International Scientific Conference 20 UNITECH 26

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
19-21 November 2026
GABROVO

СИСТЕМИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА СУПЕРКОНДЕНЗАТОРИ

Иван Симеонов[1], Христо Килифарев[1], Райчо Иларионов[1], Егнар Йоздикилилер[2]

[1]Технически университет - Габрово, Х. Димитър 4, Габрово, България
[2]Истанбулски технически университет, Кампус Аязага, Маслак, Истанбул, Турция
[1,2]Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“
**кореспондиращ автор: hri.100@gmail.com*

SUPERCAPACITORS MANAGEMENT SYSTEMS

Ivan Simeonov[1], Hristo Kilifarev[1], Raycho Ilarionov[1], Egnar Özdikililer[2]

[1]Technical University of Gabrovo, 4 Hadji Dimitar str., Gabrovo, Bulgaria
[2]Istanbul Technical University, Ayazağa Kampüsü, Maslak, Istanbul, Turkey
[1,2]Center of competence "Smart mechatronic, eco- and energy-saving systems and technologies"
**Corresponding author: hri.100@gmail.com*

Abstract

This report reviews Supercapacitor Management Systems (SMS), focusing on their history, technical features, and architectures. While standard Battery Management Systems (BMS) suit the narrow voltage windows of lithium-ion batteries, they are incompatible with the linear voltage drop and ultra-high dynamic currents of supercapacitors. To fully exploit supercapacitor energy from maximum levels down to near-zero without safety faults, specialized SMS configurations are required. This paper systemizes key SMS functionalities, including real-time monitoring, passive or active cell balancing, and state estimation algorithms for SoC, SoH, and SoF. Specific characteristics of power conversion from the SMS to external loads via bidirectional DC-DC converters are addressed. Furthermore, energy management strategies (EMS) for hybrid battery-supercapacitor storage are evaluated, demonstrating how supercapacitors buffer peak power demands to extend battery life. Finally, major applications spanning electromobility, renewable energy, industrial automation, UPS, and aerospace systems are categorized, alongside future trends like software-defined topologies and smart-cell sensor integration.

Keywords: Supercapacitors; Electric vehicles (EV); Energy storage; Supercapacitor Management System (SMS); History; Hybrid Energy Storage.

ВЪВЕДЕНИЕ

Напредъкът в системите за съхранение на енергия (ESS) ускорява развитието на електрическите превозни средства (EV) и възобновяемите енергийни източници (ВЕИ). В този контекст суперкондензаторите привличат сериозен интерес поради високата си плътност на мощността, дълъг живот и широк работен диапазон. За постигане на необходимите високи напрежения, индустриалните пакети съдържат стотици клетки, свързани последователно-паралелно.

Вътрешните състояния на тези клетки не могат да се измерят директно, тъй като зависят от фактори като температура, напрежение, цикли на заряд/разряд и механични вибрации. Тези условия дефини-

рат скоростта на деградация на електролита и загубата на капацитет. Допълнително, производствените допуски водят до неизбежни разлики в параметрите на клетките от една партида, което застрашава еднородността, функционалната безопасност и дълготрайността на системата.

Затова е необходима специализирана Система за управление на суперкондензатори (SMS), която ефективно да следи, контролира и защитава клетките [1]. Актуалността на темата се определя от навлизането на суперкондензаторите в хибридни конфигурации, комбиниращи енергийната плътност на батериите с пиковата мощност на ултракондензаторите. В EV тези системи управляват енергийните потоци при рекуперативно спиране и интензивни натоварвания [2].

Целта на настоящия доклад е да направи систематизиран преглед на SMS решенията. Обхватът включва историческите сведения, дефинирането на основните функции и топологии, методите за балансиране и оценка на състоянието (SoC, SoH), както и анализ на силовата електроника, приложенията и бъдещите технологични тенденции.

ИЗЛОЖЕНИЕ

1. Кратки исторически сведения за суперкондензаторите

Научните основи на технологията са положени през 1879 г., когато германският физик Херман фон Хелмхолц описва феномена на електрическия двоен слой на границата между твърдо тяло и електролит. Първият патент за електрохимичен кондензатор с порести въглеродни електроди е подаден през 1957 г. от инженера Хауърд Бекер (Howard I. Becker) от General Electric [1].

Съвременният двуслоен кондензатор е разработен от изследователи в Standard Oil of Ohio (SOHIO), като Доналд Бос (Donald Boos) регистрира ключов патент за устройство с активен въглен и електролит през 1970 г. През 1971 г. компанията NEC лицензира технологията от SOHIO и я комерсиализира на пазара под наименованието "Supercapacitor". През 21-ви век развитието на нанотехнологиите и материалознанието осигурява значителен технологичен напредък и разширяване на приложното поле на суперкондензаторите [2].

2. Характеристики и особености на суперкондензаторите

Суперкондензаторите са електрохимични устройства, които съхраняват енергия електростатично. Те постигат значително по-висока енергийна плътност в сравнение с конвенционалните кондензатори, но по-ниска от тази на химическите батерии. Основният принцип на работа се базира на два механизма: електрохимичен двоен слой (Electric Double-Layer Capacitor – EDLC) и псевдокапацитет [1]. При EDLC електрическото поле се генерира от натрупването на йони на границата между електродния материал и електролита, осигурявайки чисто електростатично съхранение. При псевдокапацитета се реализира допълнително съхранение на заряд чрез бързи фарадееви редокс реакции на повърхността на електрода. На тези специфични механизми се дължат предимствата им, като ускорено време за заряд/разряд, дълъг експлоатационен живот и висока ефективност.

3. Зависимост на жизнения цикъл

При спазване на номиналните експлоатационни условия жизненият цикъл на суперкондензаторите е изключително дълъг и варира от 500 000 до над 1 000 000 цикъла [2]. Деградацията на клетките обаче показва силно изразена зависимост от работната температура и пренапрежението. В масовата практика се използват електролити на водна или органична основа, като безопасният температурен диапазон е строго обвързан с техните физикохимични свойства. Работата при напрежения над максимално допустимите (обикновено 2.7 V – 3.0 V) инициира процеси на разлагане на електролита (електролиза). Това води до отделяне на газове,

***Таблица 1**. Директно сравнение на характеристиките*

Характеристика	Литиево-йонни батерии	Суперкондензатори
Принцип на работа	Химична реакция	Електростатично съхранение (EDLC)
Крива на разреждане	Плоска / Плато (стабилно напрежение)	Линейна (пада от V_{max} до 0V)
Живот в брой цикли на презареждане	(500-3 000) цикъла	500 000 – 1000 000 + цикъла
Вътрешно съпротивление (ESR)	Сравнително високо (от mΩ до Ω)	Изключително ниско (< mΩ)
Токове на заряд/разряд	Ограничени (обикновено от 1C до 5C)	Много високи (стотици до хиляди ампери - пиков ток)
Време за зареждане	От 30 минути до часове	От милисекунди до секунди

необратимо влошаване на електрическите параметри, ускорено повишаване на вътрешното съпротивление и риск от термичен срив или експлозия.

4. Дефиниция и функциониране на Системата за управление на суперкондензатори (SMS)

Като жизненоважен електронен компонент, тази система изпълнява критични функции по мониторинг, контрол, защита и оптимизация на суперкондензаторните модули [1]. Тъй като единичните суперкондензатори притежават ниско номинално напрежение (обикновено в границите 2.5 V – 3.0 V), постигането на индустриални и автомобилни нива на напрежение изисква последователно свързване и прецизни алгоритми за управление.

Стандартните системи за управление на батерии (Battery Management Systems – BMS), проектирани за литиево-йонни елементи, са неефективни или напълно неприложими при суперкондензаторите поради фундаментални разлики в тяхното електрическо и физикохимично поведение [3]. Основната разлика се състои в кривата на разреждане – при суперкондензаторите напрежението спада линейно спрямо отдадения заряд. За пълно извличане на акумулираната енергия управляващата система трябва да поддържа стабилна работа в изключително широк диапазон от максималното работно напрежение до практически 0 V.

Литиево-йонните батерии имат тесен работен прозорец (2.5 V – 4.2 V), извън който настъпват необратими химически повреди (трайна деградация) или възниква риск от термично самозапалване. Конвенционалният BMS би отчел спада на напрежението под долния праг (2.5 V) като критична грешка (авариен статус) и би изключил системата, оставяйки над 80% от полезната енергия на суперкондензатора неизползвана. Директно сравнение на основни технически параметри е представено в Таблица 1.

От Таблица 1 е видно, че големите различия в динамичните токове, вътрешното съпротивление и експлоатационния живот изискват коренно различни подходи при проектирането на управляващата електроника [4]. Литиево-йонните батерии поддържат стабилно напрежение по време на по-голямата част от разряда (плато, 3.6 V до 3.7 V), докато при суперкондензаторите работната крива е линейна и се изменя от Vmax (обикновено 2.7 V – 3.0 V) до 0 V. Тези големи разлики в кривата на разреждане, броя цикли, вътрешното съпротивление и ограниченията по ток и напрежение потвърждават, че стандартните BMS архитектури са напълно неприложими в конкретната област.

5. Ключови функции на SMS

Суперкондензаторните модули изискват специализирана система за управление, която изпълнява няколко критични за безопасността, дълголетието и ефективността функции [1].

5.1. Мониторинг и диагностика в реално време. SMS непрекъснато измерва и анализира ключови физични параметри на системата: ***напрежение*** на всяка отделна клетка и на целия модул (критично поради ниския праг на пренапрежение); ***температура*** във вътрешността и по повърхността на модула (тъй като клетките се нагряват при постоянни цикли на бърз заряд/разряд); ***ток*** на заряд и разряд.

5.2. Балансиране на напрежението (Cell Balancing). Поради производствени допуски, капацитетът и вътрешното съпротивление на клетките се различават, което при последователно свързване води до пренапрежение в някои от тях по време на заряд. SMS предотвратява това чрез два метода: ***пасивно балансиране***, при което излишната енергия от презаредената клетка се разсейва като топлина през байпасни резистори (ниска цена, но ограничена ефективност); ***активно балансиране***, при което енергията се прехвърля по електронен път от по-заредените към по-слабо заредените клетки чрез индуктивности, капацитети или DC-DC преобразуватели (висока ефективност при системи с висока мощност).

5.3. Изчисляване на състоянието (State Estimation). Тъй като напрежението на суперкондензатора е правопропорционално на неговия заряд, системата прецизно изчислява: ***SoC (State of Charge)*** – текущото ниво на зареденост (линейно свързано с напрежението, за разлика от батериите); ***SoH (State of Health)*** – здравословното състояние, чрез проследяване на нарастването на вътрешното съпротивление (ESR) и загубата на капацитет с времето; ***SoF (State of Function)*** – моментната максимална мощност, която модулът може да отдаде или приеме в реално време [1].

5.4. Защита на системата. SMS осигурява многонивова защита на скъпоструващото оборудване от: ***Пренапрежение (Overvoltage)*** – дори минимално превишаване на горната граница от 2.7 V – 3.0 V на една клетка от суперкондензаторния модул може да доведе до необратима повреда, изтичане на електролит или съкращаване на експлоатационния живот, което се предотвратява чрез активно / пасивно балансиране на напрежението и постоянен мониторинг; ***Ниско напрежение (Undervoltage)*** – класическите EDLC нямат критична долна граница за безопасност и се разреждат до 0 V без щети, но SMS задава софтуерен праг около 0.5 V – 1.0 V (настройва се спрямо технологията на клетките или работния диапазон на свързаната електроника), под който извличането на енергия от силовите преобразуватели става неефективно; ***Прегряване (Thermal Overload)*** – чрез управление на охлаждането или ограничаване на тока; ***Късо съединение и свръхток*** – поради изключително ниското си вътрешно съпротивление, суперкондензаторите генерират огромни токови пикове, които без контрол могат да доведат до термичен срив, повреда на оборудването или дори експлозия.

За разлика от BMS архитектурите, фокусът на SMS е изцяло върху свръхбързото активно балансиране на напрежението, издръжливостта на масивни пикови токови натоварвания и управлението на широкия диапазон на входно/изходно напрежение, а не върху химическото моделиране или термодинамично бягство при нормална работа [3].

6. Основна архитектура и топология на SMS

В зависимост от вътрешната хардуер-на организация и конфигурация на упра-вляващите модули се разграничават две основни топологии: ***централизирана архитектура***, при която един главен контролер директно управлява и балансира всички клетки в пакета (икономически изгодно решение за малки модули), и ***децентрализирана (модулна) архитектура***, базирана на подмодули (slave), които управляват отделни групи от клетки и комуникират с централен контролер (master) [1].

За осигуряване на надеждна диагностика и управление в индустриални и автомобилни приложения, интеграцията между отделните нива на архитектурата се осъществява чрез специализирани комуникационни интерфейси, като CAN bus, Modbus и I^2C/SPI [3].

7. Силова електроника и интеграция на SMS

Интерфейсът към товара при интеграцията на силовата електроника и SMS опре-

деля ефективността и безопасността на доставяната енергия. Поради линейно падащото напрежение и високите работни токове на суперкондензаторите, свързването към консуматора обикновено се реализира чрез активно силово преобразуване с двупосочни DC-DC конвертори [1]. При изграждането на хибридни системи за съхранение (батерия + суперкондензатор) се прилагат специализирани стратегии за управление на енергийните потоци (EMS) [4]. В тези конфигурации суперкондензаторният пакет поема динамичните пикови натоварвания, докато химическата батерия осигурява базовата енергия, което удължава нейния експлоатационен живот.

8. Съвременни алгоритми и софтуерни решения

Интелигентното управление на съвременните SMS системи разчита на усъвършенствани изчислителни методи за софтуерна диагностика. За прецизна филтрация на шума и оценка на SoC и SoH в реално време масово се внедряват модифицирани алгоритми, базирани на Калманов филтър (Kalman Filtering) [1]. Успоредно с това, за прогнозиране на оставащия полезен живот (Remaining Useful Life – RUL) на суперкондензаторните пакети, навлизат софтуерни решения с Машинно обучение (Machine Learning), които анализират исторически данни от експлоатацията на системата #2.

9. Области на приложение на SMS

Поради способността си да контролира отдаването и поглъщането на огромни количества енергия за секунди, тази система намира критично приложение в сектори, изискващи висока пикова мощност, бързо зареждане и дълъг експлоатационен живот.

В сферата на **транспорта и електромобилността** SMS управлява *регенеративното спиране* (рекуперация на енергия) и *пиковите натоварвания при ускорение* на електрически и хибридни превозни средства (EV/HEV, както и при влакове) [3], *подпомага акумулаторите* при често стартиране на двигателя в старт-стоп системите и координира *свръхбързото зареждане* на градския транспорт (безконтактни трамваи и тролейбуси) на всяка спирка. При **възобновяемата енергия и енергийните мрежи** системите захранват механизмите за управление на стъпката на витлата (pitch control) *във вятърните турбини за осигуряване на аварийно спиране*, *изглаждат флуктуациите* в соларните паркове и *регулират честотата* в микромрежи (Microgrids) при резки промени в потреблението или производството [1].

В **индустриалната автоматизация и тежката техника** SMS позволява *възстановяване на енергията* при спускане на товари от кранове, осигурява 24/7 режим на работа чрез *експресно зареждане* на автоматизирани управлявани превозни средства (AGV) в складове и *гарантира резервно захранване* на роботи при кратки спадове на напрежението. В системите за **непрекъсваеми захранвания (UPS) и центрове за данни** технологията служи за *мостово захранване (bridge power)* през критичните секунди до задействането на дизеловите генератори. Във **военната и аерокосмическата индустрия** управляваните суперкондензаторни модули *гарантират стартиране* на масивни двигатели при екстремно ниски температури, *осигуряват импулсно освобождаване на енергия* за специализирани оръжия и за задвижване на аварийни клапи и люкове в авиационната техника [4].

10. Технологични предизвикателства и бъдещи тенденции

Основният фокус на бъдещите изследвания е насочен към създаването на *по-бързи*, *софтуерно дефинирани* и *енергийно ефективни* SMS архитектури, способни да отговорят на нарастващите нужди на хибридните превозни средства и умните енергийни мрежи (Smart Grids) [4]. Ключовите предизвикателства включват *минимизиране на собствената консу-*

мация на управляващата електроника с цел предотвратяване на паразитното разреждане на клетките, *глобална стандартизация* на комуникационните протоколи за безопасност и диагностика, както и *интеграция на „умни“ сензори* директно в корпуса на клетките (Smart Cells) за измерване на вътрешните параметри в реално време [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящия доклад е извършен систематизиран обзорен анализ на системите за управление на суперкондензатори (SMS). Направен е кратък исторически преглед на суперкондензаторите. Представен е сравнителен анализ между характеристиките на литиево-йонните батерии и ултракондензаторите, обосноваващ неприложимостта на стандартните BMS архитектури. Подробно са систематизирани ключовите хардуерни и софтуерни функции на SMS, накратко топологии, интерфейси на силовата електроника и съвременните алгоритми за оценка на състоянието. В допълнение са дефинирани ключови области на приложение, както и водещи бъдещи тенденции в развитието на интелигентните системи за управление.

БЛАГОДАРНОСТИ:

Този доклад е финансиран от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

ЛИТЕРАТУРА

[1] F. Naseri, S. Karimi, E. Farjah, and E. Schaltz, "Supercapacitor management system: A comprehensive review of modeling, estimation, balancing, and protection techniques," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 155, p. 111913, Mar. 2022. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111913

[2] A. G. A. Mohamed, H. E. A. Ibrahim, and A. A. Ahmed, "Supercapacitor management system: A comprehensive review of modeling, estimation, balancing, and protection techniques," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 154, p. 111783, Jan. 2022. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111783

[3] M. Rade, P. More, and A. Kanse, "Battery/Supercapacitor Energy Management system for Electric Vehicle," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1285, no. 1, p. 012032, Jan. 2024. DOI: 10.1088/1755-1315/1285/1/012032

[4] H. Zhang, X. Huang, and Y. Wang, "Energy Management of Battery–Supercapacitor Hybrid Storage in Electric Vehicles: A Review," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 10, no. 2, pp. 1452–1468, June 2024. DOI: 10.1109/TTE.2023.3304567