

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ЛІТІЙ-ІОННИХ КОНДЕНСАТОРІВ В СКЛАДІ ГІБРИДНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

І. О. Бевза^{1,2}, PhD D. Guilbert², PhD M. Hinaje², к. т. н. О. Ф. Бондаренко¹

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна, м. Київ;
²University of Lorraine, France, Nancy
bondarenkoaf@gmail.com

Представлено результати аналізу переваг та актуальних задач використання літій-іонних конденсаторів (LIC) у поєднанні з системами паливних елементів з протоннообмінною мембраною. Основний акцент зроблено на тому, що LIC відрізняються більшими значеннями щільності енергії, низьким саморозрядом і більшими значеннями напруги елемента у порівнянні з суперконденсаторами. Наведено класифікацію різних архітектур гібридизації паливних елементів з LIC та можливі майбутні виклики під час реалізації накопичувачів із LIC.

Ключові слова: гібридний накопичувач, електрична енергія, літій-іонний конденсатор, паливний елемент, протоннообмінна мембрана.

В останні роки спостерігається посилення тенденції до скорочення викидів вуглекислого газу до атмосфери. У зв'язку з цим все більшої актуальності набувають водневої технології енергетики [1]. Використовуючи водень, дуже важливо враховувати шляхи його виробництва для зменшення викидів парникових газів (ПГ). Справді, водень можна генерувати за допомогою різних процесів, таких як термохімічні процеси та процеси електролізу води.

Паливні елементи — це електрохімічні пристрої, які можуть перетворювати водень і кисень в електрику, виділяючи лише воду і тепло як побічні продукти. Серед усіх існуючих технологій паливних елементів найбільш поширеною з точки зору використання твердого електроліту, низькотемпературного режиму та швидкого запуску є паливні елементи з протоннообмінною мембраною (PEM). Особливо ця технологія підходить для транспортних додатків, резервного живлення та систем розподіленої генерації, таких як мікромережі. Однак технологія паливних елементів PEM має декілька ключових проблем, які обмежують її розповсюдження. Довговічність та продуктивність — основні із них. Одним зі шляхів подолання цих проблем є поєднання паливних елементів PEM з іншими пристроями накопичення енергії, такими як літій-іонні батареї (LIB) і суперконденсатори (SC). Аналіз літератури, тематика якої присвячена PEM паливним елементам показав, що їх можна комбінувати з LIB і SC або тільки з суперконденсаторами або батареями [2–5].

Нещодавно була впроваджена технологія літій-іонних конденсаторів (LIC), яка привернула увагу своїми характеристиками [6]. Дійсно, LIC поєднує технології LIB і SC, відповідно, на аноді та катоді LIC. У порівнянні з LIB і SC, LIC пропонує деякі переваги, такі як низький саморозряд, більш високі значення щільності енергії та напруги елемента.

Основна мета цієї роботи полягає в тому, щоб дослідити можливості гібридизації паливного елемента та показати перспективи використання, особливо LIC.

Вибір технології зберігання енергії в першу чергу обумовлюється її особливостями і вартістю. По-перше, SC відомі своїми перевагами, серед яких — висока щільність потужності, що перевищує 10 кВт/кг. Крім того, SC мають тривалий термін зберігання енергії (до 20 років, близько 1 млн циклів), високу надійність і ефективність (> 98 %), дуже низький еквівалентний послідовний опір (ESR), широкий діапазон робочих температур (від –40 до +85°C), низькі експлуатаційні витрати, екологічно чисті матеріали, які не потребують обслуговування. З іншого боку, їхня енергоємність обмежена 5–10 Вт·год/кг [7, 8]. Результати аналізу технологій зберігання енергії наведені в таблиці.

В результаті аналізу наявних на ринку пристроїв LIB, SC та LIC з точки зору їхніх характеристик — щільності енергії та щільності потужності, було створено відповідну діаграму у вигляді графіка Рагоне.

Порівняння пристроїв накопичення енергії

Пристрій	LIB	SC	LIC
Переваги	<ul style="list-style-type: none"> - висока щільність енергії; - висока напруга елемента; - низький саморозряд 	<ul style="list-style-type: none"> - висока щільність потужності; - високе значення ємності; - високий термін служби; - відсутність моніторинг напруги; - компактність; - висока ефективність; - висока динаміка. 	<ul style="list-style-type: none"> - висока робоча температура; - висока щільність потужності; - компактність; - висока ефективність; - висока динаміка; - низький саморозряд; - висока напруга елемента.
Недоліки	<ul style="list-style-type: none"> - компактність; - обмежений термін служби; - низька щільність потужності; - запитується моніторинг напруги (BMS); - ефективність; - повільна реакція 	<ul style="list-style-type: none"> - менша щільність енергії, ніж LIB; - високий саморозряд; - нижча напруга елемента, ніж LIC і LIB. 	<ul style="list-style-type: none"> - менша щільність енергії, ніж LIB; - потребує моніторингу напруги (CMS).

Таким чином, проведений аналіз топологій гібридизації паливних елементів і ринку енергоощадних технологій дозволив зробити припущення про доцільність розвитку технології літій-іонних конденсаторів у рамках гібридизації водневих паливних елементів на основі протонообмінних мембран. Майбутні роботи будуть присвячено визначенню кількісних характеристик поліпшення гібридних накопичувачів електричної енергії на основі літій-іонних конденсаторів з врахуванням області застосування таких накопичувачів.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Chen M., Chou S.-F., Blaabjerg F., Davari P. Overview of power electronic converter topologies enabling large-scale hydrogen production via water electrolysis, *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 4, p. 1906.
2. Wang Y., Sun Z., Chen Z. Rule-based energy management strategy of a lithium-ion battery, supercapacitor and PEM fuel cell system. *Energy Procedia*, 2019, vol. 158, p. 2555–2560.
3. Fathabadi H. Combining a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) stack with a Li-ion battery to supply the power needs of a hybrid electric vehicle, *Renewable Energy*, 2019, vol. 130, p. 714–724.
4. Jiang H., Xu L., Li J., Hu Z., Ouyang M. Energy management and component sizing for a fuel cell/battery/supercapacitor hybrid powertrain based on two-dimensional optimization algorithms, *Energy*, 2019, vol. 177, p. 386–396.
5. Wang Y., Sun Z., Chen Z. Energy management strategy for battery/supercapacitor/fuel cell hybrid source vehicles based on finite state machine, *Applied Energy*, 2019, vol. 254, p. 113707.
6. Macias A., El Ghossein N., Trovão J. et al. Passive fuel cell/lithium-ion capacitor hybridization for vehicular applications, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, vol. 46, no. 56, p. 28748–28759.
7. Conway B. E. *Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications*, New York, Springer Science+ Business Media New York, 1999.
8. Naseri F., Karimi S., Farjah E., Schartz E. Supercapacitor management system: A comprehensive review of modeling, estimation, balancing, and protection techniques, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, vol. 155, p. 111913.

I. Bevza, D. Guilbert, M. Hinaje, O. Bondarenko

Prospects for the use of lithium-ion capacitors in hybrid electric energy storages

The paper presents the results of the analysis of the advantages and current challenges of using lithium-ion capacitors (LIC) in combination with fuel cell systems. The main emphasis is on the fact that LICs have higher values of energy density, low self-discharge, and higher values of element voltage compared to supercapacitors. The authors classify different architectures of hybridization of fuel cells with LIC and describe possible future challenges during the implementation of LIC.

Keywords: hybrid electric energy storage, lithium-ion capacitor, fuel cell, proton exchange membrane.