

Я. А. Косенко
В. В. Мартинюк

ЗАСТОСУВАННЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ ДЛЯ СТАБІЛІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Вінницький національний технічний університет;

Анотація

У роботі представлено огляд проблеми стабільності сучасних електроенергетичних систем, що посилюється через інтеграцію відновлюваних джерел енергії. Наведено аналіз фізичних принципів роботи суперконденсаторів та їх ключових характеристик. Проведено порівняльний аналіз суперконденсаторів та акумуляторних батарей за такими параметрами, як густина потужності, густина енергії та швидкість реакції. Визначено перспективи застосування цих пристроїв для надання послуг швидкого регулювання частоти та покращення якості напруги в електричних мережах.

Ключові слова: суперконденсатор, іоністор, стабілізація частоти, якість електроенергії, відновлювані джерела енергії, накопичувач енергії, швидка частотна характеристика.

Abstract

The paper provides an overview of the stability problem in modern power systems, which is exacerbated by the integration of renewable energy sources. An analysis of the physical principles of supercapacitors and their key characteristics is presented. A comparative analysis of supercapacitors and battery storage is provided based on parameters such as power density, energy density, and response time. The prospects for using these devices for providing fast frequency response services and improving voltage quality in electrical grids are identified.

Keywords: supercapacitor, ionistor, frequency stabilization, power quality, renewable energy sources, energy storage, fast frequency response.

Вступ

Сучасна електроенергетика переживає фундаментальну трансформацію, пов'язану з масовим впровадженням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), таких як сонячні та вітрові електростанції. Їхня популярність пояснюється екологічними перевагами, проте існує низка технічних викликів. Одним із найбільш суттєвих недоліків є нестабільність їхньої генерації, відома як переривчастість [5]. Це призводить до швидких і непередбачуваних коливань потужності, різких змін у її потоках (високі швидкості нарощування/зниження) та загального зниження обертової інерції системи, яка є критично важливою для підтримки стабільності частоти. Усунення цих негативних впливів вимагає застосування новітніх технологічних підходів, серед яких ключову роль відіграють системи накопичення енергії [4].

Сьогодні для стабілізації мереж використовуються різноманітні підходи. Традиційні методи передбачають використання резервів потужності на теплових та гідроелектростанціях. Цей підхід перевірений часом, проте має обмеження через відносно низьку швидкість реакції та значні експлуатаційні витрати. Новітні методи, навпаки, спираються на розвиток силової електроніки та систем накопичення. Акумуляторні батареї здатні накопичувати великі обсяги енергії, але їхня швидкість реакції та кількість циклів заряду/розряду є обмеженими [3]. На цьому тлі особливої актуальності набуває використання суперконденсаторів (іоністорів) — пристроїв, здатних миттєво поглинати або віддавати значну потужність, завдяки чому можна досягти значного підвищення стабільності енергосистеми [2].

Результати дослідження

Розглянемо ключові характеристики суперконденсаторів та проведемо порівняння їх з іншими технологіями. Суперконденсатори, на відміну від звичайних конденсаторів, використовують механізм подвійного електричного шару (ПЕШ) на межі "електрод-електроліт". Завдяки застосуванню пористих матеріалів із винятково великою площею поверхні, таких як активоване вугілля, вдається накопичувати значний заряд електростатично, без хімічних реакцій [1]. Це забезпечує унікальні властивості: високу густину потужності, практично миттєвий заряд/розряд та величезну кількість циклів (понад 500 тис.).

Важливо розуміти, що акумулятори та суперконденсатори не є конкурентами, а доповнюють одна одну. Їхня принципова відмінність полягає у способі накопичення енергії: акумулятори використовують повільні хімічні реакції, що призводять до деградації матеріалів, тоді як суперконденсатори — швидкий фізичний процес розділення зарядів, що і забезпечує їхню виняткову довговічність. Суперконденсатори використовуються як буфер для миттєвої компенсації коливань потужності, надаючи так звану швидку частотну характеристику (Fast Frequency Response, FFR). Вони поглинають енергію при різкому зростанні генерації і миттєво віддають її при провалах, підтримуючи стабільність частоти. Крім того, вони значно покращують якість електроенергії, компенсуючи короткочасні провали напруги [4].

Таблиця 1. Порівняння характеристик накопичувачів енергії

Характеристика	Акумулятор (Li-ion)	Суперконденсатор
Густина потужності	Середня	Дуже висока
Густина енергії	Висока	Низька
Швидкість заряду/розряду	Хвилини/години	Секунди
Кількість циклів	Тисячі	Сотні тисяч/мільйони
Основна роль	Зберігання енергії	Покриття піків потужності

У таблиці представлено порівняльний аналіз основних експлуатаційних характеристик літій-іонних акумуляторів та суперконденсаторів. Як видно з таблиці, акумулятори характеризуються високою густиною енергії, що дозволяє їм накопичувати значні її обсяги для тривалого живлення, однак вони поступаються суперконденсаторам за густиною потужності та швидкістю заряду/розряду. Суперконденсатори, навпаки, демонструють надзвичайно високу густину потужності та здатність до миттєвого заряду/розряду, що робить їх ідеальними для короткочасного покриття пікових навантажень. Крім того, вони мають значно більший ресурс циклів, що є критично важливим для задач частотного регулювання. Таким чином, основна роль акумуляторів полягає у довготривалому зберіганні енергії, тоді як суперконденсатори ефективні для миттєвої компенсації потужності.

Висновки

Стабілізація частоти та напруги є важливим етапом для забезпечення надійної роботи сучасних електромереж. Сучасні підходи, зокрема використання суперконденсаторів, пропонують значні переваги завдяки унікальному поєднанню високої густини потужності та довговічності. Майбутнє стабілізації мереж полягає в інтелектуальних гібридних системах накопичення енергії (ГСНЕ), де суперконденсатори покривають миттєві піки потужності, а акумулятори забезпечують довготривале енергопостачання. Таке поєднання не лише покращує технічні параметри, але й оптимізує економічну доцільність проектів накопичення енергії. Гармонійне поєднання традиційних та новітніх підходів дозволить створити більш ефективні, надійні та гнучкі системи електропостачання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Miller J.R., Simon P. Materials for electrochemical capacitors. Science, 2008, 321(5889), 651-652.
2. Шевченко А. Б., Поліщук В. Г. Гібридні системи накопичення енергії для стабілізації мікромереж. Вісник інженерної академії України, 2022, 2(1), 45-51.
3. Kouchachvili L., Yaïci W., Entchev E. Hybrid battery/supercapacitor energy storage system for the electric vehicles. Journal of Power Sources, 2018, 374, 237-248.
4. Бойко В.М., Гриб О.Г. Аналіз ефективності систем накопичення енергії для підвищення якості електроенергії. Електроніка та автоматика, 2021, 18-24.
5. Chen H., Cong T. N., Yang W. Progress in electrical energy storage system: A critical review. Progress in Natural Science, 2009, 19(3), 291-312.

Косенко Ярослав Анатолійович — студент групи ЗКН-24б, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: aroslavbezdonata@gmail.com

Науковий керівник: **Мартинюк Володимир Валерійович** — доцент кафедри загальної фізики Вінницького національного технічного університету, Вінниця, e-mail: martynyuk.v.v@vntu.edu.ua

Kosenko Yaroslav Anatoliyovych — student of group 2CS-24b, Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: aroslavbezdonata@gmail.com

Academic supervisor: **Martyniuk Volodymyr Valeriiovych** — Associate Professor of the Department of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: martynyuk.v.v@vntu.edu.ua