

DOI: [10.46793/CIGRE37.B3.02](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.B3.02)**B3.02****PRIMENA SISTEMA ZA AKUMULIRANJE ELEKTRIČNE ENERGIJE I NJIHOVA
ISPLATIVOST****APPLICATION OF ENERGY STORAGE SYSTEMS AND THEIR COST-
EFFECTIVENESS****Vladica Mijailović, Aleksandar Ranković, Predrag Petrović***

Kratak sadržaj: U radu je dat pregled komercijalno dostupnih sistema, kao i sistema u fazi istraživanja, koji se mogu upotrebiti za akumuliranje električne energije u prenosnim i distributivnim delovima EES-a. Navedene su osnovne tehničke karakteristike, dobre i loše osobine svakog od pomenutih sistema. Posebna pažnja je posvećena isplativosti primene sistema za akumuliranje kada u EES-u postoje obnovljivi izvori električne energije.

Ključne reči: *Akumuliranje električne energije, Distribuirani izvori, Nadzemni vod, Transformatorska stanica, Isplativost*

Abstract: This paper provides an overview of commercially available energy storage systems, as well as those in the research phase, that can be used in the transmission and distribution segments of the power system. The basic technical characteristics, advantages, and disadvantages of each mentioned system are presented. Special attention is devoted to the cost-effectiveness of energy storage system applications when renewable energy sources are present in the power system.

Key words: *Energy storage, Distributed sources, Overhead line, Transformer substation, Cost-effectiveness*

1 UVOD

Smanjenje rezervi fosilnih goriva i iskorišćenost velikih vodotokova nametnuli su potrebu izgradnje malih elektrana, koje se baziraju na obnovljivim izvorima energije, i koje se priključuju na distributivnu mrežu. Time je došlo do promene proizvodnje velikih, konvencionalnih, elektrana, dok je potrošnja ostala ista. U takvim okolnostima balansiranje potrošnje i proizvodnje u distributivnim sistemima postaje značajan problem. Naime, proizvodnja "meteorološki zavisnih" obnovljivih izvora (vetroelektrane, FN-sistemi) se menja na način koji se teško može predvideti. Brzina vetra, broj sati sa tehnički upotrebljivim vetrom, osunčanost ili oblačnost su parametri koji bitno utiču na proizvodnju, tako da se može postaviti pitanje: Ko će da nadomesti manjak, odnosno šta uraditi sa viškom proizvedene električne

* Vladica Mijailović, FTN u Čačku, Univerzitet u Kragujevcu, vladica.mijailovic@ftn.kg.ac.rs

Aleksandar Ranković, FTN u Čačku, Univerzitet u Kragujevcu, aleksandar.rankovic@ftn.kg.ac.rs

Predrag Petrović, FTN u Čačku, Univerzitet u Kragujevcu, predrag.petrovic@ftn.kg.ac.rs

energije, u distributivnim sistemima u kojima dominiraju napred pomenuti tipovi distribuiranih izvora? Fluktuacije se moraju ublažiti obezbeđivanjem dodatnog izvora u periodima smanjene proizvodnje i načina da se višak energije korisno upotrebi u periodima kada proizvodnja premašuje potrošnju. Pomenuti problemi se, tehnički gledano, mogu rešiti izgradnjom Sistema za Akumuliranje Energije (SAE), ali se postavlja pitanje njihove ekonomske isplativosti, veličine i zakonske regulative kada su u pitanju pojedini načini skladištenja energije (opasnost od požara, toksičnost, narušavanje životne sredine). Ključni razlozi za korišćenje SAE u distributivnoj mreži su: odlaganje pojačavanja mreže, poboljšavanje naponskih prilika, pouzdanosti napajanja, kvaliteta električne energije i upravljanje potrošnjom (akumuliranje energije u periodima nižeg opterećenja i njeno korišćenje u periodima višeg opterećenja).

SAE u distributivnim mrežama konvertuju višak električne energije iz mreže u oblik pogodan za akumuliranje, radi korišćenja kada to bude potrebno. Konverzija energije iz jednog oblika u drugi se obavlja posredstvom uređaja energetske elektronike.

SAE je, tipično, opremljen osnovnim upravljačkim i kontrolnim komponentama koje omogućavaju siguran i pouzdan rad sistema. Cilj je da se obezbedi, osim lokalnog upravljanja, i koordinacija sa ostalim komponentama distributivne mreže. Uređaji energetske elektronike obezbeđuju prilagođavanje parametara energije koja teče između mreže i SAE i obratno. Kontroler napunjenosti, zajedno sa elektronskim komponentama, osigurava da parametri SAE ne izađu van dozvoljenog opsega vrednosti, definiše referentne vrednosti aktivne P i reaktivne Q snage sistema za akumuliranje, čime se daje mogućnost inteligentnog donošenja odluka, radi postizanja parametara pogona bliskih optimalnim. Zavisno od načina realizacije, referentne vrednosti za P i Q mogu se kontrolisati lokalno ili daljinski.

Prema obliku akumulirane energije, SAE mogu biti:

- **Mehanički sistemi**, u koje spadaju Reverzibilne (pumpno-akumulacione) hidroelektrane, Sistemi sa komprimovanim vazduhom i Inercione mase;
- **Elektrohemijski sistemi** (Olovni i akumulatori na bazi nikla, "Protočni akumulatori" (redukciono-oksidacione ili hibridne baterije) i Napredne tehnologije akumulatora);
- **Hemijski sistemi** (u upotrebi su Sistemi za akumuliranje vodonika);
- **Električni sistemi** (Ultra-kondenzatori i Sistemi sa super-provodnim magnetnim materijalima) i
- **Termički sistemi** (rastopi soli i kriogeni sistemi).

Svaki od ovih sistema ima različitu ulogu u upravljanju energijom, od skladištenja viška električne energije u domaćinstvima do balansiranja potražnje u elektroenergetskim mrežama velikih razmera. Najnoviji trendovi u istraživanjima su usmereni na korišćenje veštačke inteligencije za upravljanje pomenutim sistemima.

U literaturi se navode prednosti i nedostaci primene SAE, pri čemu su prednosti krajnje diskutabilne, prvenstveno zbog visoke cene ovih sistema kada se želi akumuliranje viškova električne energije iz meteorološki zavisnih distribuiranih izvora, uticaja na ekologiju, odlaganja otpada nakon isteka životnog veka, visoke temperature na kojima rade pojedini sistemi i dr. U Nemačkoj su instalisane desetine hiljada vetro-elektrana i FN-postrojenja. Tokom novembra i decembra 2023. godine meteorološke prilike su bile takve da je proizvodnja iz pomenutih izvora premašivala potrošnju električne energije. Nemci su nudili da plate (negativna cena električne energije) onome ko hoće da preuzme višak energije. A onda se u januaru 2024. godine situacija drastično promenila.

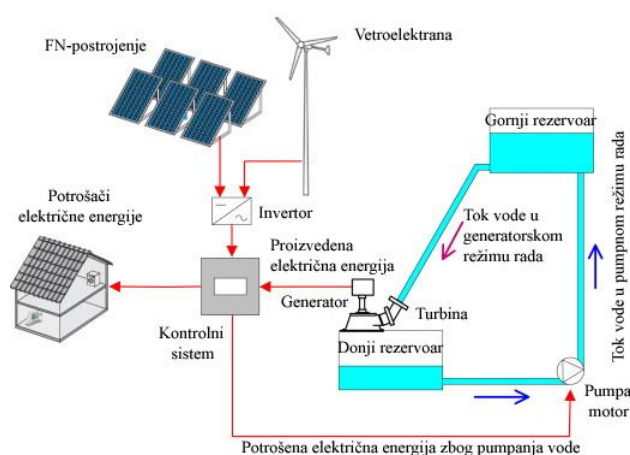
Niska temperatura, slab vetar, tehnički skoro neupotrebljiv, i niska iradijacija su uzrokovali da se dnevno uvozilo 5 GW električne energije. Primera radi, prosečno dnevno opterećenje u Srbiji u tom periodu je iznosilo 4,9 GW.

2 REVERZIBILNE HIDROELEKTRANE (RHE)

Reverzibilne hidroelektrane (RHE) imaju donju i gornju akumulaciju, pri čemu je donja akumulacija na nivou reke ili jezera. U periodima kada je proizvodnja električne energije veća od potrošnje, višak energije se troši tako što se voda iz donje akumulacije pumpama prebacuje u gornju akumulaciju (*pumpni režim*), odnosno vrši se transformacija električne energije u potencijalnu energiju vode. Kada se ukaže potreba za dodatnom količinom električne energije u sistemu RHE ulazi u *generatorski režim*, odnosno radi kao proizvođač energije, propuštanjem vode iz gornje u donju akumulaciju, sl.1. Ovo su derivacione elektrane (betonski ili čelični cevovodi pod pritiskom).

Količina električne energije koja se potroši za pumpanje vode iz donje u gornju akumulaciju je znatno veća od energije proizvedene u generatorskom režimu. Međutim, proračuni i iskustvo pokazuju da je ovo veoma ekonomično rešenje u mešovitim hidro-termo sistemima, kada treba izbeći česta isključivanja/uključivanja termoelektrana, što su prilično skupi postupci.

Tipično, stepen iskorišćenja η RHE je u opsegu $\eta = [0,70 \div 0,85]$.



Sl.1: Šematski prikaz sistema sa RHE, vetro-elektranom i FN-elektranom

Nemci i Norvežani su svojevremeno analizirali mogućnost da se na fjordovima u Norveškoj izgrade RHE u kojima bi se akumulirali viškovi električne energije proizvedene u Nemačkoj. Za cenu električne energije od $31,52 \text{ EUR}/\text{MWh}$ je zaključeno da ni jedna od šest analiziranih varijanti nije isplativa, već da eventualnim viškovima treba upravljati regulacijom rada postojećih hidro-elektrana (smanjivanjem proizvodnje postojećih HE u periodima kada postoje viškovi električne energije i povećavanjem proizvodnje kada se pojavi manjak).

Očekivani vek eksploatacije RHE je oko 50 godina, jedinična cena izgradnje je $[500 \div 2000] \frac{\text{EUR}}{\text{kW}}$, a vreme pražnjenja akumulacije je od nekoliko sati do nekoliko dana. Cena izgradnje bitno zavisi od lokacije elektrane. Mane su im eventualni uticaj na ekologiju i uklaпанje u okolinu.

3 ELEKTROHEMIJSKI SISTEMI ZA AKUMULIRANJE ENERGIJE

Nekoliko tipova elektrohemijskih uređaja-akumulatora može biti upotrebljeno za skladištenje električne energije. Ovi uređaji malog kapaciteta, poznatiji kao baterije, masovno se koriste za napajanje satova, mobilnih telefona, prenosnih računara i dr. Učinjeni su ozbiljni pokušaji, pojedini su bili uspešni, da se neke varijante i tehnologije upotrebe za sisteme za neprekidno napajanje, održavanje napona ili impulsno napajanje određenih kategorija potrošača. Ključni zajednički nedostatak svih tipova akumulatora je visoka cena po jedinici akumulirane energije.

3.1 Olovni akumulatori

Olovni akumulator se sastoji od niza ćelija čiji su osnovni elementi:

- pozitivna elektroda (olovo-dioksid, PbO_2),
- negativna elektroda (olovo, Pb) i
- elektrolit ($(20 \div 40)\%$ - tni rastvor sumporne kiseline H_2SO_4 i destilovane vode).

Napon između elektroda ćelije, kada je potpuno napunjena, je $2,12\text{ V}$. Obično se na red vezuju po tri ili šest ćelija, tako da je naznačeni napon akumulatora 6 V ili 12 V .

Efikasnost procesa punjenja akumulatora je oko 95%. Efikasnost procesa pražnjenja je, takođe, oko 95%, tako da je stepen iskorišćenja jednog ciklusa (punjenje-pražnjenje)- 90,25%.

Zavisno od sastava elektroda, akumulator može biti optimizovan za rad sa plitkim ili dubokim pražnjenjem. Jedinice sa plitkim pražnjenjem ne mogu da se isprazne ispod nivoa od 75% svog kapaciteta (iskoristivo je 25%), dok one sa dubokim pražnjenjem mogu da se isprazne do nivoa od 20% kapaciteta (iskoristivo je 80%).

Za olovne akumulatore je važno da rade na temperaturi koja je bliska naznačenoj. Ako je temperatura viša od naznačene dolazi do znatnog skraćenja očekivanog perioda eksploatacije. Na primer, ako je naznačena radna temperatura akumulatora 25°C a akumulator radi na temperaturi od 35°C očekivani period eksploatacije biće skraćen za 44% u odnosu na period kada bi akumulator radio na naznačenoj temperaturi. Takođe, mora se sprečiti i rad na suviše niskim temperaturama, da bi se izbeglo smrzavanje. Dakle, zaključujemo da olovni akumulatori moraju da rade u klimatizovanim prostorijama.

Najveće postrojenje na svetu koje se bazira na olovnim akumulatorima se nalazi u Kaliforniji. Kapacitet akumuliranja je $40\,000\text{ kWh}$, odnosno sistem može da injektira u mrežu snagu od 10 MW tokom perioda od 4 h .

Radi regulacije učestanosti, u sistem na Aljasci 2012. godine instalisan je SAE snage 3 MW i kapaciteta 750 kWh . U sistemu postoje HE, vetro-elektrane i dizel-generatori. SAE je uveden u sistem jer se planira izgradnja novih vetro-elektrana instalisane snage $4,5\text{ MW}$ i jer je procenjeno da bi bez SAE bila ugrožena frekventna stabilnost. Parametri u mreži se prate 100 puta u sekundi, a SAE može da isporuči 3 MW u roku od 50 ms od trenutka kada nastupi nedozvoljen pad učestanosti. Cena ovog sistema je bila 3 miliona dolara, a vek eksploatacije 5 godina.

Nabavna cena olovnih akumulatora je oko $(100 \div 250) \text{ EUR/kW}$. Specifična energija iznosi oko 40 Wh/kg (zbog velike gustine olova), naznačeni broj ciklusa punjenje-pražnjenje je $500 \div 2000$, a prosečna dužina životnog veka je oko 20 godina. Gubici zbog samopražnjenja su $(2 \div 5)\%$ u toku meseca. Trenutna istraživanja su usmerena na zamenu katode od olova katodom od ugljenika.

3.2 Akumulatori na bazi nikla

Najstariji tip iz ove grupe su nikl-kadmijumski ($Ni - Cd$) akumulatori, čiji su osnovni delovi:

- pozitivna elektroda (nikl-oksidi-hidroksidi $NiO(OH)$),
- negativna elektroda (kadmijum, Cd) i
- elektrolit (kalijum-hidroksid, KOH , razređen destilovanom vodom).

Noseći deo elektroda pravi se od čeličnog perforiranog lima ili čelične pletene mreže. Zbog toga se ovi akumulatori zovu i čelični akumulatori. Napon napunjene ćelije je $1,29 \text{ V}$. Dodavanjem određenih supstanci na osnovnu konfiguraciju mogu se poboljšati radne karakteristike.

$Ni - Cd$ akumulatori su znatno robusniji od olovnih. Kod njih ne može doći do smrzavanja elektrolita, niti pregrevanja, niti postoji problem prepunjenosti, tako da oni ne zahtevaju upotrebu kontrolera napunjenosti. Sve ovo opravdava nešto višu cenu u odnosu na olovne akumatore.

Kapacitet $Ni - Cd$ akumulatora je preko 1200 Ah . Konstrukcija same ćelije zavisi od toga da li je akumulator namenjen za brzo, srednje ili sporo pražnjenje.

Dužina perioda eksploatacije $Ni - Cd$ akumulatora zavisi od načina upotrebe i manje zavisi od dubine pražnjenja nego kod olovnih akumulatora. U uslovima bez ekstremnih varijacija temperature ambijenta može se očekivati oko 2000 ciklusa punjenje-pražnjenje. U ekstremnim uslovima eksploatacije, u smislu brzine pražnjenja, to je period od oko 8 godina, a u uslovima prosečnog rada- oko 25 godina.

Najpoznatije postrojenje sa $Ni - Cd$ akumulatorima je izgrađeno na Aljasci, naznačenog kapaciteta akumuliranja $6,5 \text{ MWh}$. Ovo postrojenje je poznato po tome što je tokom perioda pražnjenja od 5 minuta u mrežu injektiralo snagu od 46 MW . Tehničke karakteristike ovih akumulatora su nešto bolje u poređenju sa olovnim, ali ključni problem je toksičnost kadmijuma. Njih sa tržišta istiskuju $NiMH$ akumulatori (nikl-metal-hidridni).

$NiMH$ -akumulatori imaju veću gustinu energije (80 Wh/kg) , manji uticaj na ekologiju i jeftiniji su u odnosu na $Ni - Cd$ akumatore. Međutim, ovi akumulatori imaju relativno visok intenzitet samopražnjenja (20% u toku 24 časa nakon punjenja, a zatim 10% mesečno) i znatno kraći životni vek. Često se koriste u hibridnim automobilima.

Natrijum-nikl-hlorid (NaNiCl_2) akumulatori (poznatiji kao ZEBRA) su visokotemperaturni elementi (radna temperatura je oko 300°C), sa gustinom energije akumuliranja 100 Wh/kg i specifičnom snagom 150 W/kg . Negativna elektroda je od rastopljenog natrijuma. Pozitivna elektroda je nikl u ispražnjenom stanju, a nikl-hlorid u napunjenom stanju. Elektrolit je rastop natrijumove soli. Po svim karakteristikama, ovo je najbolja varijanta od svih tipova akumulatora na bazi nikla. Ispituje se mogućnost njihove primene za akumuliranje energije u električnim mrežama. Specifična cena ovih baterija je $(150 \div 300) \text{ EUR/kW}$.

3.3 Napredne tehnologije akumulatora

3.3.1 Litijum-jonski akumulatori

Litijum je najlakši metal, sa veoma visokim potencijalom za upotrebu u akumulatorima, zahvaljujući svojoj reaktivnosti. Mada se svi nazivaju Litijum-jonski, postoji nekoliko tipova ovih akumulatora koji se neznatno razlikuju po vrsti upotrebljenih hemijskih jedinjenja.

Li-jonski akumulatori imaju veoma visoku gustinu energije akumuliranja (više od 150 Wh/kg), nizak nivo samopražnjenja od 5% mesečno, a napon napunjene ćelije je $3,7\text{V}$. Nabavna cena im je oko 130 EUR/kW , potpuno pražnjenje može da uništi ćeliju, a ako se ne koristi akumulator propada 5 godina nakon proizvodnje. Litijum je zapaljiv u kontaktu sa vlagom. U Velikoj Britaniji je 2011. godine uspešno instalisan sistem kapaciteta akumuliranja 200 kWh . Sistem radi u kombinaciji sa super-kondenzatorima, radi podrške integraciji vetroelektrana na lokalnu mrežu.

Na Havajima, u vetro-parku snage 21 MW , instalisan je SAE snage 11 MW i kapaciteta 4300 kWh . Uloga sistema je da ublaži uticaj varijacija u proizvodnji na mrežu. Cena projekta je iznosila $(9 \div 13)$ miliona dolara, a očekivani period eksploatacije je 20 godina.

I proizvođači i budući korisnici imaju velika očekivanja kada su u pitanju *Li*-jonski akumulatori.

3.3.2 Natrijum-sulfidni akumulatori

Natrijum-sulfidni (NaS) akumulatori su visokotemperaturni elementi, radne temperature 300°C . Imaju stepen iskorišćenja $(0,85 \div 0,92)$ i odlične akumulacione parametre, $(150 \div 230) \text{ W/kg}$ i $(150 \div 240) \text{ Wh/kg}$. Potrebna radna temperatura se održava korišćenjem grejača i toplotne izolacije. Instalirana snaga sistema za akumuliranje koji se baziraju na *NaS*-akumulatorima samo u Japanu iznosi 250 MW , a u ostatku sveta na 71 lokaciji ukupno 66 MW . Instalirani elementi, (ukupne snage 316 MW), mogu da akumuliraju 1896 MWh . Nabavna cena ovih akumulatora (baterija) je 95 EUR/kW , naznačeni broj ciklusa punjenje-pražnjenje je oko 3000, a očekivani životni vek $(5 \div 15)$ godina. Loše osobine su visoka radna temperatura i opasnosti koje iz toga proističu.

3.4 Primer proračuna

Pre nego što izložimo rezultate analiza, ukažimo na nekoliko činjenica:

- u ceni SAE cena akumulatora učestvuje sa oko 40%;
- cene akumulatora su veoma nestabilne, počev od 2023, i beleži se značajan pad;
- analitičari ocenjuju da će tokom 2026. cena akumulatora opasti ispod 100 EUR/kWh , ali se očekuje i skraćenje očekivanog veka eksploatacije. Napominjemo da problemi sa odlaganjem otpada i uticaj na životnu sredinu još uvek nisu rešeni;
- sprovedene analize pokazuju da se očekuje dalji pad nabavne cene SAE za $(16 \div 49)\%$ do 2030. godine, a za $(28 \div 67)\%$ do 2050. godine (u odnosu na cene iz 2023.).

Neka imamo FN-elektranu i/ili vetro-elektranu čija proizvodnja je dovoljna da se SAE svakog dana puni do punog kapaciteta.

Cena SAE se obično izražava u EUR/kWh (preciznosti radi, cena samih baterija zavisi i od instalisane snage i od kapaciteta, dok cena invertorskog dela zavisi prvenstveno od snage). Prema [14], što je analiza iz 2023. godine, minimalna, srednja i maksimalna očekivana cena SAE u 2030. godini biće 222 EUR/kWh , 318 EUR/kWh i 366 EUR/kWh , a tokom 2050. godine 144 EUR/kWh , 205 EUR/kWh i 316 EUR/kWh , respektivno.

Prosečna jedinična cena u 2024. godini je bila oko 350 EUR/kWh . Na primer, ako je instalisana snaga SAE 100 MW i vreme pražnjenja sistema 4 h , nabavna cena je:

$$100\,000 \text{ kW} \cdot 4 \text{ h} \cdot 350 \text{ EUR/kWh} = 140 \cdot 10^6 \text{ EUR}.$$

Neka se ovaj sistem svakog dana puni tokom perioda niže tarife a prazni tokom perioda više tarife, sa stepenom iskorišćenja od 100%. Ako je razlika u ceni između više i niže tarife električne energije $0,2 \text{ EUR/kWh}$ teorijski period otplate ovog sistema je:

$$\frac{350 \text{ EUR/kWh}}{0,2 \text{ EUR/kWh}} = 1750 \text{ dana} = 4 \text{ god } 9 \text{ meseci}.$$

(Kada se sprovede analiza za očekivane cene u 2030. i 2050. godini cene nabavke i periodi otplate SAE su:

Godina	2030.	2050.
Cena akumulatora	Cena SAE $[10^6 \text{ EUR}] /$ Period otplate $[\text{god.}]$	Cena SAE $[10^6 \text{ EUR}] /$ Period otplate $[\text{god.}]$

Minimalna	88,8/3,04	57,6/1,97
Srednja	127,2/4,36	82/2,81
Maksimalna	146,4/5,01	126,4/4,33

Treba imati u vidu da su ovo neponderisane vrednosti i da nije realno očekivati da će cena električne energije ostati nepromenjena.)

Za slučaj da nema SAE, a da je potrebno višak energije isporučiti u mrežu ili iz mreže preuzeti potrebnu energiju, u slučaju veće potrošnje, analize pokazuju sledeće:

- izgradnja jedne TS 2x40 MVA, $\frac{110 \text{ kV}}{35 \text{ kV}}$ košta $(5 \div 10) \cdot 10^6 \text{ EUR}$;
- izgradnja nadzemnog voda 110 kV, zavisno od konfiguracije terena, košta $(100 \div 250) \cdot 10^3 \frac{\text{EUR}}{\text{km}}$

Ako želimo da posmatranom potrošačkom području, osim iz postojećih, obezbedimo napajanje iz još dva pravca, iz mreža koje su udaljene po 50 km svaka, izgradićemo dve TS i svaka će se napajati sa po 2 voda (H-šema). Cena ovog projekta bi bila:

- izgradnja 4 nadzemna voda: $4 \cdot 50 \text{ km} \cdot (100 \div 250) \cdot 10^3 \frac{\text{EUR}}{\text{km}} = (20 \div 50) \cdot 10^6 \text{ EUR}$;
- izgradnja 2 TS: $2 \cdot (5 \div 10) \cdot 10^6 \text{ EUR} = (10 \div 20) \cdot 10^6 \text{ EUR}$.

Dakle, cena projekta bi iznosila $(30 \div 70) \cdot 10^6 \text{ EUR}$. Poređenjem sa cenom SAE iz 2024. godine, zaključujemo da je ovo rešenje u najnepovoljnijoj varijanti jeftinije od nabavke SAE za $70 \cdot 10^6 \text{ EUR}$. Takođe, poređenjem sa rezultatima iz priložene Tabele može se zaključiti da nabavka SAE neće biti opravdana ni 2030. ni 2050. godine, sem u slučaju minimalne nabavne cene SAE.

4 HEMIJSKI SISTEMI- SISTEMI ZA AKUMULIRANJE VODONIKA

Osim akumulatora koji skladište električnu energiju, kao medijum za skladištenje energije može se koristiti i vodonik. Prednost upotrebe vodonika je sledeća: kada poželimo da upotrebimo akumuliranu energiju, u reakciji sagorevanja, vodonik će reagovati sa kiseonikom i, kao subprodukt, dobiće se samo voda. Ako vodonik sagoreva u vazduhu radi dobijanja pare za pokretanje turbina u elektranama, subprodukt će, takođe, biti voda sa malim sadržajem oksida azota. Osim za proizvodnju električne energije, vodonik se može koristiti i za pokretanje vozila i svemirskih letelica.

Jedna od, možda, ključnih prednosti skladištenja vodonika u odnosu na druge načine skladištenja energije je toplotni kapacitet vodonika. Energija potrebna za sagorevanje vodonika je veoma mala: 10 puta je manja od energije paljenja benzina i 15 puta od energije paljenja prirodnog gasa. Energija koja se oslobađa sagorevanjem vodonika je oko 2,4 puta veća od energije oslobođene sagorevanjem jednake mase benzina ili prirodnog gasa, na normalnoj temperaturi i normalnom pritisku.

Posmatrano po jedinici zapremine skladištenja situacija je sledeća: u rezervoaru zapremine 150 dm^3 , pod pritiskom od 60 bar , može se uskladištiti 6 kg vodonika, čija je energetska vrednost 860 MJ , što je približno jednako energiji koja se oslobađa sagorevanjem 20 dm^3 benzina.

Vodonik se dobija elektrolizom vode ili se iz goriva bogatih ugljovodonicima izdvaja vodonik. Izlaz FN-sistema je jednosmerni napon vrednosti pogodne za realizaciju, relativno efikasnog, procesa elektrolize. Međutim, problem je održati proces u uslovima kada izlazna snaga FN-sistema bitno varira u zavisnosti od intenziteta upadnog Sunčevog zračenja.

Vodonik se obično skladišti u gasovitom stanju, mada ima i drugih mogućnosti, u tečnom stanju ili u vidu metalnih hidrida. Kada je u pitanju upotreba vodonika za proizvodnju električne energije najčešće se koriste gorivne ćelije.

Preko 600 sistema sa gorivnim ćelijama, snage veće od 10 kW , je instalisano širom sveta. Prvi i najveći od njih je postavljen u Norveškoj. Sistem se sastoji od kombinacije vetroelektrana i gorivnih ćelija i napaja izolovano potrošačko područje. Kada nema vetra, gorivne ćelije mogu da obezbede potpuno napajanje 10 stambenih jedinica tokom perioda od $2 \div 3$ dana.

Zavisno od snage, cena nabavke gorivnih ćelija je $(400 \div 1500) \frac{\text{EUR}}{\text{kW}}$, imaju proizvodni kapacitet do 100 MWh , stepen iskorišćenja im je do 0,85.

Vodonik se može upotrebiti umesto prirodnog gasa. U Hamburgu je nedavno napravljeno postrojenje-prototip naznačene snage 1 MW , u kome se vodonik dobija u procesu koji se napaja iz vetroelektrane i koristi za proizvodnju toplotne energije.

Ključni nedostatak korišćenja vodonika za proizvodnju električne energije je cena. Naime, samo proizvodna cena vodonika premašuje najvišu cenu po kojoj se proizvedena električna energija može prodati, bez uzimanja u obzir ostalih troškova (nabavka opreme, održavanje, troškovi plata zaposlenih).

Za proizvodnju jednog kilograma vodonika potrebno je 52 kWh električne energije. U idealnim uslovima, iz jednog kilograma vodonika može se proizvesti 33 kWh električne energije, što znači da je teorijski maksimalan stepen iskorišćenja $\frac{33}{52} = 0,63$. Od trenutka puštanja sistema u pogon do trenutka kada počne proizvodnja električne energije protekne 8 h . Kada se uzmu u obzir stepeni iskorišćenja elektronskih elemenata, toplotni i električni procesi rezultatni stepen iskorišćenja je 0,49. Očekivani vek eksploatacije gorivnih ćelija je $(25000 \div 80000) \text{ h}$.

Maloprodajna cena vodonika je oko $30 \frac{\text{EUR}}{\text{kg}}$. Nabavna cena sistema sa gorivnim ćelijama je

oko $630 \frac{\text{EUR}}{\text{kW}}$. Da zaključimo: korišćenje vodonika za proizvodnju električne energije nije ekonomično rešenje.

5 ZAKLJUČAK

U radu je dat pregled najčešće korišćenih načina za akumuliranje električne energije. Opisane su osnovne tehnološke karakteristike svakog od njih, dati su primeri primene i urađeni su jednostavni ekonomski proračuni. Trenutna situacija je takva da primena sistema za akumuliranje energije u aktivnim distributivnim mrežama nema ekonomsko opravdanje.

ZAHVALNICA

Rad je rezultat istraživanja na projektu No. **451-03-136/2025-03/ 200132** koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije. Autori se najiskrenije zahvaljuju na podršci

6 LITERATURA

- [1] C. K. Das et al., "Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 91 (2018) 1205–1230
- [2] M. Zeraati et al., "Distributed Control of Battery Energy Storage Systems for Voltage Regulation in Distribution Networks with High PV Penetration", *IEEE Trans. on Smart Grid*, 2018., doi: 10.1109/TSG.2016.2636217
- [3] X. Qu and X. Li, "A dynamic model of battery energy storage system based on the external characteristic equivalent", *MATEC Web of Conferences* 160, 03004 (2018), doi.org/10.1051/mateconf/201816003004
- [4] P. Komarnicki et al., "Electric Energy Storage Systems: Flexibility Options for Smart Grids", Springer, 2017.
- [5] J. Wang et al., "Overview of Compressed Air Energy Storage and Technology Development", *Energies* 2017., 10, 991; doi:10.3390/en10070991
- [6] M. E. Amiryar and K. R. Pullen, "A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications", *Appl. Sci.* 2017, 7, 286; doi:10.3390/app7030286
- [7] A. Becker et al., "Electricity storage systems in medium- and low-voltage networks", *International ETG Congress 2015*, Nov. 17-18, 2015., Bonn
- [8] T. A. Theubou Tameghe et al., "Modelling and Simulation of a Flywheel Energy Storage System for Microgrids Power Plant Applications", *EIC Climate Change Technology Conference 2015*, Paper Number 1570034251
- [9] Y. Yang et al., "Research on battery storage system configuration in active distribution networks", *Int. J. of Smart Grid and Clean Energy*, 2014

- [10] D.O. Akinyele, R.K. Rayudu, "Review of energy storage technologies for sustainable power networks", *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 8 (2014) 74–91
- [11] R. Carnegie et al., "Utility Scale Energy Storage Systems- Benefits, Applications, and Technologies", State Utility Forecasting Group, 2013.
- [12] A. Oberhofer, "Energy Storage Technologies & Their Role in Renewable Integration", Global Energy Network Institute (GENI), 2012.
- [13] V.Mijailović, "Distribuirani izvori i sistemi za distribuciju električne energije", Akademska misao, Beograd, 2019.
- [14] W. Cole, A. Karmakar, "Cost Projections for Utility-Scale Battery Storage: 2023 Update", National Renewable Energy Laboratory, 2023.
- [15] D. Anggraini, "Reliability and Cost-Benefit Analysis of the Battery Energy Storage System", MSc thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2023.
- [16] H. Passell, W. McNamara, "Introduction to Energy Storage Benefit Cost Analysis", Sandia National Laboratories, 2022.
- [17] Case studies: Battery storage, IRENA, 2022.
- [18] C. Murray, "Li-ion BESS costs could fall 47% by 2030, NREL says in long-term forecast update", *Energy Storage News*, 2023
- [19] N. G. Chatzigeorgiou et al, "A review on battery energy storage systems: Applications, developments, and research trends of hybrid installations in the end-user sector", *Journal of Energy Storage*, Volume 86, Part A, 2024.
- [20] G. G. Njema et al, "A review on the recent advances in battery development and energy storage technologies", *Journal of renewable energy*, Wiley, May 2024.