

ПЕРСПЕКТИВЕ РАЗВОЈА ТЕХНОЛОГИЈА ЗА СКЛАДИШТЕЊЕ ЕНЕРГИЈЕ

Горан Радоичић¹, Драган Николић, Небојша Ристић, Властимир Пејић, Сејфо Панић

Резиме: У раду је приказан преглед актуелних технологија у области складиштења енергије. Објашњени су принципи иновативних решења која су у фази развоја и указано је на перспективе истраживања будућих технологија и нових материјала. Назначени су правци развоја интелигентних система складиштења и истакнут значај функције динамичког управљања равнотеже између производње и потражње енергије. Рад се фокусира на савременим технологијама складиштења енергије која располажу великим капацитетима снаге и која омогућују дуготрајно коришћење енергије из резерве. Посебан осврт начињен је према технологијама које имају минимални утицај на животну средину. Истраживање представљено овим радом ослања се на актуелну научну литературу као и нова глобална индустријска искуства великих компанија у области еколошки прихватљиве енергије.

Кључне речи: складишта енергије, нове технологије и материјали, обновљиви извори, резервна енергија

PERSPECTIVES OF DEVELOPMENT OF ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES

Abstract: The paper presents an overview of current technologies in the field of energy storage. The principles of innovative solutions that are in the development phase are explained and the perspectives of research into future technologies and new materials are pointed out. The directions of development of intelligent storage systems are indicated and the importance of the function of dynamic management of the balance between energy production and demand is emphasized. The paper focuses on modern energy storage technologies that have large power capacities and that enable long-term use of energy from the reserve. Special attention is paid to technologies that have minimal impact on the environment. The research presented in this paper relies on current scientific literature as well as new global industrial experiences of large companies in the field of environmentally friendly energy.

Key words: energy storage, new technologies and materials, renewable sources, reserve energy

1. УВОД

Угаљ, нафта и дрво представљају уобичајене изворе енергије за најширу примену. Њиховим сагоревањем врши се трансформација хемијске у друге облике енергије (топлотну, механичку, електричну). Негативна последица сагоревања наведених извора енергије јесте емисија загађивача у атмосферу. Реч је о штетним угљеничним и азотним једињењима у виду гасова и микрочестица. Један од највећих проблема данашњице јесте очување климе. Задатак очувања планете Земље може се решавати на више начина, а један од њих је контрола емисије угљен-диоксида у атмосферу. Смањење количина емитованог угљендиоксида може се постићи избегавањем коришћења фосилних горива као најчешћих извора енергије. Ово указује на потребу замене оних извора енергије, који садрже загађиваче, такозваним „чистим“ изворима енергије. Промоција коришћења „чистих“ извора енергије односи се на енергију сунца, ветра, река и океана, био-масае, гео-термалних извора. Са становишта економске оправданости, најбоље је користити оне изворе енергије који се могу природно и брзо обновити (енергија сунца, воде, ветра). Технологија коришћења потенцијалне и кинетичке енергије воде за добијање механичке и електричне енергије одавно је позната. Релативно новије технологије односе се на експлоатацију енергије сунца и енергије ветра. Можемо рећи да су сунце и ветар два најзначајнија обновљива извора енергије данашњице, имајући у виду њихову доступност широм планете

¹ Фак. примењених наука, Д. Поповића 22а, Ниш

КОНФЕРЕНЦИЈЕ СА МЕЂУНАРОДНИМ УЧЕШЋЕМ

38. Конференција одржавалаца Србије и 1. Конференције напредне технологије у функцији развоја привреде, Врњачка Бања, 01.06. – 03.06. 2022. године

Земље. Међутим, сунчева енергија и ветар карактеришу се променљивошћу, односно повременом доступношћу. Променљивост је местимична јер зависи од локалних временских прилика. Управо због променљивости тј. непостојаности извора енергије, често долази до ситуација у којима соларне електране или ветропаркови генеришу суфицит или имају дефицит у производњи енергије. Потражња енергије у мрежи потрошача не мора увек бити у равнотежи са производњом, већ може бити већа или мања од ње. Када је потражња мања, а производња континуирана, јер то дозвољавају повољне временске прилике, тада се јавља вишак енергије. У случају производње вишка енергије поставља се питање складиштења тог произведеног вишка. Енергија се чува у одговарајућем облику како би се касније, услед повећане потражње у мрежи и искористила. Чување енергије врши се у складиштима енергије. Улога складишта великих капацитета суштински је повезана са технологијама обновљивих извора енергије. Потражња за обновљивом енергијом ће с временом расти, па ће се у складу са тим повећавати и потреба за новим технологијама складиштења различитих видова енергије. Савремене технологије за складиштење енергије су иновативне и развијају се у правцу нових материјала и компоненти. Будући системи складиштења енергије објединиће нова електронска решења на бази сензора и аутоматике са новим материјалима. Можемо говорити о будућим складиштима енергије као својеврсним интелигентним системима који ће обезбедити бољу координацију између потрошње и производње енергије и већу ефикасност система за производњу обновљиве енергије [1]. Коришћење уређаја широке потрошње, као што су на пример, мобилни телефони и електрични аутомобили, условљено је аутономношћу система напајања. Уређаји ће радити онолико дуго колико траје пражњење складишта енергије у њима.

2. ИЗБОР НАЈПОВОЉНИЈЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ ЗА СКЛАДИШТЕЊЕ ЕНЕРГИЈЕ

Различитост електроенергетских система и специфичност у прилагођавању истих мрежи потрошача имплицирају разноврсне технологије за складиштење енергије. Електроенергетски системи се пројектују према извору енергије тј. према врсти основног облика енергије (хидроелектране, ветроелектране, термоелектране, соларне електране итд.). Слично томе, и складишта енергије можемо поделити према облику енергије, и то на складишта:

- хемијске,
- електрохемијске,
- електричне,
- топлотне и
- механичке енергије.

Свака од ових категорија има своје подкатегије. Складишта хемијске енергије заснивају се на технологијама коришћења водоника и горивних ћелија, амонијака, метанола. Складишта електрохемијске енергије су класичне и проточне батерије. Складишта електричне енергије базирају се на технологијама суперкондензатора и суперпроводних магнета (енгл. *superconducting magnetic energy storage*). Складишта топлотне енергије могу бити интелигентна (енгл. *sensible heat storage*), латентна и термохемијска складишта. Складишта механичке енергије користе технологије замајца, потенцијалне енергије воде, компримованог ваздуха (адијабатска и дијабатска) итд.

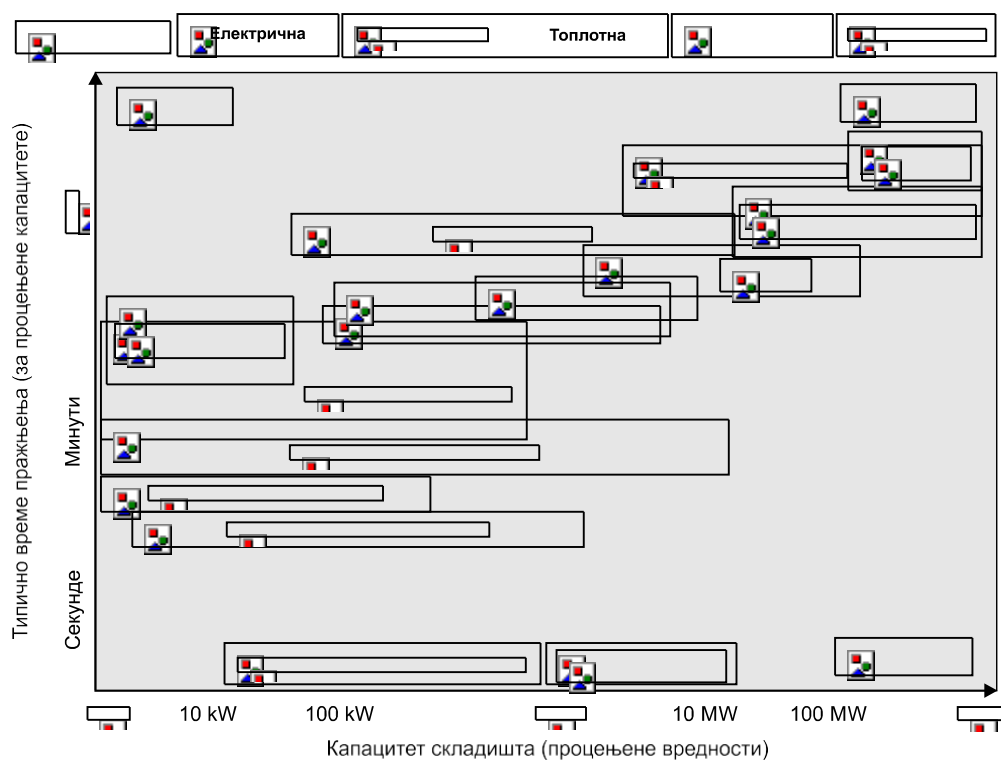
Применљивост појединих основних врста складишта енергије зависи од два фундаментална захтева и то: капацитета снаге и трајања пражњења. Према томе, сва складишта енергије не морају бити одговарајућа за примену у сваком од енергетских система. Први захтев од кога зависи која ће технологија складиштења бити примењена јесте величина тј. капацитет снаге енергетског система. На основу снаге енергетског система дефинише се капацитет, односно снага складишта. Други захтев се односи на трајање пражњења складишта, то јест, време коришћења резерве енергије из складишта. На пример, време коришћења мобилног телефона или електричног аутомобила између два пуњења батерије. На основу ова два параметра, сва складишта енергије могу се разврстати у три групе, Слика 1, и то на складишта:

КОНФЕРЕНЦИЈЕ СА МЕЂУНАРОДНИМ УЧЕШЋЕМ

38. Конференција одржавалаца Србије и 1. Конференција напредне технологије у функцији развоја привреде, Врњачка Бања, 01.06. – 03.06. 2022. године

- мале снаге – за дуготрајно коришћење,
- велике снаге – за краткотрајно коришћење и
- велике снаге – за дуготрајно коришћење.

Процењене снаге складишта енергије приказане су у kW, MW и GW на хоризонталној оси, а типична времена пражњења складишта (трајање резерве енергије) на вертикалној оси дијаграма са Сlike 1.



Слика 1 – Примена складишта енергије према капацитету и времену пражњења [2]

У пракси се користи велики број различитих опција складиштења енергије. Свака од опција има своје предности и мане. У међувремену, неке од технологија су толико напредовале, па су данас примењиве и за много веће капацитете складиштења него што је приказано на Слици 1. Такав пример су литијум-јонске батерије. Ако говоримо о технологијама које обезбеђују велике капацитете складиштења, онда се то односи на решења чији капацитети прелазе 20 MW. У Табели 1 наведене су актуелне технологије којим се могу обезбедити велики капацитети складиштења. Због ограничења на капацитете преко 20 MW, у табели нису дата складишта заснована на суперпроводним магнетима и суперкондензаторима.

КОНФЕРЕНЦИЈЕ СА МЕЂУНАРОДНИМ УЧЕШЋЕМ

38. Конференција одржавалаца Србије и 1. Конференције напредне технологије у функцији развоја привреде, Врњачка Бања, 01.06. – 03.06. 2022. године

Табела 1 – Карактеристике савремених складишта енергије великих капацитета, [3]

Врста технологије	Највећа процењена снага (MW)	Време пражњења	Трајање животног циклуса	Густина енергије (Wh/l)	Степен корисности
Потенцијална енергија воде	3000	4–16 сати	30–60 год.	0,2–2	70–85 %
Компримовани ваздух	1000	2–30 сати	20–40 год.	2–6	40–70 %
Слани раствор (топлотно складиште)	150	сати	30 год.	70–210	80–90 %
Li-ion батерије	100	1 мин. – 8 сати	1000–10000 цикл.	200–400	85–95 %
Pb-acid батерије	100	1 мин. – 8 сати	6–40 год.	50–80	80–90 %
Flow батерије	100	сати	12000–14000 цикл.	20–70	60–85 %
Водоник	100	мин. – нед.	5–30 год.	600 (при 200 bar)	25–45 %
На бази замајца (механичко складиш.)	20	сек. – мин.	20000–100000 цикл.	20–80	70–95 %

Посматрајући Табелу 1 (извор: „The World Energy Council“), а и према многим другим изворима, закључујемо да ће се технологије на бази потенцијалне енергије воде (енгл. Pumped Hydro Storage – PHS) и даље ће се користити као најпогоднија опција за складиштење великих снага и дуготрајних енергетских резерви. Ова процена се односи на период од наредних тридесетак година. Предност PHS технологије је дуг животног века постројења, а недостатак мала густина енергије по литру. После PHS технологија, према капацитету складиштења следе технологије на бази компримованог ваздуха (енгл. Compressed Air Energy Storage – CAES). Складишта енергије на бази CAES технологија имају веће време пражњења од претходних, што се истиче као предност, али и нешто мањи степен искоришћења, што се може сматрати не тако великим недостатком. Према Табели 1, технологије на бази водоника и горивних ћелија (скраћеница: H₂ + FC) могу обезбедити снаге до 100 MW. Међутим, најновија решења у области ових технологија обезбеђују и знатно веће капацитете. Предности H₂ технологија су велика густина енергије као и дуготрајност животног века постројења, док је највећа мана врло мали степен искоришћења.

Неке технологије попут батеријских складишта рангирају се према броју циклуса пуњења/пражњења складишног простора. Проточне батерије су повољније од литијум-јонских према критеријуму већег броја циклуса, али су са друге стране, литијум-јонске батерије повољније са аспекта веће густине енергије. Литијум-јонске технологије се примењују када су захтеви за енергијом већи од једног минута и мањи од осам сати.

Механичко складиште енергије на бази замајца има најмањи капацитет и време пражњења, али зато највећи број циклуса пуњења/пражњења у току свог животног века, задовољавајућу густину енергије и висок степен искоришћења. Ова врста складишта користи се у кратким временским периодима дужине од секунде до минута.

За избор технологије складиштења, поред процењене снаге, времена пражњења, густине енергије, степена искоришћења и трајања животног циклуса анализирају се и трошкови складиштења и скалабилност. Скалабилност је својство система да обрађује растућу количину задатака/послова додавањем ресурса систему [4]. За системе складиштења енергије, чије се перформансе, као што је капацитет, побољшавају после надоградње, каже се да су скалабилни.

3. УЛОГА НОВИХ МАТЕРИЈАЛА У ТЕХНОЛОГИЈАМА СКЛАДИШТЕЊА

Стиче се утисак бржег развоја електронских апликација и уређаја у односу на развој складишта енергије, која се увек морају прилагођавати све већим захтевима за енергијом и све већем трајању процеса пражњења. Са друге стране, рад сложене електронике и рачунарских технологија, којима се ови уређаји све више опремају, условљен је капацитетом складишта

КОНФЕРЕНЦИЈЕ СА МЕЂУНАРОДНИМ УЧЕШЋЕМ

38. Конференција одржавалаца Србије и 1. Конференција напредне технологије у функцији развоја привреде, Врњачка Бања, 01.06. – 03.06. 2022. године

енергије. Тако имамо ситуацију да материјали који се користе у батеријским складиштима временом постају застарели јер су електронске и рачунарске технологије и компоненте све захтевније по питању коришћења енергије. Хронолошки, после никл-кадмијумских (Ni-Cd) батерија (као првих пуњивих батерија за широку примену) појавиле су се никл-металхидридне (Ni-MH) батерије чији је капацитет био већи за 30% у односу на претходне. Затим следе литијум-јонске (Li-ion) батерије које имају знатно мању масу и знатно већи капацитет, итд. Из свега овог закључујемо да технологије складиштења енергије постају једна од најзначајнијих области не само у развоју аутономних електронских уређаја већ и у развоју великих енергетских система будућности. Развој технологија складиштења енергије значајно је условљен новим материјалима, те се очекује убрзани развој и тестирање нових материјала.

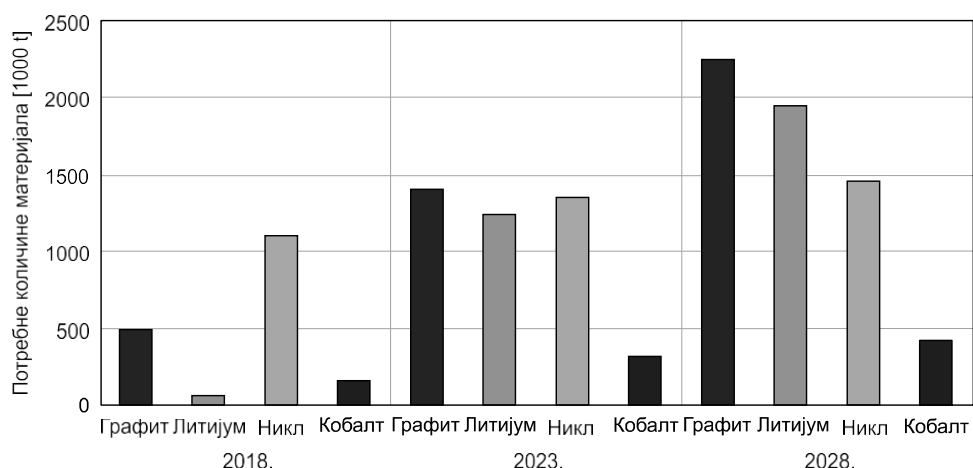
Генерално, може се рећи да су батеријска складишта одавно познате технологије које се примењују у многим областима. Међутим, морамо приметити да се у батеријским технологијама с временом појављују потпуно нови материјали. Тако и те технологије називамо новим. Мобилни системи, као што су аутомобили, ограничени су расположивошћу простора за смештај погонског горива што представља додатни захтев када је у питању избор алтернативног погонског енергента, па тако и складишта тог алтернативног облика енергије. С тога, у електричним возилима се углавном примењују електрохемијска складишта у облику батерија заснованих на литијум-јонској технологији. Поред електричних аутомобила, батеријска складишта енергије се примењују и у мањим објектима који се могу задовољити потрошњом енергије у трајању од свега неколико часова.

Основни недостатак код свих батерија јесте недовољна скалабилност, што је у вези са недостатком простора за надоградњу батеријских модула како би се задовољила све већа потражња за енергијом тј. продужило време коришћења батерије (нпр. како би се продужила вожња аутомобилом без допуне батерије).

Данас доминантну улогу имају литијум-јонске батерије. У новије време, појављују се и натријум-јонске као и друге врсте батерија. Компаније и универзитети на глобалном нивоу [5], [6], истражују нова решења која ће се користити у мобилним системима, а једно од тих решења су и литијум-сумпорне батерије, чија се технологија заснива на коришћењу кристала сумпора као катодног материјала уместо досада коришћених никла и кобалта. Ова иновативна решења омогућују мању употребу метала, а тиме и мање трошкове производње. Густина енергије код кристалне батерије је врло висока што обезбеђује дуготрајност резерве енергије (дуже време пражњења). У блиској будућности доћи ће до промене утицаја појединих врста материјала који се користе у производњи литијум-јонских батерија. Процена је да ће примат доскора најутицајнијег никла из 2018. год. постепено преузимати нови материјал – графит (графен) и то у периоду од 2023-2028. године, Слика 2. На другом месту биће литијум. На слици можемо уочити још један тренд, а то је пораст тражње за свим сировинским материјалима који се користе у производњи литијум-јонских батерија, како новим (литијум, а поготово графит), тако и старим (никл, кобалт). Утицај кобалта ће бити најмањи у односу на остале материјале [7].

КОНФЕРЕНЦИЈЕ СА МЕЂУНАРОДНИМ УЧЕШЋЕМ

38. Конференција одржавалаца Србије и 1. Конференције напредне технологије у функцији развоја привреде, Врњачка Бања, 01.06. – 03.06. 2022. године



Слика 2 – Глобалне потребе за материјалима у производњи батерија (катода)

Примена нових материјала кључна је у развоју технологија складиштења енергије. Са Сlike 2 видимо да је један од најзначајнијих материјала будућности – графен (чисти угљеник). Молекуларна структура графена је раванска, дебљине једног атома. Слојеви графена су наслагани један до другог чинећи графит. Веза између слојева графена је веома слаба и дозвољава раздвајање слојева. Густина графена је велика, тако да кроз његову структуру не могу проћи атоми гаса, али може електрицитет. Проток струје електрона кроз графен је добар. Због велике чврстоће, добре проводљивости електрицитета и провидне структуре, графен је погодан материјал за осетљиве екране и соларне панеле. Такође, графен се може користити за производњу суперчврстих и лаких компонената у ауто и авио индустрији. Све ове особине сврставају графен у водеће материјале нових технологија за складиштења енергије.

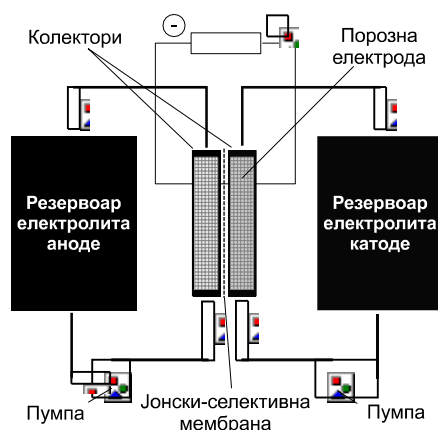
Код технологија складиштења енергије за потребе становања, најновија истраживања иду у правцу примене цинка. У развоју су манган-цинк батерије, чије су главне особине толеранција на влагу и велики, чак двоструко већи капацитет у односу на литијум-јонске батерије.

Поред манган-цинк батерија, за мобилне апликације данас се развијају и цинк-ваздушне батерије. Технологија цинк-ваздушних батерија заснива се на улазу молекула кисеоника из ваздуха кроз мале отворе на врху хелије батерије, омогућујући влагу из ваздуха да дође у контакт са угљеничном катодом. Молекули кисеоника се крећу са угљеничне катоде до цинк-аноду на којој се формира молекула воде и цинк-оксида. При тој реакцији ослобађају се два електрона који путујући унутар струјног кола нападају изабрани уређај [8].

Данас се врше значајна истраживања могућности за примену течних електролита на бази ванадијум-редокса, цинк-брома и феро-хрома у области технологија проточних батерија. Ванадијум-редокс батерије су пуњиве проточне батерије које се састоје од хелија са графитном електродом и електролита на бази ванадијума. Принцип рада редокс ванадијум батерије приказан је на Слици 3 [9].

КОНФЕРЕНЦИЈЕ СА МЕЂУНАРОДНИМ УЧЕШЋЕМ

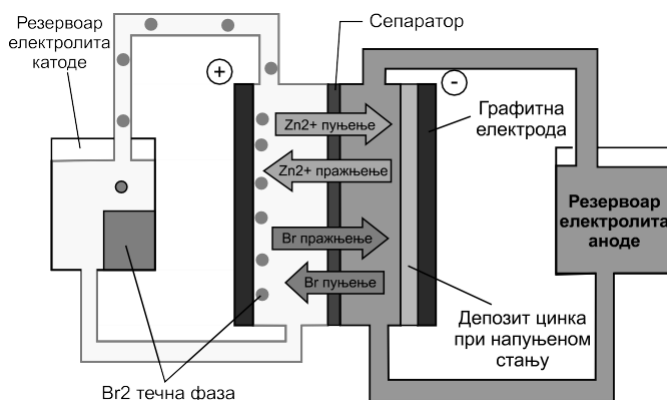
38. Конференција одржавалаца Србије и 1. Конференција напредне технологије у функцији развоја привреде, Врњачка Бања, 01.06. – 03.06. 2022. године



Слика 3 – Принцип рада ванадијум-редокс батерије

Цинк-бром батерије су такође хибридне редокс проточне батерије (RFB). Њихов принцип је приказан на Слици 4. Реч је о пуњивим батеријама чији рад се заснива на реакцији између цинка и брома у електролиту који представља водени раствор цинк-бромида. Укупни капацитет батеријског складишта зависи од два параметра и то простора за слагање депозита цинка на електроди (подручје електрода) и величине резервоара електролита. Течне цинк-бромидне батерије су, за разлику од литијум-јонских, отпорније на прегревање и појаву пожара.

Феро-хром батерије такође спадају у групу редокс проточних батерија (RFB). Позитивни атоми хрома током циклуса пражњења оксидирају у негативном делу батеријске ћелије при чему се ослобађа по један електрон који струји кроз спољно коло AC/DC конвертера. У другом – позитивном делу батеријске ћелије, за време пражњења долази до прихватања по једног електрона од стране позитивних Fe атома. Током циклуса пуњења, врши се супротна реакција.



Слика 4 – Принцип рада цинк-бром редокс батерије

4. ОПТИМАЛНЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ ВЕЛИКИХ СИСТЕМА СКЛАДИШТЕЊА

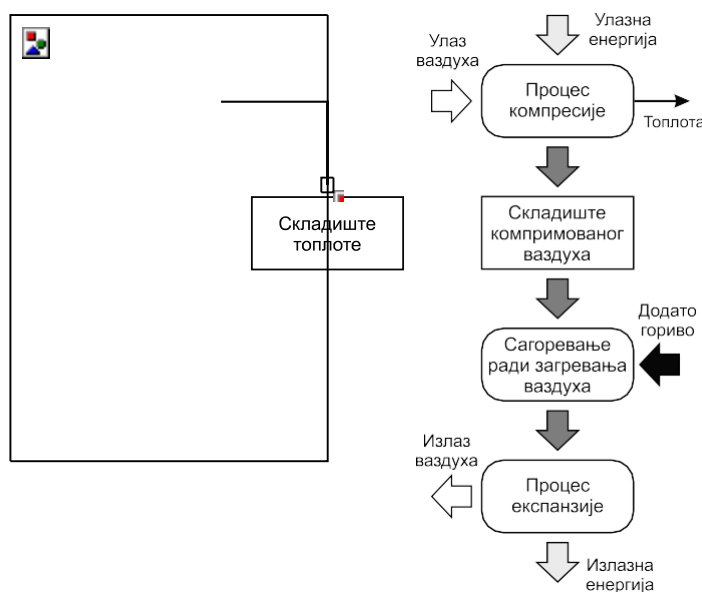
За велике енергетске системе и широку потрошњу енергије најоптималније технологије складиштења су: технологије на бази искоришћења потенцијала воде, технологије засноване на водонику и горивним ћелијама, технологије на бази компримованог ваздуха и криогене технологије. Све ове технологије омогућују коришћење великих снага у дужем временском периоду (времену пражњења), али не дужем од неколико дана.

КОНФЕРЕНЦИЈЕ СА МЕЂУНАРОДНИМ УЧЕШЋЕМ

38. Конференција одржавалаца Србије и 1. Конференције напредне технологије у функцији развоја привреде, Врњачка Бања, 01.06. – 03.06. 2022. године

За технологију складиштења која се заснива на потенцијалној енергији воде може се рећи да је релативно „стара“ технологија. Мада она има ограничен потенцијал за даљи развој (велике хидроелектране су већ направљене на готово свим одговарајућим рекама), ова технологија још увек припада групи водећих у категорији складиштења великих снага за дужи временски период коришћења (тј. период пражњења складишта). Енергетски медијум је вода која се уз помоћ пумпе транспортује цевним системом из нижег у виши резервоар. Реч је о механичком складишту јер се потенцијална енергија воде преводи у кинетичку енергију при испуштању воде из горњег резервоара. Тако добијена енергија воде користи се углавном за покретање турбина у хидроелектранама.

Рад складишта енергије на бази компримованог ваздуха (CAES) заснива се на коришћењу јефтине електричне енергије у процесу сабијања ваздуха који се у том стању чува у резервоарима великог капацитета (подземним коморама). Јефтина енергија се користи у периоду када је потражња за енергијом мања од уобичајене. Реч је о ноћном периоду или периоду хиперпродукције електричне енергије из обновљивих извора. Компримовани ваздух се користи за напајање турбине у процесу производње електричне енергије (када експандира у турбини). Складишта енергије компримованог ваздуха можемо поделити на две групе, у зависности од размене топлоте са околином при процесу компресије ваздуха, и то на адијабатска и дијабатска складишта, Слика 5.



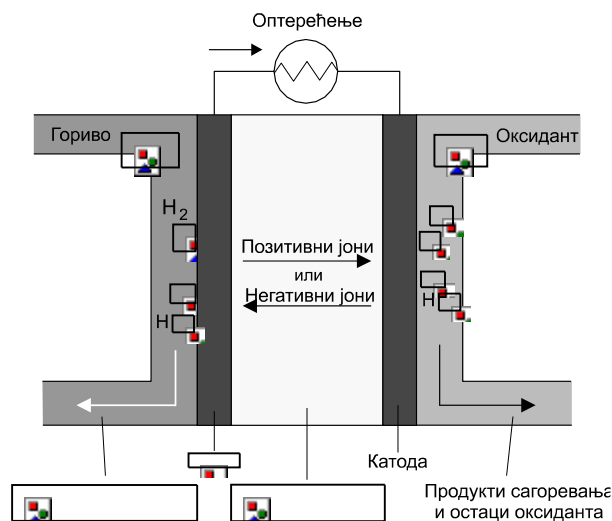
Слика 5 – Адијабатско (лево) и дијабатско (десно) складиште компримованог ваздуха

Код адијабатских система са Сlike 5, топлота која се добија у процесу сабијања ваздуха не одлази у околину већ се чува у складишту топлоте да би се касније искористила у процесу експанзије ваздуха, а у циљу добијања потребне снаге. Овакви системи не захтевају додатну енергију за загревање ваздуха. Уобичајено је да се код складишта великих количина енергије (система великих снага) уводи додатна хемијска енергија горива за загревање компримованог ваздуха током пражњења резервоара, а пре експанзије ваздуха у турбини. Такви системи се називају дијабатским системима складиштења енергије. Иновације у примени CAES система складишта усмерене су ка повезивању са обновљивим изворима енергије, као на пример, са ветроелектранама, чија би се генерисана електрична енергија користила за добијање компримованог ваздуха. Поред тога, иновације би требало да дају предност адијабатским складиштима јер размена топлоте са околином у дијабатском процесу компресије ваздуха најчешће подразумева и емисију штетног угљен-диоксида.

КОНФЕРЕНЦИЈЕ СА МЕЂУНАРОДНИМ УЧЕШЋЕМ

38. Конференција одржавалаца Србије и 1. Конференција напредне технологије у функцији развоја привреде, Врњачка Бања, 01.06. – 03.06. 2022. године

У групу иновативних технологија складиштења енергије спада и технологија горивних ћелија. Уобичајена технологија подразумева трансформацију хемијске енергије горива у механичку за време сагоревања горива у мотору, и даљу трансформацију тако добијене енергије у електричну помоћу генератора. Реч је посредној трансформацији у којој се поред почетног (хемијског) и завршног (електричног) облика енергије јавља и трећи облик – механичка енергија. Горивне ћелије су електрохемијски уређаји (галванске ћелије) који директно претварају хемијску енергију из горива у електричну енергију уз стално довођење оксиданта у процес, Слика 6. Горивне ћелије имају висок степен ефикасности и минимални утицај на животну средину јер у процесу трансформације енергије нема сагоревања фосилних горива, па нема ни емисије загађивача у атмосферу. Под горивним ћелијама најчешће се подразумевају водонично-кисеоничне ћелије. У процесу горивних ћелија користе се: водоник као носилац процеса, електролит као преносник позитивних и негативних јона и кисеоник као оксидант. Водоник се добија електролизом воде, а затим транспортује до горивних ћелија. Кисеоник се једноставно може узети из ваздуха. Развој технологије горивних ћелија условљен је питањем складиштења водоника и то са два аспекта – питањем капацитета тј. величине резервоара водоника и питањем безбедности складиштења експлозивног гаса (водоник је врло експлозиван у реакцији са ваздухом).



Слика 6 – Индивидуална горивна ћелија

5. ПРИМЕРИ ИНОВАТИВНИХ РЕШЕЊА СИСТЕМА СКЛАДИШТЕЊА ЕНЕРГИЈЕ

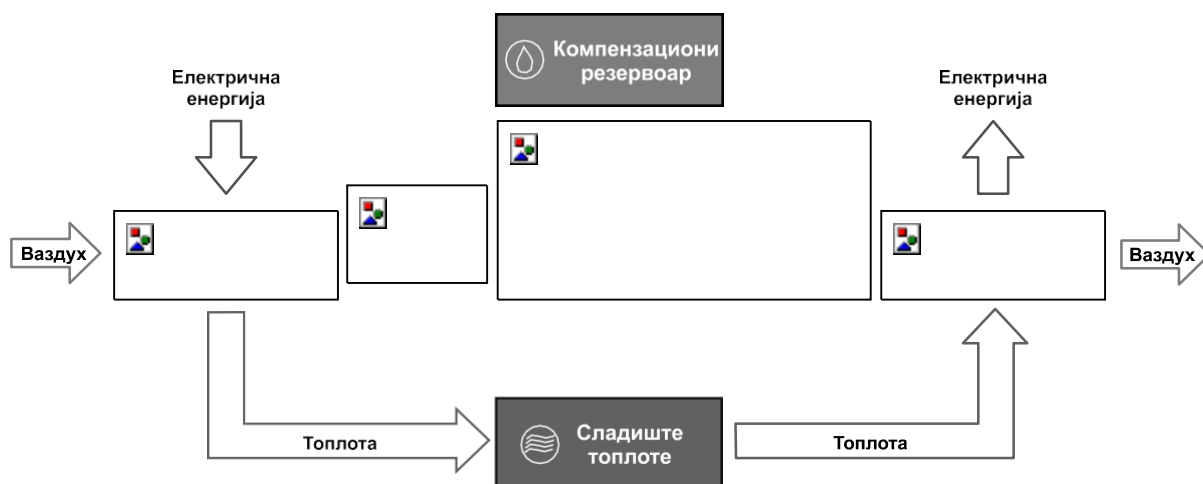
Поред све веће примене графена и других нових материјала, иновације у области складишта енергије односе се и на комбинацију технологија и примену хибридних система. На пример, компанија Hydrostor је развила иновативно решење за складиштење енергије на бази компримованог ваздуха А-CAES (енгл. Advanced Compressed Air Energy Storage) [10]. Технологија користи подземне јаме старих рудника за смештај компримованог ваздуха. Постројење је опремљено индустријским компресорима, турбинским генераторима и измењивачима топлоте, Слика 7.

Постројење са Сlike 7 користи вишак електричне енергије за сабијање ваздуха у дубини јаме напуштеног рудника и то у времену када је потражња енергије најмања. Током процеса компресије генерише се топлота, која се чува у резервоару топлоте из кога се касније враћа у систем. Подземна рударска јама је природно складиште компримованог ваздуха и код овог решења представља акумулатор енергије са хидростатичком компензацијом. Водени и

КОНФЕРЕНЦИЈЕ СА МЕЂУНАРОДНИМ УЧЕШЋЕМ

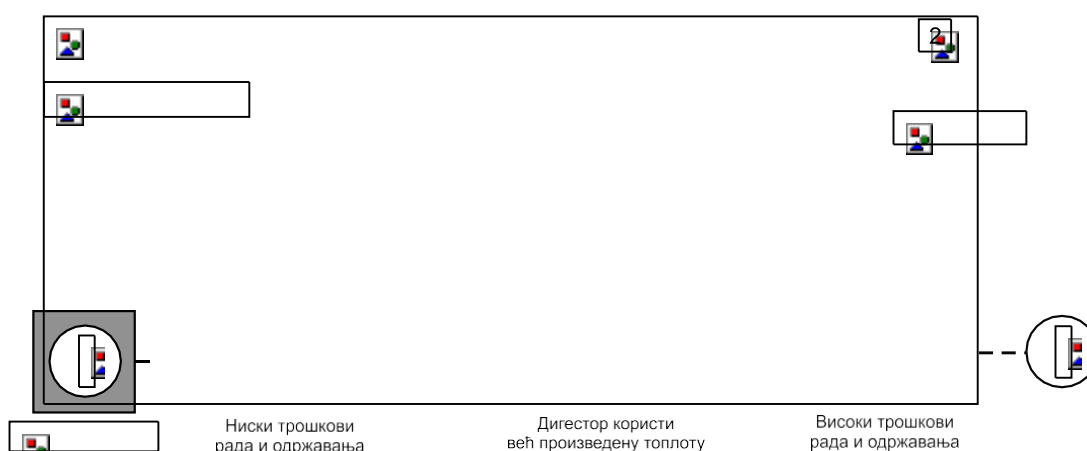
38. Конференција одржавалаца Србије и 1. Конференције напредне технологије у функцији развоја привреде, Врњачка Бања, 01.06. – 03.06. 2022. године

ваздушни резервоари су повезани, па пуњење подземног резервоара ваздуха омогућује и пуњење надземног резервоара воде. Да би се произвела електрична енергија, потребно је довођење компримованог ваздуха из подземног резервоара у генератор. Излазом компримованог ваздуха из резервоара ослобађа се место за воду која гравитационо пада из компензационог резервоара. Генератор електричне енергије је ваздушна турбина у којој долази до експанзије компримованог ваздуха уз помоћ доведене топлоте. Излаз из система су електрична енергија, која иде у мрежу, и ваздух искоришћен у турбини. Hydrostor-ово решење складишта компримованог ваздуха је еколошки потпуно прихватљиво.



Слика 7 – Решење складишта компримованог ваздуха (компанија Hydrostor)

Иновативно решење компаније „1414 Degrees“ односи се на GAS-TESS складиште енергије [11]. То је складиште које користи биогаз и течни силицијум за добијање топлотне и електричне енергије, Слика 8. Технологија се заснива на биогазу који се добија из постројења за пречишћавање отпадних вода. Биогаз се у TESS (енгл. Thermal Energy Storage System) модулу претвара у енергију која се складишти у условима растопљеног силицијума. Као нуспроизвод добија се топлота која се затим користи у процесу производње новог биоматеријала за добијања биогаза.



Слика 8 – Систем генерисања електричне струје на бази складишта топлотне енергије

КОНФЕРЕНЦИЈЕ СА МЕЂУНАРОДНИМ УЧЕШЋЕМ

38. Конференција одржавалаца Србије и 1. Конференција напредне технологије у функцији развоја привреде, Врњачка Бања, 01.06. – 03.06. 2022. године

Једно од решења будућности за примену у великим мрежним системима је решење складишта кинетичке енергије компаније Teraloop, [12], које представља алтернативу коришћењу батерија. Тералупово складиште енергије заснива се на MAGLEV технологији (МАГ – магнетизам, ЛЕВ – левитација) где један објекат лебди над другим без механичке потпоре, већ само уз помоћ магнетског поља, при чему се дејство гравитационе силе поништава дејством електромагнетне силе истог интензитета и правца али супротног смера. Технологија користи мотор без четкица и замајац у вакуум окружењу. Када се обезбеди вишак енергије, платформа ангажује магнетно-лебдећи прстенасти ротор без главчине, који се убрзава и пуни систем енергијом, а потом га празни предајући енергију мрежи када је то потребно. Систем може бити инсталиран надземно или подземно.

Значајне иновације врше се и у области примене резервоара сланог раствора за изузетно велике енергетске капацитете складишта (нпр. 1000 MW, Mitsubishi Hitachi Power System у држави Јута, САД), али и за мање капацитете када се ради о алтернативним решењима за литијум-јонске батерије (нпр. до 1 MWh, Greenrock батерије). Веома корисне могу бити и нове технологије засноване на топлотној пумпи/мотору (Electro-Thermal Energy Storage).

6. ЗАКЉУЧАК

С обзиром да се од савремених енергетских система и мрежа захтева да обезбеде флексибилност коришћења енергије, то значи да најбоља решења ових система морају бити опремљена подсистемима за складиштење енергије који подржавају различита трајања резерве енергије тј. различите брзине прањњења енергетског складишта.

У мрежи често долази до краткотрајних напонских флукуација и осцилација фреквенције, па се од складишта енергије захтева флексибилност у овим ситуацијама. Препорука за ове прилике су решења складишта енергије на бази ултра-кондензатора (UC), инерционих механизма (енгл. Flywheel Energy Storage – FES) и суперпроводних калемова (енгл. Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES). Овакви системи складиштења обезбеђују велику густину енергије и велики број On/Off циклуса.

Дневна складишта енергије пројектују се да би издржала дневна вршна оптерећења која се обично јављају у јутарњим и поподневним сатима. Када је у питању коришћење резерве енергије на дневном нивоу, најоптималнија решења су батеријска складишта (енгл. Battery energy storage – BES) на бази литијум-јонске, ванадијум редокс и цинк-бром технологије. Такође, врло добра решења за чување дневне резерве енергије су складишта на бази потенцијалне енергије воде и складишта на бази водоника и горивних ћелија.

Дугорочне резерве енергије на нивоу сезонских потреба могу се обезбедити применом складишта на бази технологија водоника и горивних ћелија. Ова складишта су врло добро решење, не само за дугорочне, већ и за средњерочне резерве енергије. Поред технологија на бази водоника и горивних ћелија, за чување резерви енергије у средњерочном и дугорочном периоду могу се успешно користити и технологије на бази потенцијалне енергије воде (PHS), компримованог ваздуха (CAES) и течног ваздуха (енгл. Liquid Air Energy Storage– LAES).

Складишта енергије на бази литијум-јонских (Li-ion), оловно-киселинских (PbA) и редокс батерија најпогоднија су у грађевинарству, али се могу користити и хибридна решења у виду комбинација батерија са ултра-кондензаторима и инерционим системима. Складишта енергије код мобилних система (превозним средствима друмског и ваздушног саобраћаја) углавном користе технологије литијум-јонских батерија и ултра-кондензатора. Код пловила, базне технологије складишта енергије су PbA и Li-ion батерије, као и хибридна решења Li-ion+UC или PbA+UC.

У овом раду нису разматрани трошкови складиштења енергије. Али они свакако морају бити укључени у разматрање приликом избора оптималне технологије за одређени електро-енергетски систем, било да је реч о стабилним или мобилним системима.

КОНФЕРЕНЦИЈЕ СА МЕЂУНАРОДНИМ УЧЕШЋЕМ

38. Конференција одржавалаца Србије и 1. Конференције напредне технологије у функцији развоја привреде, Врњачка Бања, 01.06. – 03.06. 2022. године

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Smart Energy International, <https://www.smart-energy.com>, март 2022.
- [2] Moller, K. T.; Jensen, T. R.; Akiba, E.: Li H-W.:Hydrogen - A Sustainable Energy Carrier, *Progress in Natural Science: Materials International*, 27(1), 2017, стр. 34-40.
- [3] The World Energy Council, <https://www.worldenergy.org/>, март 2022.
- [4] Bondi, A. B.: Characteristics of Scalability and their Impact on Performance, *Proceedings of the 2nd International Workshop on Software and Performance (WOSP'00)*, 2000.
- [5] EG&G Technical Services Inc.: *Fuel Cell Handbook - Seventh Edition*, U.S. Dept. of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Lab., Morgantown, West Virginia, 2004.
- [6] Theion GmbH, <https://www.theion.de/>, март 2022.
- [7] University of Michigan, <https://umich.edu/>, март 2022.
- [8] Chmielewski A. et al: *Available and Future Methods of Energy Storage*, World Wide Fund for Nature, WWF Poland, Warsaw, 2020.
- [9] <https://sr.print-it-online.at/zinc-air-batteries>, март 2022.
- [10] Hydrostor, <https://www.hydrostor.ca>, март 2022.
- [11] <https://1414degrees.com.au/gas-tess/>, март 2022.
- [12] <https://www.teraloop.org>, март 2022.