

BATERIJSKA SKLADIŠTA U ELEKTROENERGETSKOM SISTEMU I NJIHOV UTICAJ NA FLEKSIBILNOST MREŽE

BATTERY STORAGE IN THE POWER SYSTEM AND THEIR IMPACT ON GRID FLEXIBILITY

Vladimir ČAJIĆ, Enel ps d.o.o, Srbija
Filip PAUNOVIĆ, Enel ps d.o.o, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

U toku energetske tranzicije i zahteva za primenom održivih, obnovljivih, čistih i CO₂ neutralnih izvora energije pojavili su se izazovi za elektroenergetski sistem na koje je potrebno adekvatno odgovoriti. Jedan od ključnih izazova je problem balansiranja snage. Postojeći sistemi balansiranja nisu dovoljni zbog čega se pristupilo izgradnji novih balansnih kapaciteta. Razvoj novih kapaciteta podstakao je pojavu novih tehnologija koje se mogu primeniti za balansiranje snage a isto tako i za unapređenje postojećih. Jedna od aktuelnih tehnologija jesu baterijska skladišta tzv. „Battery Energy Storage System – BESS“. Povećana potražnja električne energije, posebno u oblasti termotehnike i električnih automobila u kombinaciji sa pojavom obnovljivih izvora energije u većem obimu koji su uglavnom intermitentne prirode zahteva da elektroenergetski sistem bude prilagodljiv tj. fleksibilan. U radu je razmotrena upotreba baterijskih skladišta električne energije, njihova prednost i mane u odnosu na ostale sisteme skladištenja električne energije. Osnovna poređenja i razlike su razmotrene u odnosu na karakteristike pojedinih tehnologija kao i u pogledu kapaciteta, životnog veka, brzine odziva, investicionih troškova kao i troškovi održavanja. Takođe je obrađen segment održavanja stabilnosti frekvencije i visine napona elektroenergetskog sistema, kao bitnih parametara pouzdanosti mreže.

Ključne reči: Fleksibilnost, baterijska skladišta

ABSTRACT

In the course of the energy transition and the demand for the application of sustainable, renewable, clean and CO₂ neutral energy sources, in front of power system have appeared challenges that need to be adequately answered. One of the key challenges is the power balancing problem. The existing balancing systems are not sufficient, which is why the construction of new balancing capacities was started. Increment of new capacities bring us development of new technologies that can be applied for power balancing as well as for the improvement of existing ones. One of the current technologies is "Battery Energy Storage System - BESS". The increased demand for electricity, especially in the field of thermotechnics and electric vehicles, in combination with the appearance of larger scale renewable energy sources that are mostly intermittent in nature, requires the power system to be adaptable, i.e. flexible. The paper discusses the use of Battery Energy Storage System, their advantages and disadvantages compared to other systems of energy storage. Basic comparisons and differences are discussed in relation to the characteristics of individual technologies as well as in terms of capacity, lifetime, speed of response, investment costs and maintenance costs. The segment of maintenance of frequency and voltage stability of the power system, as essential parameters of network reliability, was also covered.

Keywords: Flexibility, battery storage

Vladimir Čajić, vladimir.cajic@enelps.com, +381 63 686 194

1. UVOD

Potražnja potrošača za energijom varira tokom celog dana, kako elektroenergetski sistem bio u ravnoteži proizvodnja električne energije mora da prati trenutne zahteve za potrošača što znači da takođe mora biti

promenljiva. Neravnoteža između ponude i potražnje dovodi do varijabilnosti i nesigurnosti kvaliteta električne energije. Postojeća proizvodnja električne energije se u velikom delu zasniva na fosilnim gorivima. Fosilna goriva zagađuju životnu sredinu i povećavaju globalno zagrevanje. Iz tog razloga glavni fokus je preusmeren na obnovljive izvore energije koji neuporedivo manje utiču na životnu sredinu. Obnovljivi izvori energije su sa druge strane promenljivi i povremeni što predstavlja veliki problem za stabilnost elektroenergetskog sistema. Veći udeo obnovljivih izvora u ukupnoj proizvodnji električne energije dovodi i do većih izazova sa balansiranjem. Rešenje je da povećaju kapaciteti skladištenja energije. ako da se rešenje pronalazi u baterijskim sistemima za skladištenje energije. Konvencionalan način skladištenja energije će u budućnosti postati neefikasan. Ukupna količina proizvedene energije ne stiže do potrošača, zbog gubitaka u proizvodnji i pri prenosu. Efikasnost sistema se može poboljšati korišćenjem baterijskih skladišta. U sektoru električne energije postoji naglo rastuća potreba za rešenjima koja obezbeđuju fleksibilnost elektroenergetskog sistema i adekvatnost kapaciteta. Glavni pokretači koji podržavaju brzo povećanje kapaciteta skladišta energije su baterije. One su ključni element za buduće svetske energetske sisteme izgrađene na obnovljivim izvorima energije, kao što su sunce i vetar. Usled rastućeg udela varijabilnih obnovljivih izvora, povećana je potreba za fleksibilnošću u energetske sistemu, a samim tim i za povećanjem kapaciteta baterija za skladištenje energije. Osim baterijskih skladišta energije, postoje: pumpna hidroakumulaciona skladišta, skladišta komprimovanog vazduha, skladišta sa zamajcem, skladišta na bazi vodonika i ostale vrste skladišta.

2. PRIMENE TEHNOLOGIJA SKLADIŠTENJA ENERGIJE

Skladišta se mogu koristiti za podršku elektroenergetskom sistemu od velikih do malih aplikacija. Koriste se za pomeranje električne energije kroz vreme i mogu isporučiti energiju kad god je to potrebno. Skladišta instalirana u solarnim fotonaponskim elektranama i vetroelektranama omogućavaju vlasnicima da uskladište energiju kada su cene energije niže, a sačuvana energija se može iskoristiti u vreme viših cena električne energije. Skladišta povezana sa solarnim elektranama i vetrogeneratorima na nivou domaćinstva povećavaju udeo proizvedene električne energije u sopstvenoj potrošnji. Kod kućnog fotonaponskog sistema sa baterijskim sistemom, sopstvena potrošnja energije se povećava sa oko 30% bez skladištenja, na 60–70% sa skladištenjem. Na taj način se i efikasnost povećava, a smanjuje se dodatna potreba za električnom energijom iz mreže. Pomažu u balansiraju i izgladivanju fluktuacija u proizvodnji energije iz obnovljivi izvora energije uz pravilno korišćenje i integraciju u mrežu. Takođe se mogu koristiti za podršku pouzdanosti mreže. Aplikacije energetske skladišta o kojima ćemo govoriti su: Energetski vremenski pomak, praćenje opterećenja i podrška naponu, kapacitet rezervnog napajanja, podrška za prenos, ublažavanje zagušenja prenosa, mikromreže, kvalitet električne energije i vremenski pomak energije vetra i solarne energije obnovljivih izvora energije. Energetski vremenski pomak omogućava da se pomeranjem energije kroz vreme obezbedi kupovina električne energije za vreme male potražnje po niskoj ceni i uskladišti se, da bi se zatim isporučila tokom velike potražnje po visokim cenama na tržištu. Skladište se može koristiti za usluge praćenja opterećenja sa variranjem izlazne energije kako bi se uravnotežila proizvodnja i opterećenje na određenim područjima mreže elektroenergetskog sistema. Skladište održava nivo napona u mreži elektroenergetskog sistema putem ubrizgavanja ili apsorpcije reaktivne snage na osnovu stanja napona. Kod kapaciteta rezervnog snabdevanja skladište može biti spremno da se pozove u slučaju bilo kakvog iznenadnog ili neočekivanog gubitka proizvodnje. Može se još koristiti u pomoćnoj usluzi za podršku stabilnosti mreže. Za ovu primenu su pogodne uglavnom tehnologije skladišta velike gustine snage. Skladište obezbeđuje i aktivnu i reaktivnu snagu sa standardnim trajanjem pražnjenja od oko 2 do 5 sekundi u opsegu za datu uslugu. Skladište ima još jednu bitnu ulogu, a to je da ublaži zagušenje prenosa. Zagušenje prenosa nastaje zbog nedostatka kapaciteta dalekovoda pri prenosu viška snage u vršnoj potražnji. Skladište može da uskladišti električnu energiju van vršnog opterećenja, van zagušenja i da oslobodi istu energiju tokom vršnih sati zagušenja. Skladište pruža visoko pouzdanu uslugu u elektroenergetskim sistemima na industrijskom i komercijalnom nivou, u slučaju nestanka struje na duži period. Skladište se može koristiti za smanjenje finansijskih gubitaka vezanih za kvalitet električne energije na nivou krajnjeg korisnika. Takođe poboljšava faktor kapaciteta vetroelektrane i solarne farme, skladištenjem viška energije vetra i sunca tokom uslova jakog vetra i jakog sunca. Intermitentnost izlazne energije sunca i vetra može se klasifikovati na kratkotrajne varijacije i dnevne varijacije. Takva izlazna varijacija solarne energije i energije vetra je izbegnuta odgovarajućim sistemima za skladištenje. Dodatni kapacitet obnovljivih izvora nadoknađuje potrebu za dodatnim proizvodnim kapacitetom i većim kapacitetom opreme za distribuciju i prenos. [1] Mikromreže su definisane kao grupa međusobno povezanih energetske resursa (uključujući solarne sisteme, sisteme energije vetra i sisteme skladišta) i opterećenja elektroenergetskog sistema koja mogu da rade kao jedan kontrolisani entitet bilo paralelno sa mrežom ili u ostrvskom režimu. Mikromreže opslužuju relativno mali broj korisnika ili se povezuju na veći integrisani energetske sistem sa težnjom da se izoluju kada je to potrebno. [8]. Mikromreže rade u opsegu niskog do srednjeg napona za razliku od rada visokog napona konvencionalnog elektroenergetskog sistema. Mikromreže su obično postavljene na manjem geografskom području. Zbog malih proizvodnih kapaciteta mikromreže neophodna je upotreba baterijskih skladišta zbog očuvanja stabilnosti napajanja.

3. KARAKTERISTIKE ENERGETSKIH SKLADIŠTA

Karakteristike tehnologija skladištenja energije određene su sledećim faktorima: gustinom energije, gustinom snage, efikasnosti, vremenu odziva, životnom veku, samopražnjenju, tehničkoj zrelosti, cenom, vremenom punjenja, radnom temperaturom, memorijskom efektu, jedinična površina i uticaju na životnu sredinu. Specifična snaga ili gravimetrijska gustina snage je odnos između snage i težine, što je zapravo maksimalna količina snage koja se može isporučiti po jedinici mase (W/kg). Specifična energija ili gravimetrijska gustina energije je odnos između energije i težine. To je količina energije koja se može uskladištiti po jedinici mase (Wh/kg). Zapreminska gustina snage se izražava u snazi po jedinici zapremine (W/l ili W/m^3) i zapreminska gustina energije se izražava u energiji po jedinici zapremine (Wh/l ili Wh/m^3). Obično većina tehnologije skladištenja sa velikom gustinom snage ima nisku gustinu energije i obrnuto. Efikasnost (Round Trip Efficiency RTE) je odnos između izlazne energije i ulazne energije tokom jednog punog ciklusa (punjenje/praznjenje). Efikasnost se zasniva na količini gubitaka koji se javljaju tokom procesa punjenja, praznjenja i skladištenja. Gubitak energije se izražava u procentima (%). Vreme odziva označava vremene potrebno da sistem reaguje na zahtev i počne sa isporukom električne energije. Ako se sistemi za skladištenje energije duži vremenski period ne koriste, oni imaju tendenciju da izgube deo svoje uskladištene energije, zbog karakteristike samopražnjenja. Nivo samopražnjenja svake tehnologije skladištenja varira u zavisnosti od tipa mehanizma za skladištenje. Kod sistema za skladištenje sa elektrohemijom tehnologijom, gubici samopražnjenja usled hemijske reakcije nastaju kada je baterija u stanju mirovanja. U sistemu za skladištenje toplote dolazi do gubitka toplote energije usled prenosa toplote između skladišnog prostora i okoline. Pored samopražnjenja, nekim tehnologijama skladištenja je potrebna dodatna snaga za funkcionisanje pomoćnih uređaja kao što su kontrola, grejanje i hlađenje. Ovaj dodatni zahtev za snagom se smatra još jednim gubitkom energije poznatim kao parazitski gubici. Samopražnjenje i parazitski gubici se zajednički nazivaju gubici u stanju pripravnosti. Svi sistemi za skladištenje energije smanjuju svoje kapacitete tokom određenog perioda korišćenja. Životni vek sistema za skladištenje energije zavisi od sledeća dva kriterijuma: kalendarskog veka (sistem skladištenja u upotrebi od nekoliko godina) i životnog veka (očekivanog broja ciklusa punjenja i praznjenja pre kvara ili značajne degradacije sistema za skladištenje). Vek trajanja sistema za skladištenje zavisi od vrste tehnologije skladištenja, radnih parametara i drugih uslova okoline. Vreme punjenja ili brzina punjenja je stopa po kojoj se sistem za skladištenje može napuniti. Većina stope punjenja sistema za skladištenje je ista kao i brzina praznjenja. U nekim slučajevima, vreme punjenja varira, što zavisi od kapaciteta energetskog pretvarača, hemijske reakcije i vrste medijuma za skladištenje. Ako se sistem za skladištenje ne puni brzo, ne može da obezbedi napajanje za sledeći ciklus servisa. Cena tehnologije skladištenja energije zavisi uglavnom od investicije i troškova održavanja. Ukupni investicioni troškovi uključuju troškove jedinice za skladištenje (€/kWh) troškove energetskih pretvarača (€/kW) i drugu dodatnu opremu. Troškovi održavanja uključuju troškove rada i troškove zamene delova. Tehnička zrelost tehnologije skladištenja može se klasifikovati u tri kategorije: potpuno zrela, srednje zrela, tehnologija u razvoju. Jedinična površina predstavlja površinu prostora potrebnu po jedinici energetskog kapaciteta uređaja za skladištenje i to je prostorni zahtev koji se izražava u m^2/KWh . Usko je povezan sa gustinom energije i snagom sistema za skladištenje. [1]

4. BATERIJSKA SKLADIŠTA

Baterijska skladišta predstavljaju fleksibilnu, stabilnu i pouzdanu tehnologiju skladištenja energije. Neuravnoteženost ponude i potražnje se može nadomestiti korišćenjem datog sistema, kao što se i područja koja nemaju dovoljno razvijenu energetsku strukturu, mogu lakše napajati električnom energijom iz pouzdanog izvora. Kvalitet energije se održava postavljanjem baterijskih setova u različite energetske sisteme. Obično se koriste u električnim mrežama, ali i u drugim aplikacijama kao što su električna vozila, solarne elektrane, vetro parkove, u industrijama, bolnicama, aerodromima i pametnim kućama. Baterijska skladišta unapređuju ekonomičnost elektroenergetskih sistema. Skladište se lako može usvojiti u sistemu van mreže, kao i u sistemu na mreži i na bilo kojoj lokaciji u energetskom sistemu između proizvođača i potrošača električne energije. Elektrohemijaska skladišta energije imaju mnogo povoljnih sistemskih karakteristika. Nema zagađenja, obezbeđuju fleksibilne karakteristike energije i snage, imaju dug životni vek i nisko održavanje. Zbog kompaktne veličine baterije su pogodne za svaku lokaciju. Mogu smanjiti varijacije na izlaznom naponu u svim sistemima. [2] Izvori energije koji koriste obnovljive izvore i baterijski sistem skladištenja mogu predstavljati inovativno i ekološki prihvatljivo rešenje koje bi se sprovelo zbog energetske krize i zabrinutosti za stabilnost napajanja. Kao što je ranije rečeno, baterijska skladišta predstavljaju sistem podrške sa brzim vremenom odziva, visokom pouzdanošću i niskim samopražnjenjem. Baterijsko skladište takođe može biti odlična alternativa u reduovanju izobličenja. Svaki tip baterijskih skladišta ima specifične attribute: kapacitet, energiju, izlaznu snagu, stope punjenja i praznjenja, efikasnost, životni ciklus i cenu. Sve to treba uzeti u obzir. Različite tehnologije imaju drugačija ograničenja. Svako baterijsko skladište ima određene tehničke specifikacije koje karakterišu efikasnost sistema. Jasno je da je prvi karakterističan parametar kapacitet skladištenja, odnosno

količina električne energije koju baterija može akumulirati i koju baterijsko skladište može učiniti dostupnim. Drugi parametar od velikog značaja je nominalna snaga. To je karakteristika koja određuje količinu snage koju skladište može da preda. Zatim efikasnost koja predstavlja odnos između energije emitovane tokom faze pražnjenja i energije koja se isporučuje tokom faze punjenja baterije. Dubina pražnjenja (DoD) predstavlja procenat ispuštene energije u odnosu na maksimalni kapacitet. Vek trajanja baterije je takođe relevantan parametar za izbor sistema skladišta i izračunava se kroz broj perioda punjenja i pražnjenja baterije. Može se izraziti kao ukupna količina energije koju baterija može da isporučiti tokom svog životnog veka. Bezbednosni parametar je jako bitan u određivanju podobnosti baterije za određenu upotrebu. [3]



Slika 1 - Crveno More, Saudijska Arabija baterijsko skladište 400 MW / 1.300 MWh

5. FLEKSIBILNOST I STABILNOST ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA

5.1. Fleksibilnost

Fleksibilnost elektroenergetskog sistema se definiše kao sposobnost elektroenergetskog sistema da pouzdano i ekonomično upravlja varijabilnošću i neizvesnošću potražnje i ponude u svim relevantnim vremenskim okvirima, od obezbeđivanja trenutne stabilnosti elektroenergetskog sistema do podrške dugoročne sigurnosti snabdevanja. [4] Tekuća energetska tranzicija, prelaska proizvodnje električne energije zasnovane na fosilnim gorivima na obnovljive izvore utiče na to koliko je fleksibilnosti potrebno, ali i ko treba da je obezbedi. Neka postojeća rešenja se postepeno gase, dok se čitavi poslovni modeli novih rešenja zasnivaju na obezbeđivanju fleksibilnosti.[5] Potreba za fleksibilnošću je postojala i ranije ali u značajno manjoj meri. Elektroenergetski sistem je bio zasnovan na centralizovanim proizvodnim kapacitetima sa vrlo predvidljivom proizvodnjom kojom je moguće upravljati i planirati. Sada je slučaj da su proizvodni kapaciteti teritorijalno razučeni uz to i značajno varijabilni i ne predvidivi bez značajne mogućnosti upravljanja i planiranja. Upravo je to razlog za intezivnim razmišljanjima o problemu fleksibilnosti i naporima za pronalaženje tehničkih i tehnoloških rešenja za postizanje fleksibilnosti. Fleksibilnost ne podrazumeva samo potrebu da proizvođači električne energije budu jedini koji se prilagođavaju potrebama i zahtevima tržišta. Tu su potrošači koji su i ranije bili fleksibilni ali u veoma ograničenoj količini. Fleksibilnost potrošača je postizana primenom tarifa (viša i niža) kroz koje su potrošači stimulisani ili destimulisani za potrošnju električne energije u određenim periodima dana (dan - noć). Sadašnjica zahteva da se potrošači prilagode promenama i da postanu još fleksibilniji. Nije više dovoljno da se u tu svrhu koriste tarifni sistemi već je potrebno razraditi dodatne sisteme regulacije i upravljanja potrošnjom. Jedno od rešenja univerzalno kako za proizvođače tako i za potrošače su baterijska skladišta. Poslednjih godina, tehnologija baterijskih skladišta energije se brzo razvila. Očekuje se da će ukupan kapacitet za skladištenje energije porasti sa 11 GWh u 2017. na 167 GWh do 2030. godine na globalnom nivou. Efikasnost, gustina energije, gustina snage i životni vek baterija su se značajno poboljšali. Baterijska skladišta igraju kritičnu ulogu u aplikacijama na strani mreže za poboljšanje ekonomije i sigurnosti rada elektroenergetskog sistema, uključujući pružanje pomoćnih usluga, regulaciju frekvencije, regulaciju napona i smanjenja potrošnje

energije.[6] U sektoru električne energije, sistemi za skladištenje energije se pojavljuju kao jedno od ključnih rešenja za obezbeđivanje fleksibilnosti, vođene brzo rastućim udelom varijabilnih obnovljivih izvora u kombinaciji sa električnom energijom. U sektoru električne energije, baterije igraju sve važniju ulogu kao sistemi za skladištenje energije. Lako se podešavaju, postavljaju i doprinose pouzdanosti i fleksibilnosti sistema. Baterijski sistemi skladištenje energije su veoma osetljivi i mogu brzo da se napune ili isprazne. Trenutna promena neto opterećenja je stoga koristan indikator za potrebe fleksibilnosti koji možemo upotrebiti pri upravljanju baterijskim skladištem. Dugoročne projekcije razvoja globalnog energetskog sistema predviđaju dramatično povećanje važnosti skladištenja baterija za energetski sistem. Ovo je prvenstveno vođeno povećanjem broja električnih vozila i rastućom potražnjom za skladištenjem električne energije. U sektoru električne energije, baterijska skladišta se pojavljuju kao jedno od ključnih rešenja za obezbeđivanje fleksibilnosti energetskog sistema koji vidi naglo rastuće potrebe za fleksibilnošću, vođene brzim povećanjem udela varijabilnih obnovljivih izvora u kombinaciji sa električnom energijom. [7]

5.2. Stabilnost

Balansiranje elektroenergetskog sistema se obično definiše kao: sposobnost elektroenergetskog sistema da povratí stanje radne ravnoteže nakon što je podvrgnut poremećaju, pri čemu većina sistemskih parametara ostaje u zadatim granicama. Analiza stabilnosti je ključni faktor za pouzdano i bezbedno funkcionisanje elektroenergetskog sistema kako bi se obezbedila kontinuirana usluga napajanja. Problemi sa nestabilnošću obično nastaju u elektroenergetskom sistemu zbog velikih poremećaja kao što su prirodne katastrofe, kvarovi na glavnim komponentama u mreži (npr. generatori, dalekovodi, itd.). Energetski resursi kao što su solarni sistemi, vetar i energetska skladišta se sve više integrišu u energetske sisteme jer utiru put za čistu mrežu budućnosti. Proizvodnja energije iz ovih resursa često obuhvata velike stohastičke varijacije, što je još jedan oblik poremećaja u elektroenergetskim sistemima koji može dovesti do nestabilnosti. Sistemi skladišta obično zahtevaju energetske pretvarače kao što je pretvarač izvora napona ili neki njegov derivat koji je povezan sa energetske sistemom. Sistemi skladišta mogu reagovati i raditi mnogo brže u poređenju sa rotacionim generatorima. Ovo je uglavnom zato što su energetski pretvarači koji se koriste u okviru skladišta zasnovani na brzim poluprovodničkim prekidačima. Kao rezultat toga, sistem skladišta se može puniti i prazniti mnogo većom brzinom od rotacionih generatora. Sistemi skladišta stupaju u interakciju sa elektroenergetskim sistemima u različitim vremenskim razmacima što uvodi nijanse u analizu stabilnosti elektroenergetskog sistema sa sistemima skladišta. Vremenski okvir analize stabilnosti je kategorisan na kratkoročnu i dugoročnu stabilnost. Komponente energetskih sistema koje zasnovane na pretvaračima snage u sistemu skladišta imaju vremenske okvire odziva od milisekunde do sekunde. Komponente u elektroenergetskim sistemima su dizajnirane da rade na frekvencijama od 50 Hz sa određenom tolerancijom. Velika odstupanja od ovih vrednosti aktivira zaštitne funkcije (isključivanje generatora ili opterećenja), što može dovesti do neželjenih kvarova ili kaskadnih kvarova u mreži. Glavni izvori frekventne nestabilnosti su ispad proizvodnih jedinica, neplanirano isključenje pojedinih delova elektroenergetskog sistema (ostrvo) ili iznenadno rasterećenje sistema što dovodi do neravnoteže između proizvodnje i potrošnje. Frekvencija u elektroenergetskom sistemu se u određenoj meri održava inercijom velikih rotirajućih generatora, kinetička energija uskladištena u rotorima sinhronih generatora može apsorbovati ili osloboditi energiju kako bi se suprotstavila neravnoteži između proizvodnje i potrošnje. To znači da su veliki sinhroni generatori prva zaštita od potencijalne nestabilnosti frekvencije pre delovanja upravljačkih mehanizama kako bi frekvencija sistema bila stabilna. Smanjenje udela inercije elektroenergetskog sistema uz povećanje udela proizvodnje zasnovano na energetskim pretvaračima može dovesti do nestabilnosti frekvencije. Ovaj trend zahteva da se stabilnost frekvencije održava upravljanjem energetskim pretvaračima. Stabilnost napona se odnosi na sposobnost elektroenergetskog sistema da održi stabilan napon nakon poremećaja. Napon u električnoj mreži treba održavati unutar određene granice. Kvalitet napajanja električnom energijom je u direktnoj vezi sa kvalitetom napona napajanja, pa promene napona preko dozvoljenih granica mogu dovesti do prekida snabdevanja električnom energijom. S obzirom na potpunu upravljivost energetskih pretvarača što se tiče visine napona, aktivne i reaktivne snage, faznog pomeraja i frekvencije uz veliku brzinu reagovanja moguće je razraditi i stvoriti upravljačke mehanizme koji će delovati na energetske pretvarače kako bi visina napona i frekvencija elektroenergetskog sistema ostali stabilni. [8]

6. POREĐENJE BATERIJSKIH SKLADIŠTA SA OSTALIM VRSTAMA SKLADIŠTA

Različite tehnologije skladištenja energije su razmatrane u sledećem odeljku. Energija može biti skladištena u različitim oblicima mehanička, potencijalna, hemijska i dr. koja se posredstvom odgovarajućih pretvarača pretvara u električnu energiju. Cilj ovakvih sistema je sačuvati što veću količinu energiju koju je moguće iskoristiti po potrebi. Sve tehnologije su upoređene zasnovano na prednostima, nedostacima, snazi i drugim energetskim aplikacijama.

6.1. Pumpno hidroakumulacioni sistemi (PHS) skladište potencijalnu energiju vode u akumulaciona jezera koja se pretvara prvo u mehaničku a zatim u električnu energiju. Ovi sistemi su u velikoj meri u upotrebi ali postoji veliki potencijal za povećanje kapaciteta. Karakteriše ga niža gustina energije, malo samopražnjenja, velika efikasnost, niža investiciona cena po jedinici uskladištene energije, dug životni vek, veliki kapaciteti akumulirane energije i brz odziv. Glavni nedostaci PHS postrojenja se odnose na nisku gustinu energije, izuzetno visoke ukupne investicione troškove uz dugo vreme potrebno za projektovanje, ishodovanje dozvola i izgradnju, imaju trajan uticaj na životnu sredinu koji može biti i pozitivan i negativan. Poseban problem je pronaći područje odgovarajuće geomorfologije za akumulaciono jezero koje treba da je u blizinu velike vodene površine, ovakva područja su obično veoma udaljena od veliki potrošačkih centara što negativno utiče na efikasnost sistema. Najrazvijeniji su i najšire korišćena energetska skaldišta. Ova tehnologija je veoma tražena zbog velikog kapaciteta i snage. PHS ima brzo vreme pokretanja, ali je geografski ograničena.

6.2. Skladišta komprimovanog gasa ima veliki kapacitet skladištenja uz sporiji odziv (obično do 10 minuta). Instalacija velikih kapaciteta zahteva jedinstvene geološke uslove za potrebe podzemnog skladištenja, međutim istražuju se brojne ideje o rezervoarima za vazduh koje zaobilaze sva ograničenja. Tehnologija komprimira vazduh i skladišti ga u podzemna skladišta, cevovode ili rezervoare. Potencijalna energija uskladištenog vazduha se po potrebi ispušta, širi i koristi se za proizvodnju energije u turbinskom generatoru. Ova tehnologija je druga posle pumpno hidroakumulacionih sistema u smislu dostupnosti komercijalnih postrojenja danas. Glavne prednosti su velika snaga i kapacitet sistema, dug životni vek. Mane ovog sistema su niska gustina energije, dugo vreme odziva, niža efikasnost.

6.3. Skladišta sa zamajcem akumuliraju mehaničku obrtnu energiju zamajca. Zamajci nude brzo vreme odziva kao i veliki broji ciklusa uz visoku efikasnost i gustinu energije. Ekonomska održivost zamajca zavisi od faktora kao što su cena materijala za zamajac, sistemi ležajeva i energetska elektronika. Napredak u nauci o materijalima i optimizacija dizajna doprinose smanjenju ukupnih troškova i poboljšavaju ukupne performanse. Sve u svemu, skladišta sa zamajcem su izuzetno efikasni ali samo za kratkotrajno skladištenje energije, poseduju visoke mogućnosti dubokog pražnjenja koje su nezavisne od temperature, minimalno utiču na životnu sredinu, imaju veću specifičnu/gustinu snage, povoljnu specifičnu/gustinu energije, brzo vreme odziva, manji kapacitet degradacije, produžen životni vek, veći opseg skalabilnosti i minimalne zahteve za periodično održavanje skladištenja energije. Međutim, sistemi nailaze na primarne nedostatke: veće stope samopražnjenje, mali kapaciteti i potrebnu predostrožnost što se tiče bezbednosti.

6.4. Skladištenje vodonika kao hemijskog energenta uz sistem gorivih ćelija postiže veliku gustine energije u poređenju sa drugim tehnologijama skladištenja. Još jedna prednost je mobilnost energenta, cisternama ili cevovodima se može transportovati sa mesta proizvodnje vodonika do mesta njegove upotrebe. Međutim, kao zapaljiv i eksploziv gas mora imati posebne uslove skladištenja. Samopražnjenje je na veoma niskom nivou ali je efikasnost izuzetno niska zbog još uvek nedovoljno razvijene tehnologije procesa konverzije energije. Efikasnost sistema je oko 40% što je izuzetno malo i ostavlja dosta prostora za unapređenje tehnologije koja će treba da dovede do povećanja efikasnosti. Očekuje se da pored baterijskih skladišta ovaj sistem skladištenja energije ima veliki potencijal u budućnosti što se tiče kapaciteta i oblasti primene.

6.5. Baterijska skladišta na bazi litijuma su jedna od najnovijih tehnologija ali sa najbrže rastućom primenom. Kao i sve vrste baterija, energija se skladišti u hemijskom obliku koja se akumulira ili oslobađa kroz elektrohemijske procese. Pored baterije koja proizvodi jednosmernu električnu energiju, neophodno je korišćenje elektroenergetskih prvarača koji omogućavaju da se naizmenični napon iz mreže koristi za punjenje baterija. Uobičajeno je da se isti pretvarački uređaj koristi i za punjenje i za pražnjenje baterija, praktično radi kao ispravljač pri punjenju a inverter pri pražnjenju baterija. Generalno su visoke cene kao posledica složene tehnologije proizvodnje i korišćenja skupih materijala. Hemijski procesi u baterijama se nemogu u potpunosti kontrolisati i ograničiti zbog čega baterije postepeno degradiraju tj. gube kapacitet tokom vremena što zavisi od faktora kao što su temperatura, ciklusi punjenja i pražnjenja i dubina pražnjenja. Baterije imaju ograničenu radnu temperaturu, ekstremne temperature mogu uzrokovati bržu degradaciju baterije, povećati samopražnjenje, smanjujući njene performanse i životni vek. Baterije sadrže toksične materijale kao što su kobalt i nikl, koji mogu štetiti životnoj sredini ako se ne odlože na odgovarajući način. I pored navedenih nedostataka i mana baterijska skladišta imaju neke izrazite prednosti. Efikasnost je jedna od najviših u poređenju sa ostalim sistemima skladišta, kreće oko 90% i zavisi od raznih faktora kao što su kapacitet, temperatura, struje pražnjenja, visine napona i efikasnosti pratećih sistema. Isti slučaj je i sa vremenom odziva sistema koje je najkraće, iz stanja mirovanja se može dovesti u pogon pod maksimalnim opterećenjem za nekoliko sekundi, dok su odzivi pri zahtevu za promenu snage, regulacije napona i frekvencije manji od 10ms. Zahvaljujući upotrebi elektroenergetskih pretvarača sistem je u najvećoj meri upravljiv što se tiče visine napona, frekvencije, aktivne i reaktivne snage što omogućava upotrebu paralelno sa elektroenergetskim sistemom i nezavisno od njega.

Dodatna prednost je modularnost sistema što znači da se mogu proširivati i nadograđivati kako pri izgradnji tako i u toku eksploatacije. Fabrički pripremljeni moduli, najčešće spakovani u kontejnere, se lako mogu transportovati bilo gde i ugraditi u kapacitetu koji je potreba. Mogu se primeniti u svim prethodno navedenim aplikacijama od najmanjih sistema za kućnu upotrebu do velikih sistema za potrebe balansiranja. Posebna prednost je njihova relativno brza isporuka, montaža i stavljanje u funkciju. Ne zahtevaju posebne prostorne i geografske uslove za postavljanje, obimne građevinske radove, projektovanje i ishodovanje dozvola. Fizički se mogu postaviti bilo gde na liniji proizvođač – potrošač, zavisno od previđene primene i tehnokonomске analize.

Tabela 1 - Poredjenja različitih vrsta skladišta

Vrste skladišta	Troškovi energije skladišta (\$/kWh)	Gustina energije (Wh/l)	Gustina energije (Wh/kg)	Vreme odziva (s)	Snaga (MW)	Životni vek (ciklusa)	Životni vek (godina)	Efikasnost (%)
Pumpna hidro akumulaciona skladišta	106-200	0,27 – 1,36	0,27 – 1,36	10 - 120	10 - 5000	20.000	40 - 60	75 - 80
Skladišta komprimovanog vazduha	94 - 229	55,6	139	10 - 900	5 - 1000	10.000	20 - 40	60 - 70
Zamajac skladišta	4320 - 11520	1470	100	1 - 4	0,1 - 20	100.000	>15	80 - 95
Litijum jonska baterijska skladišta	300 – 450	250 - 731	100 - 243	0,01 - 0,02	< 100	5.000 – 6.000	15 - 20	80 - 95
Vodonik	312	1250	33,3	1	<100	1.000 – 10.000	15	34 - 44
Vanadijum redoks baterijska skladišta	550 - 950	15 - 25	10 - 20	0,01 - 0,02	0,3 - 3	5000	20 - 25	70 - 80

Upoređene su tehnološke performanse i atributi skladišta, uključujući nazivnu snagu, gustinu energije, gustinu snage, efikasnost skladišta, vreme odziva, životni vek i kapitalni troškovi. Sumirane su tehničke karakteristike svih različitih skladišta. Baterijska skladišta imaju veću gustinu energije od ostalih skladišta. Pumpna hidro-akumulaciona skladišta imaju veći opseg snage i duže vreme pražnjenja od ostatka. Zamajac skladišta su skladišta sa kratkim vremenom pražnjenja. Litijum-jonska skladišta i zamajac skladišta imaju najkraće vreme odziva. Hidro-pumpna skladišta i skladišta komprimovanog vazduha imaju najduži životni vek. Najveće troškove snage pod sistema imaju pumpna hidro-akumulaciona skladišta, dok su najveći troškovi energije skladišta prisutni kod zamajac skladišta. [9]

7. ZAKLJUČAK

Baterijske tehnologije su značajno napredovale, posebno u kontekstu skladištenja energije u integraciji sa obnovljivim izvorima energije. Najveće prednosti baterija su njihova univerzalna primena, dostupnost, efikasnost i brzina reagovanja. Prednosti su vođene inovacijama u materijalima i dizajnu. Litijum-jonske baterije su identifikovane kao ključne u tranziciji ka obnovljivoj energiji, nudeći visoku gustinu energije i efikasnost. Međutim, primećeni su izazovi kao što su oskudica materijala, uticaji na životnu sredinu i potreba za poboljšanim metodama reciklaže. Naglašava se sve veći značaj natrijum-jonskih baterija kao održive alternative, koja nudi ekonomske i ekološke prednosti. Integracija skladišta energije sa obnovljivim izvorima energije omogućava bolju fleksibilnost, bolju stabilnost mreže i smanjenje emisija ugljen dioksida. Omogućava napredak u mrežnoj infrastrukturi i sistemima za upravljanje energijom. Tehnološki napredak obećava veću gustinu energije i sigurniji hemijski sastav baterija i skladištenje energije u širokoj primeni. Saradnja između industrije, akademske zajednice i vlade je od suštinskog značaja za rešavanje tehničkih, ekonomskih i ekoloških izazova u tehnologiji baterija i skladišta energije. Integracije sistema baterijskih skladišta sa obnovljivim izvorima energije

i tehnologijama pametnih mreža je od vitalnog značaja. Pored toga, rešavanje socio-ekonomskih aspekata usvajanjem tehnologije baterija i njenog uticaja na energetska tržišta i politike biće od ključnog značaja. Nastavak evolucije tehnologije baterija će igrati ključnu ulogu u oblikovanju budućnosti skladištenja energije, nudeći put ka održivom i efikasnom korišćenju električne energije.

REFERENCE

- [1] Vinayagam Arangarajan Jaideep Chandran Gm Shafiullah, 2015, „Role of energy storage in the power system network, Deakin University, School of Engineering, Faculty of Science, Engineering and Built Environment, 75 Pigdons road, Geelong, Waurn Ponds, Victoria 3216, Australia, ResearchGate, www.researchgate.net.
- [2] Kremer F, Buquet M, Biellmann H, Rael S, Urbain M, Beaufre P., 2019, „Analysis of battery energy storage system integration in a combined cycle power plant“, 2nd international conference on smart energy systems and technologies. Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- [3] Stefano Passerini, Linda Barelli, Manuel Baumann, Jens F. Peters, Marcel Weil, 2024, „Emerging battery technologies to boost clean energy transition“, Springer.
- [4] IEA, 2019, „Status of power system transformation, power system flexibility“, [Online], <https://iea.blob.core.windows.net/>.
- [5] T. Heggarty et al., „Quantifying power system flexibility provision“, Applied Energy, vol. 279, p. 115852, 2020.106. , Available: <https://iea.blob.core.windows.net/>.
- [6] Hongjie He, Ershun Du, Ning Zhang, Chongqing Kang, Xuebin Wang, 2021, „Enhancing the power grid flexibility with battery energy storage transportation and transmission switching“, Applied Energy Volume 290, 15 May 2021, 116692, Elsevier.
- [7] M. Schönfisch, A. Dasgupta & B. Wanner, 2024, „Projected Global Demand for Energy Storage“, In: Emerging Battery Technologies to Boost the Clean Energy Transition: Cost, Sustainability, and Performance Analysis. Passerini, S., L. Barelli, M. Baumann, J. F. Peters & M. Weil (Eds.), Springer.
- [8] Ujjwol Tamrakar, Hyungjin Choi, Reinaldo Tonkoski, 2020, „Chapter 19 - Stability Analysis of Energy Storage Integration in Power Systems“, U.S. DOE Energy Storage Handbook, <https://www.sandia.gov/ess/publications/doe-oe-resources/eshb>.
- [9] Mohammad Amir, Radhika G. Deshmukh, Haris M. Khalid, Zafar Said, Ali Raza, S.M. Muyeen, Abdul-Sattar Nizami, Rajvikram Madurai Elavarasan, R. Saidur, Kamaruzzaman Sopian, 2023, „Energy storage technologies: An integrated survey of developments, global economical/environmental effects, optimal scheduling model, and sustainable adaption policies“, Journal of Energy Storage 72, 108694, Elsevier.