

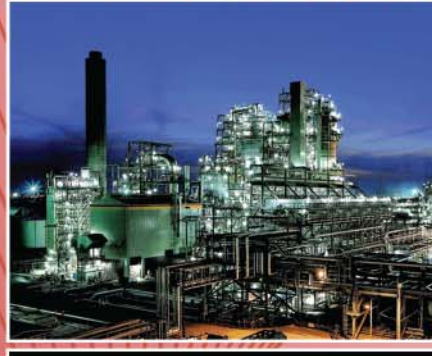
ISSN br. 0354-8651



List Saveza energetičara
Broj 1-2 / Godina XVIII / Mart 2016.
UDC 620.9

energija

■ ekonomija ■ ekologija



ENERGETIKA 2016

Никола Ракић, Небојша Јуришевић, Милун Бабић
Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу, Србија
Наташа Ђоковић

Иновациони центар Хемијског факултета, Универзитет у Београду, Београд, Србија

UDC:621.4.004.4

Технологије складиштења електричне енергије

РЕЗИМЕ

Узимајући у обзир непредвидиву природу потрошње енергије, јавила се потреба за резервама које би биле у приправности и спремне да задовоље вршина оптерећена. Такође, извесни облици генерације енергије подразумевају већу продукцију од реалних потреба у датом тренутку и расипање вишкова. Ово је усмерило истраживања ка решењу оваквих врста проблема и превазилажењу проблематике стохастичке природе производње и потрошње енергије. Овај рад управо даје преглед технологија за складиштење електричне енергије. Наведене су кондензаторске, суперкондензаторске и магнетне суперпроводљиве технологије акумулације електричне енергије. Такође, дат је преглед и поређење хемијских технологија складиштења електричне енергије које подразумевају батерије на бази оловне киселине, натријум сумпор, никл кадмијум и литијум јонске батерије, гориве ћелије и проточне батерије.

Кључне речи: акумулација електричне енергије, батерије, гориве ћелије, кондензатори

ELECTRICITY STORAGE TECHNOLOGY

ABSTRACT

Considering the unpredictable nature of energy consumption, the need for reserves that would be on standby and ready to meet the peak load has appeared. Also, certain forms of energy generation mean greater production of real needs at a given time and a waste of surplus. All of this has directed researches toward the solution of these kinds of problems and overcoming the problems of the stochastic nature of energy production and consumption. This paper gives an overview of technologies for electrical energy storage. Those are the condenser, super condenser and magnetic superconductive technologies for accumulation of electricity. In addition an overview and comparison of chemical electricity storage technologies that include batteries based on lead acid, sodium sulfur, nickel-cadmium and lithium-ion batteries, fuel cells and flow batteries are given.

Keywords: accumulation of electricity, batteries, fuel cells, capacitors.

1. УВОД

Модерне друштвене потребе за оптималном производњом и потрошњом електричне енергије већ су постале изазов и питање безбедности у погледу енергетских мрежа. Континуирано повећање енергетске потражње у интегрисаној преносној мрежи доводи до сложеног и мање сигурног рада електроенергетског система. Истовремено, раст електричних оптерећења полако али сигурно доводи квалитет напајања у питање. Пошто су кон-

венционални извори енергије (синхрони генератори) високо инертна опрема, њихов одговор на све поремећаје у систему напајања је спор и понекад није у могућности да задржи систем стабилним. Такође, поред конвенционалних извора енергије ту су и производни системи који користе обновљиве изворе. Њих махом карактерише производња која је неретко у нескладу са тренутним потребама и као таква се суочава са расипањима енергије или немогућностима њеног искоришћења. Ово је место где технологија за складиштење енергије

може играти веома важну улогу у циљу очувања стабилности система и квалитета снабдевања. У том случају, очекује се од система за складиштење енергије да олакша последице настале услед разних пригушујућих осцилација, наглих промене у оптерећењу и прекида у преносу или дистрибутивном систему [1].

У тексту ће даље бити речи о хемијским технологијама складиштења електричне енергије, електростатичким технологијама, као и о форми електромагнетног складиштења.

2. ЕЛЕКТРОСТАТИЧКО И ЕЛЕКТРОМАГНЕТНО СКЛАДИШТЕЊЕ

Складиштење електричне енергије се може постићи у електростатичкој форми која се односи на кондензаторе и суперкондензаторе, или у форми електромагнетног складиштења које подразумева суперпроводљиво магнетно енергетско складиште.

2.1 Кондензатори

Кондензатори раде складиштећи енергију у електричном пољу између две електроде (металне плоче) раздвојене изолационим материјалом названим диелектрик. Складиштење се унапређује повећањем површина електрода и смањењем дебљина диелектрика. Кондензатори су ограничени у свом потенцијалу за складиштење енергије због ниске енергетске густине и малог капацитета, па су због тога замењени апликацијама за складиштење енергије великих размера тј. суперкондензаторима.

2.2 Суперкондензаторски системи складиштења енергије

Суперкондензатори су такође познати као ултракондензатори или двослојни кондензатори. Као и батерије, суперкондензатори су засновани на електрохемијским ћелијама које садрже две проводничке електроде, електролит и порозну мембрану која омогућава транзит јона између две електроде. Међутим, редукционе реакције се не јављају у ћелијама, радни напон је нижи како би се енергија електростатички складиштила на додирима између површина електролита и две проводничке електроде [2,3]. У ствари, ова структура ствара два кондензатора (електролит - негативна електрода и електролит - позитивна електрода) и из тог разлога они се називају двослојним кондензаторима.

Ускладиштена енергија у кондензаторима је директно пропорционална њиховом капацитету и квадрату напона између клем електрохемијске ћелије, а капацитет је пропорционалан површини

електрода и обрнуто пропорционалан удаљености између електрода. Дакле, главна разлика између кондензатора и суперкондензатора је употреба порозних електрода са великим површинским областима које пружају веће густине енергије у систему [2,4].

Због ниског ћелијског напона (око 3 V), жељени напон и капацитет суперкондензатора се постиже редном и паралелном везом скупа ћелија [5].

Постоје две врсте суперкондензатора у зависности од дизајна електрода [2]: симетрични и асиметричних суперкондензатори. За разлику од оних несиметричних, симетрични суперкондензатори користе исти материјал за своје позитивне и негативне електроде. Даља класификација може се извршити на основу материјала од кога су сачињене електроде [6]. У том смислу, разликују се електроде од активног угља, метал-оксид електроде и електронско спровођене полимерне електроде. Електроде од активног угљеника се најчешће користе у комерцијалним системима због ниске цене и високог капацитета. Ове електроде обезбеђују капацитет од 100 до 1000 пута већи по јединици запремине у односу на конвенционалне електrolитичке кондензаторе [2]. С обзиром на ограничен напон суперкондензаторске ћелије, правилан избор материјала за електролит је веома битан. Постоји неколико типова електролита и они се могу класификовати у водене и органске [2].

Као што је поменуто, материјали електролита и електрода имају фундаментални утицај на капацитет енергије и снаге суперкондензатора, као и на његово динамичко понашање. Заправо, производ еквивалентне отпорности електролита и капацитета суперкондензатора одређује његову временску константу пуњења и пражњења. Ова еквивалентна отпорност је веома мала (мања од 1 mΩ [2]), што значи да се постижу кратке временске константе. Поред тога, 10 пута већа густина снаге се може постићи него код конвенционалних батерија. Ове особине, у комбинацији са високим самопражњењем система (које може бити 20% од његовог номиналног капацитета у 12 часова) дефинишу систем као кандидата за кратковременске апликације са кратким временским одзивом.

Друге важне одлике суперкондензатора су њихов дуг живот, између 50.000 и 500.000 циклуса практично без одржавања и енергетска ефикасност око 75-80%. Временски циклуси пуњења и пражњења система су између 1 и 30 секунди на номиналној снази, а специфична снага система и густина снаге су веома високе, 2000-5000 W/kg и 20.000-30.000 W/m³. Међутим, његова специфична енергија и густина енергије су ниске, 2-5 Wh/kg и 10.000 Wh/m³, због отежаног приступа јона порозној површини електроде [7]. На крају, може се констатовати да је најважнији недостатак супер-

кондензатора њихова висока цена, процењена на 5 пута већу од оловних батерија, 9.500 \$/kW [2].

2.3 Суперпроводљиво магнетско енергетско складиштење (СМЕС)

СМЕС је релативно скорашња технологија. Први систем заснован на овој технологији саграђен је 1970. године [9]. Њен рад се заснива на складиштењу енергије у магнетном пољу, које је створено пропуштањем једносмерне струје кроз велики суперпроводљиви калем на ниским температурама.

Ускладиштена енергија се израчунава као производ самоиндуктивности калема и квадрата јачине струје која протиче кроз њега [9]. Дакле, карактеризација калема има централну улогу у пројектовању система. У зависности од радне температуре система, суперпроводљиви калемови се могу класификовати као: високо температурни калемови који раде на температури око 70 К и ниско температурни калемови, старија технологија са радним температурама око 5 К. Максимална струја која може да тече кроз суперпроводник функција је температуре. Што су ниже оперативне температуре то су више јачине струја које се могу постићи. Генерално, постиже се већа густина енергије од оне код конвенционалних батерија. Баланс између трошкова и потреба система одређује која технологија ће се користити.

Систем за хлађење се мора разматрати као сржни елемент система, јер је фундаменталан за одржавање суперпроводничког калема у криогеном стању [2]. У том смислу, систем има два крио хладњака, први је одговоран за хлађење суперпроводничког калем помоћу течног хелијума или азотног купатила, а други је потребан да се охладе штитови око купатила [2]. Срећом, енергија потребна за ове расхладне системе је много мања од енергије која је ускладиштена у систему. Дакле, узимајући у обзир губитке енергије, СМЕС системи имају веома високу енергетску ефикасност, и до 90% [9]. Крио хладњаци могу задржати радну температуру система на 20 К са потрошњом енергије нижом од 20 W/s [2].

Када се сумирају карактеристике СМЕС система, као најважнија се истиче њихова способност да убризгају или апсорбују велике количине енергије у кратком временском интервалу. Енергетски капацитети ових система се крећу од 100 kW до 10 MW, а могуће је да им се убризга енергија до номиналне снаге за само неколико минута пре него што дође до пражњења [9]. Поред тога, СМЕС системи имају веома дуградни век од неколико десетина хиљада циклуса [9]. Упркос њиховим dobrим технолошким карактеристикама, заправо постоји врло мало изграђених СМЕС система, углавном због високих трошкова. Цене варирају између 1.000 и 10.000 \$/kW [10].

3. ХЕМИЈСКА ЕНЕРГЕТСКА СКЛАДИШТЕЊА

Хемијска енергетска складиштења се могу даље поделити на електрохемијска и термохемијска складиштења енергије. Електрохемијско складиштење односи се на конвенционалне батерије, као што су батерије на бази оловне киселине, никл метал хидрид, литијум-јонске батерије и проточне батерије (цинк бром, ванадијум редокс). Такође, електрохемијско складиштење енергије се постиже и у горивим ћелијама, најчешће горивим ћелијама водоника, али такође укључује директан-метанол, растопљени карбонат игориве ћелије на чврсте оксиде. Опције термохемијског складиштења укључују методе: соларни водоник, соларни метал, соларни амонијак и соларни метан дисоцијација-рекомбинација.

Даље ће бити сумиране најраспрострањеније опције за хемијско складиштење енергије, које обухватају различите типове батерија и горивих ћелија. Друге хемијске опције за складиштење енергије, као што су термохемијске технологије, иако обећававајуће, још увек су у фази развоја и неће бити помињане овде.

3.1 Батерије на бази оловне киселине

Ћелије батерија на бази оловне киселине се састоје од сунђерасте оловне аноде и олово (IV) оксида као катоде, обе уроњене у разблажену сумпорну киселину - електролит, са оловом као струјним колектором. Током пражњења, олово сулфат је производ на обе електроде. Сулфатне наслаге постају веће и тешке за раскидање у току пуњења, ако се батерија превише испразни или чува испразњена дужи временски период. Водоник се производи током пуњења, што доводи до губитка воде ако се батерије прекомерно напуну [11].

Батерије на бази олова су дозрела технологија, присутне преко једног века. Оне су најзаступљенија технологија за складиштење електричне енергије широм света. Њихова популарност је резултат њихове широке расположивости и разумно ниских цена. Недостаци ових оловних батерија су њихова тежина, ниска специфична енергија и специфична снага, кратак животни век (100-1000 циклуса) [11], високи захтеви одржавања, опасности повезане са оловом и сумпорном киселином током производње и одлагања као и пад капацитета на ниским температурама.

3.2 Натријум сумпор батерије

Na-S батерије користе високу температуру реакције између натријума и сумпора, одвојених бета глиницом - електролитом. Ове батерије имају одличан животни циклус, велику енергетску густину и релативно су зрела технологија. Ови аку-

мулатори су идеални за управљање квалитетом електричне енергије и за апликације које пеглају пикове. Недостаци Na-S акумулатора су њихова висока цена, високо дневно самопражњење и високи температурни услови за рад.

3.3 Никл кадмијум (Ni-Cd) и никл-метал хидрид (Ni-MH) батерије

Ni-Cd батерије користе никл оксид - хидроксид за катоду и металик кадмијума као аноду са калијум - хидроксидом као електролитом. Ове врсте батерија су биле веома популарне између 1970. и 1990., али су у великој мери потиснуте Ni-MH батеријама због инфериорног радног века, меморијског ефекта, густина енергије и токсичности кадмијума (у Ni-Cd) у односу на Ni-MH батерије. Ni-MH такође имају предност побољшане способности рада због ендотермичке природе реакције пражњења и високу толеранцију претераног пражњења [12]. Ni-MH користе никл – оксид - хидроксида за катоду и калијум - хидроксид као електролит.

Ni-Cd и Ni-MH батерије су зрелије технологије са већом густином енергије, нижим захтевима за одржавањем и бољим животним циклусом него оловни акумулатори. Оне су, међутим, скупље од оловних акумулатора, уз могућност дугорочног смањења трошкова због пада цене самих материјала. Поред тога, Ni-Cd батерије садрже токсичне компоненте (кадмијум) што их чини еколошки слабо прихватљивим [11].

3.4 Литијум јонске (Li-ion) батерије

Литијум - јонске батерије су углавном засноване на кобалту или фосфатима. У оба извођења јони литијума се крећу између аноде и катоде како би генерисали струју. Li-ion батерије имају висок однос енергије и тежине, без ефекта меморије су и ниског су самопражњења. Цене могу бити високе и појачани продор ове технологије може погурати цене навише с обзиром на ограничене литијумске ресурсе који су већ осиромашени [13].

3.4.1 Кобалтне литијум јонске батерије

Кобалтне литијум-јонске батерије имају високу ефикасност и густину енергије и снаге. Мане укључују високе трошкове због ограничене доступности кобалта, безбедносна и потребу за софистицираним управљањем батерије [11].

3.4.2 Фосфатне литијум јонске батерије

Литијум јонске батерије засноване на фосфатима имају већу ефикасност од кобалтних при чему задржавају густину енергију и снаге скоро подједнако као код кобалтних, по нижим ценама. Фосфатне литијум-јонске батерије су новија технологија од кобалтно заснованих и захтевају даљи

развој. Као и код кобалтних и ове батерије имају безбедносне импликације и захтевају софистицирано управљање [11].

3.5 Гориве ћелије

Гориве ћелије користе енергију електрохемијске конверзије за производњу и складиштење електричне енергије. Електрична енергија се производи када гориво (анода) и оксидант (катода) реагују у присуству електролита. Типично током рада, реагенти нестају, производи реакције ће истећи док електролит остаје у ћелији. Енергија се производи континуално док се проток реактаната и производа одржава. Гориве ћелије се разликују од батерија у томе што се реагенти конзумирају и морају се допуњавати. Реверзибилне гориве ћелије су дизајниране тако да реагент и електролит производе струју плус додатни производ, који се може преобратити додавањем електричне енергије како би се производ вратио у почетни реагент. У водоничним ћелијама, водоник делује као реагент, а кисеоника као оксидант при чему се формирају вода и струја.

Гориве ћелије нуде више предности. Имају веома високу густину енергије, применљивост на мале и велике размере, једноставну модуларну употребу итд. Међутим, тренутно су скупе и имају проблем веома ниске укупне ефикасности у производњи водоника [14,11]. Горива ћелија је најодговарајући начин да се користи водоник. Међутим, обновљиви извори енергије се могу користити за напајање електролизера, који производи водоник и кисеоник из воде. Водоник може бити одвојен и чуван, а затим коришћен по потреби у горивим ћелијама за производњу електричне енергије. Апликација гориве ћелије као генератора је енергетски најефикаснији начин производње електричне енергије из водоника [14,11].

3.6 Проточне батерије

Проточне батерије су релативно млада технологија. Њихов оперативни принцип се заснива на реверзибилним електрохемијским реакцијама које се јављају у сету ћелија повезаних у серији, паралелно или на оба начина, у циљу постизања жељеног нивоа напона. За разлику од конвенционалних батерија, два различита електролитичка раствора на бази воде садржана су у посебним резервоарима. Током нормалног рада батерије, ови водени раствори се упумпавају кроз електрохемијске ћелије где се реакције дешавају [2]. Три типа комерцијално доступних проточних батерија су најзаступљенији: ванадијум - редокс батерија, цинк - бром батерија и полисулфид - бромид батерија. С обзиром да се њихов рад заснива на редукционим и оксидационим реакцијама електролитичког раствора, ове врсте батерија се такође називају редокс проточне

батерије. Током процеса пуњења, електролит А оксидише на аноди, док електролит Б врши реакцију редукције на катоди. Циклус пражњења се састоји од обрнутог процеса.

Једна од главних предности проточних батерија јесте да је њихов енергетски капацитет лако мерљив, јер зависи од запремине ускладиштеног електролита. Ово води до нижих инсталационих трошкова што је систем већи. Као резултат тога, капацитети енергије и снаге проточних батерија су независне карактеристике: снага система зависи од броја ћелија и величина електрода. Али оперативни трошкови нису занемарљиви, због контроле електролитичких токова и пумпи [2]. У том смислу, цинк - бром батерија показује лошије перформансе од ванадијум - редокс и полисулфид - бромид батерије, пошто је потребна трећа пумпа за рецикулацију комплекса брома.

Друге интересантне карактеристике проточних батерија су њихова способност да постану потпуно празне без оштећења и њихово веома ниско самопражњење, јер се електролити чувају у посебним запечаћеним резервоарима. Дакле, редокс проточне батерије се показују као системи са дугим веком, ниским трошковима одржавања и могућношћу складиштења енергије током дугог временског периода.

3.6.1 Ванадијум редокс проточне батерије

Ванадијум редокс проточне батерије складиште енергију у два резервоара, анолитички и католитички резервоар, који садрже растворе сумпорне киселине. У анолитичком резервоару V^{2+}/V^{3+} јони се користе као електролит, док се као електролит у католитичком резервоару користе V^{4+}/V^{5+} јони [15]. Када дође до електрохемијске реакције, угљеничне електроде омогућавају проток електрона, док се електрична равнотежа постиже помоћу кретања водоникових јона кроз мембрану која раздваја два електролита. С обзиром да производи хемијске реакције остају растворени у електролиту, обрнути процес доводи раствор до њиховог првобитног стања. Штавише, не постоји опасност од унакрсне контаминације електролита, јер оба садрже исти тип јона метала.

Радни век система је око 15-20 година [2], са више од 1.000 циклуса пуњења и пражњења у пуном капацитету. Међутим, док електролити не захтевају посебно одржавање, препоручује се замена сепараторске мембране сваких 5 година [15]. Систем може да постигне енергетску ефикасност од 78% [16], а то резултира релативно ниском ценом складиштења велике количине енергије на дуже време.

3.6.2 Цинк-бром проточна батерија

У цинк-бром проточној батерији два водена раствора базирана на Zn и Br и чувана у посебним

резервоарима протичу кроз електролитичке ћелије у којима долази до реверзибилних електрохемијских реакција. Током процеса пражњења, бромидни јони Br^- се конвертују у бром Br_2 на позитивној електроди, који реагује са другим органским аминима и ствара густо бромно уље које тоне на дно резервоара. У међувремену, на негативној електроди позитивни јони цинка Zn^{2+} се конвертују у металоид Zn. Обрнута реакције од описане се одвија током процеса пуњења батерије. Електроде су састављене од композита карбон-пластика и раздвојене су помоћу микро порозне полиолефин мембране [17].

Од проналаска цинк-бром батерије 1970. године, ова технологија је еволуирала до тачке да је сада комерцијално доступна у величинама од 1/3 MW, са могућношћу да обезбеди своју номиналну снагу од 2 до 10 часова [18]. Заиста, велике количине енергије могу се складиштити на дуже време, због практично непостојања самосталног пражњења батерије. Друге важне карактеристике ове технологије су њена релативно висока специфична енергија 75-85 Wh/kg [2] (између 2 и 3 пута већа од оловних батерија), висока енергетска ефикасност 75-85% [2] и дужи животни век од 2000 циклуса пуњења и пражњења у пуном капацитету без оштећења [2]. У смислу заштите животне средине, ови производи су у основи направљени од рециклиране пластике тиме омогућавајући ниску цену производње и високу рециклирајућу моћ.

3.6.3 Полисулфид-бромид проточне батерије

Рад полисулфид-бромид проточне батерије, такође названих регенеративне гориве ћелије, заснован је на електрохемијских реакцијама између два електролита на бази соли: натријум - бромид (NaBr) и натријум - полисулфид (Na_2S_x). Електролити су раздвојени полимерном мембраном која дозвољава само размену позитивних јона натријума [2,17]. Током циклуса пуњења, бромид јони (Br^-) претварају се у трибромид јоне (Br_3^-) на позитивној електроди ћелије. На негативној електроди, растворене честице натријума (S_4^{2-}) се у полисулфидном електролиту редукују на сулфидне јоне (S_2^{2-}). Циклус пражњења се састоји од обрнутог процеса.

Пошто је полисулфид-бромид батерија практично без самосталног пражњења, то је чини погодном за складиштење енергије током дугог временског периода. Штавише, природа је богата хемијским елементима присутним у батерији и стога су трошкови за ову врсту батерија разумни [17]. С друге стране, квар резервоара може довести до емитовања отровних бромних гасова у природу. Ефикасност полисулфид-бромид батерије је око 75% у великим системима, а радни век је релативно дуг, око 15 година [2].

Табела 1.- Основне карактеристике технологија за акумулацију електричне енергије [2]

Технологија	Цена	Енергетска класа (MWh)	Опсег снага (MW)	Животни век (година)	Ефикасност (%)
Суперкондезаторски системи	6800 €/kWh	0,01	0,05 – 0,1	8 - 17	65 - 90
Суперпроводљиви магнетни системи	/	0,001 – 0,015	1-100	20	80
Батерије на бази оловне киселине	210 – 270 €/kWh	0,001 – 40	0,05 – 10	5 – 15	75 – 80
Натријум сумпор батерије	210 – 250 €/kWh	0,4 – 244,8	0,05 – 34	12 – 20	75 – 85
Никл кадмијум батерије	400 – 2400 \$/kWh	6.75	45	13 – 16	72
Литијум јонске (Li-ion) батерије	900 – 1300 \$/kWh	0.0015 – 50	0.015 – 50	14 – 16	78 – 88
Гориве ћелије	2 -15 €/kWh	120	0.3 – 50	15	35 – 73
Ванадијум редокс проточне батерије	600 \$/kWh	2 – 120	0.25 – 12	10 – 20	65 – 88
Цинк-бром проточна батерија	500 \$/kWh	0.005 – 120	0.1 – 15	8 – 10	65 – 85
Полисулфид-бромид проточне батерије	125 – 150 €/kWh	0.005 – 120	0.1 – 15	15	60 – 75

У Табели 1 [2] су дата поређења основних параметара споменутих технологија.

4. ЗАКЉУЧАК

У овом раду описани су оперативни принципи као и главне карактеристике неколико технологија погодних за складиштење електричне енергије. Уз даљу употребу складиштења, цене ће падати, а ефикасност ће бити све већа. Избор система за складиштење зависи од индивидуалних потреба, али ће обично бити неопходно спрегнути више различитих система за акумулацију енергије како би се обезбедиле што веће количине у складиштима. На овај начин, биће могуће надокнадити чак и дугорочне прекиде струје из сачуване енергије. Наставак улагања и истраживања у овој области ће несумњиво отворити пут за имплементацију све већег броја постројења за акумулирање електричне енергије.

Захвалница

Овај рад је настао као резултат истраживања на пројекту „Истраживање когенерационих потенцијала у комуналним и индустријским енерганама Републике Србије и могућности за ревитализацију постојећих и градњу нових когенерационих постројења (III 42013)“ које је финансирао Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

5. РЕФЕРЕНЦЕ

- [1] *Emergence of energy storage technologies as the solution for reliable operation of smart power systems: A review* Sam Koohi-Kamali, V.V.Tyagi, N.A.Rahim, N.L.Panwar, H.Mokhlis In: Renewable and Sustainable Energy Reviews
- [2] *A review of energy storage technologies for wind power applications* Francisco Díaz-González, Andreas Sumpera, Oriol Gomis-Bellmunt, Roberto Villafáfila-Robles In: Renewable and Sustainable Energy Reviews
- [3] *Experimental study of supercapacitor serial resistance and capacitance variations with temperature* Gualous H, Bouquain D, Berthon A, Kauffmann JM In: Journal of Power Sources
- [4] *Electrospinning materials for energy-related applications and devices* Dong Z, Kennedy SJ, Wu Y In: Journal of Power Sources
- [5] *Parking the power: Strategies and physical limitations for bulk energy storage in supply-demand matching on a grid whose input power is provided by intermittent sources* Pickard WF, Shen QA, Hansing NJ In: Renewable and Sustainable Energy Reviews
- [6] *High temperature carbon-carbon supercapacitor using ionic liquid as electrolyte* Balducci A, Dugas R, Taberna PL, Simon P, Plée D, Mastragostino M, et al In: Journal of Power Sources

- [7] *A comparative study of Li-ion battery, supercapacitor and nonaqueous asymmetric hybrid devices for automotive applications* Du-Pasquier A, Plitz I, Menocal S, Amatucci G In: Journal of Power Sources
- [8] *Energy storage systems for advanced power applications* Ribeiro PF, Johnson BK, Crow ML, Arsoy A, Liu Y In: Proceedings of the IEEE
- [9] *Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) in power systems with renewable energy sources* Nielsen KE, Molinas M In: IEEE international symposium on industrial electronics
- [10] *Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: an updated review* Beaudin M, Zareipour H, Schellenberglabe A, Rosehart W In: Energy for Sustainable Development
- [11] *Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration* Annette Evans, Vladimir Strezov, Tim J. Evans In: Renewable and Sustainable Energy Reviews
- [12] *Nickel-based rechargeable batteries* Shukla AK, Venugopalan S, Hariprakash B In: Journal of Power Sources
- [13] *Energy storage systems for transport and grid applications* Vazquez S, Lukic SM, Galvan E, Franquelo LG, Carrasco JM In: IEEE Trans Ind Electron
- [14] *Progress in electrical storage system: a critical review* Chen HS, Cong TN, Yang W, Tan CQ, Li YL, Ding YL In: Prog Nat Sci
- [15] *Environmental assessment of vanadium redox and lead-acid batteries for stationary energy storage* Rydh CJ In: Journal of Power Sources
- [16] *Research progress of vanadium redox flow battery for energy storage in China* Huang K-L, Li X-G, Liu S-Q, Tan N, Chen L-Q In: Renewable Energy
- [17] *Redox flow cells for energy conversion* Ponce-de-León C, Frías-Ferrer A, González-García J, Szánto DA, Walsh FC In: Journal of Power Sources
- [18] *The zinc bromine battery system for utility and remote area applications* Lex P, Jonshagen B In: Power Engineering Journal