накопичувати протягом декількох годин великі обсяги енергії.

Споживачі електричної енергії можуть бути ідентифіковані як енергоустановки особливої групи, якщо раптове порушення їх електропостачання спричиняє виникнення загрози життю і здоров'ю людей, майну фізичних та юридичних осіб, державному або муніципальному майну, загрози негативного впливу на довкілля. До споживачів особливої групи можна віднести системи електропостачання нафто-, газопроводів, системи власних потреб електричних станцій, металургійні, хімічні виробництва і т. п. Споживач електричної енергії особливої групи повинен бути забезпечений автономним джерелом електропостачання. З цією метою використовуються зазвичай дизельгенераторні установки. В процесі запуску автономного джерела, тривалість якого становить кілька секунд, вибіг двигунів може викликати неприпустимі пускові струми в разі самозапуску асинхронних двигунів або випадання з синхронізму синхронних двигунів. Включення електрохімічних акумуляторів або надпровідникових магнітних накопичувачів як автономного джерела з часом відгуку 10–20 мс дозволить мінімізувати ці негативні процеси.

Для електропостачання відповідальних споживачів великої потужності здійснюється двостороннє живлення. В деяких випадках можливе використання секціонованої схеми електропостачання з використанням автоматичного введення резерву, що забезпечує самозапуск асинхронних двигунів власних потреб електростанцій, обмежуючи час перерви електропостачання, що становить менше ніж 1-2 с. Особливістю роботи синхронних

двигунів, підключених до секції, що втратила живлення за час циклу автоматичного введення резерву, є випадання із синхронізму. Так, робота автоматичного введення резерву при живленні синхронного навантаження дозволяється в двох випадках: після відключення синхронного двигуна; після зняття збудження й переходу в пусковий режим. Завдяки використанню системи накопичення як автоматичного введення резерву можливо відновити електропостачання через 10–20 мс та здійснювати електропостачання за секціонованою схемою як асинхронного, так і синхронного навантаження.

Автоматичне протиаварійне управління в ЕЕС реалізується за допомогою таких видів протиаварійної автоматики [10]:

- автоматика запобігання порушенню стійкості паралельної роботи;
- автоматика обмеження перевантаження обладнання;
- автоматика ліквідації асинхронних режимів;
- автоматика обмеження зниження частоти і напруги;
- автоматика обмеження підвищення частоти і напруги.

Функції протиаварійного керування реалізуються протиаварійною автоматикою такими видами керуючих впливів:

- короткочасне і тривале розвантаження енергоблоків ТЕС і АЕС;
- поділ ЕЕС на несинхронно працюючі райони;
- електричне гальмування;
- відключення генераторів;
- відключення споживачів електроенергії;
- автоматичне завантаження генераторів;
- зміна топології електричної мережі, режимів роботи і експлуатаційного стану керованих елементів електричної мережі.

Керуючі впливи протиаварійного керування можуть бути розраховані на основі заданих суб'єктом оперативно-диспетчерського управління функціональних залежностей обсягу керуючого впливу від параметрів електроенергетичного режиму. Якщо для вибраного керуючого впливу передбачено відключення споживачів або завантаження генераторів, то можливе застосування систем накопичення енергії. Система протиаварійного керування висуває жорсткі вимоги щодо швидкодії реалізації керуючого впливу. Тому з метою запобігання порушенню статичної або динамічної стійкості генераторів, двигунового навантаження і запобігання перевантажень ЛЕП і обладнання ЕЕС як додаткові керуючі впливи можуть бути використані електрохімічні акумулятори, суперконденсатори або надпровідникові системи накопичення енергії.

Отже, ефективність застосування систем накопичення енергії визначається можливістю їх використання не тільки для виконання тих функцій регулювання параметрів режиму, для яких вони призначаються, але і для одночасного виконання інших функцій керування режимами в ЕЕС.

Висновки. Технології накопичення енергії розвиваються високими темпами, системи накопичення енергії дедалі ширше застосовуються в практиці регулювання режимів ЕЕС і керування ними. Проведений аналіз з погляду глобального вектора розвитку технологій, суспільства й економіки та впливу на кінцеву конфігурацію енергосистеми показав, що незалежно від перспективного сценарію, основними стратегічними задачами держави й енергокомпаній в розвитку електроенергетики є такі: акумулювання в галузі нових компетенцій, знань і технологій; розробки і відтворення передових технологій; дослідження невирішених проблем використання систем накопичення енергії. Так, розосередження резерву первинного і вторинного регулювання, розміщеного на системах накопичення енергії по вузлах енергооб'єднання, сприятиме зниженню аварійних перетоків в разі дефіциту активної потужності й тим самим підвищенню максимально допустимих перетоків у контрольованих перетинах. Мала тривалість відгуку, значні величини потужності й енергоємності відкривають широкі перспективи застосування накопичувачів для управління як усталеними, так і перехідними режимами ЕЕС.

ПОСИЛАННЯ

1. The strategic energy technology plan. European commission, 2017 [Електронний ресурс]. URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/research-and-technology/strategic-energy-technology-plan_en.
2. Норми якості електричної енергії в Україні [Електронний ресурс]. URL: <https://www.nerc.gov.ua/?id=19529>
3. The Hornsdale Power Reserve [Електронний ресурс]. URL: <https://hornsdalepowerreserve.com.au/>.
4. Eric Lewis. Flow sells: A long-term energy storage solution // Power Engineering International. Vol. 19, Is. 2. 2011.
5. Графенові суперконденсатори [Електронний ресурс]. URL: <https://tehnobzor.com/hi-technews/169-grafenovye-superkondensatory.html>.
6. Marco Semadeni. Energy storage as an essential part of sustainable energy systems. A review on applied energy storage technologies // CEPE working paper. 2003. N 24.
7. Flywheel technology [Електронний ресурс]. URL: <http://www.beaconpower.com>
8. В. В. Бушуев, Н. Н. Лизалек, Н. Л. Новиков. Динамические свойства энергообъединений. М.: Энергоатомиздат, 1995. 320 с.

9. Technology Roadmap - Energy Storage – Analysis - International Energy Agency. [Електронний ресурс]. URL: <http://www.iea.org>.
10. Стратегія низьковуглецевого розвитку України до 2050 року. Київ – 2017. 53 с. [Електронний ресурс]. URL: <https://menr.gov.ua>.
11. Lezhniuk P. D., Kulik V. V., Netrebsky V. V., Teptya V. V. Principle of the smallest action in electrical engineering and power engineering: Monograph. – Vinnitsa: VNTU, 2014. 212 p.
12. Постанова НКРЕКП 14.03.2018 № 309. Кодекс систем передачі. Оперативно-диспетчерське управління. Регулювання частоти і перетоків активної потужності.
13. ГНД 34.20.567-2003. Правила застосування системної протиаварійної автоматики Запобігання та ліквідації небезпечного зниження або підвищення частоти в енергосистемах. Науково-технічний центр електроенергетики «НЕК «Укренерго». Київ, 2003. 40 с.
14. СОУ НЕК 20.571:2018. Визначення необхідних умов і алгоритмів врахування ВЕС та СЕС при налаштуванні протиаварійних автоматичних пристроїв, призначених для запобігання порушенню стійкості (АЗПС) у перетинах ОЕС України, на режим роботи яких вони мають вплив. Методичні рекомендації. ДП «НЕК «Укренерго». Київ, 2018. 53 с.
15. ENTSO-E 2017 [Електронний ресурс]. URL: <https://annualreport2017.entsoe.eu/> (дата звернення: 23.10.2022).

REFERENCES

1. The strategic energy technology plan. European commission, 2017 [Online]. URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/research-and-technology/strategic-energy-technology-plan_en (дата звернення: 23.10.2022).
2. Standards of quality of electric energy in Ukraine [Online]. URL: <https://www.nerc.gov.ua/?id=19529>
3. The Hornsdale Power Reserve [Online]. URL: <https://hornsdalepowerreserve.com.au/> (дата звернення: 23.10.2022).
4. Eric Lewis. Flow sells: A long-term energy storage solution // Power Engineering International. Vol. 19, Is. 2. 2011.
5. Graphene supercapacitors [Online]. URL: <https://tehnobzor.com/hi-technews/169-grafenovye-superkondensatory.html> (дата звернення: 23.10.2022).
6. Marco Semadeni. Energy storage as an essential part of sustainable energy systems. A review on applied energy storage technologies // CEPE working paper. 2003. N 24.

7. Flywheel technology. [Online].
URL: <http://www.beaconpower.com>
8. Bushuev V. V., Lizalek N. N., Novikov N. L. Dynamic properties of energy-united. M.: Energoatomizdat, 1995. 320 p.
9. Technology Roadmap - Energy Storage – Analysis - International Energy Agency. [Online].
URL: <http://www.iea.org>.
10. Low-carbon development strategy of Ukraine until 2050. Kyiv – 2017. – 53 p. [Online].
URL: <https://menr.gov.ua>
11. Lezhniuk P. D., Kulik V. V., Netrebsky V. V., Teptya V. V. Principle of the smallest action in electrical engineering and power engineering: Monograph. - Vinnitsa: VNTU, 2014. 2 p.
12. Resolution of the NCRECP 14.03.2018 No. 309. Code of transmission systems. Operational and dispatching management. Regulation of frequency and flows of active power.
13. ГНД 34.20.567-2003. Rules for the use of system anti-emergency automation Prevention and elimination of dangerous reduction or increase in frequency in power systems. Scientific and technical center of electric energy "NEC "Ukrenergo". Kyiv, 2003. 40 p.
14. COУ HEK 20.571:2018. Determination of the necessary conditions and algorithms for taking into account WPPs and SPPs when setting up emergency automatic devices designed to prevent stability violations (AZPS) at intersections of the UES of Ukraine, on the mode of operation of which they influence. Guidelines. SE "NEC "Ukrenergo". Kyiv, 2018. 53 p.
15. ENTSO-E 2017 [Online].
URL: <https://annualreport2017.entsoe.eu/>.