

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I
BRODOGRADNJE**

**POSLIJEDIPLOMSKI DOKTORSKI STUDIJ
ELEKTROTEHNIKE I INFORMACIJSKE TEHNOLOGIJE**

KVALIFIKACIJSKI ISPIT

**TEHNOLOGIJE SPREMIŠTA ENERGIJE U
ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU**

Marin Mandić

Split, rujan 2021.

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. PRIMJENA SPREMIŠTA ENERGIJE U TRŽIŠNIM ELEKTROENERGETSKIM SUSTAVIMA	3
2.1. Reverzibilne hidroelektrane	3
2.2. Tehnologija komprimiranog zraka	17
2.3. Baterije	22
2.3.1. Litij-ionske baterije	22
2.3.2. Natrij-sumporne baterije	25
2.3.3. Olovne baterije	26
2.3.4. Protočne baterije.....	28
2.4. Supravodljivi sustav za pohranu magnetske energije.....	30
2.5. Superkondenzatori	31
2.6. Zamašnjak.....	33
3. USPOREDBA KARAKTERISTIKA SPREMIŠTA ENERGIJE.....	35
3.1. Osnovne karakteristike sustava	35
3.2. Primjene tehnologija za različite svrhe	38
3.2.1. Primarna regulacija frekvencije i radne snage	38
3.2.2. Sekundarna i tercijarna regulacija frekvencije i radne snage	38
3.2.3. Rotirajuća i nerotirajuća rezerva	38
3.2.4. Smanjenje vršnog opterećenja.....	38
3.2.5. Sezonsko spremanje energije	38
3.2.6. Naponske smetnje	39
3.2.7. Kvaliteta električne energije.....	39
ZAKLJUČAK.....	40
LITERATURA	41
POPIS OZNAKA I KRATICA	50
SAŽETAK.....	52

1. UVOD

Zbog činjenice da svjetsko stanovništvo neprestano raste, potreba za energijom postaje sve veća, a zbog prisutnog problema globalnog zatopljenja mnoge države su se obvezale smanjiti emisije stakleničkih plinova. U potrazi za prikladnim rješenjem, svijet se okreće proizvodnji iz obnovljivih izvora energije (OIE) od kojih su najzastupljeniji vjetar i sunce. Energija iz vjetra i sunca postaje sve zastupljenija u elektroenergetskom sustavu (EES-u) te njen udio sve više raste [1, 2].

Budući da su brzina vjetra i količina sunčeva zračenja teško predvidljivi, energija iz vjetroelektrana (VE) i fotonaponskih elektrana (FNE) je fluktuirajućeg karaktera pa se ovi izvori često nazivaju intermitirajući obnovljivi izvori energije (IOIE). Pojava veće količine takve energije u EES predstavlja tehnički i ekonomski izazov, ponajprije za operatora sustava, ali i za sve ostale sudionike u sustavu. Upravo se rješavanje problema varijabilnosti energije iz IOIE smatra glavnim izazovom prema uspostavi održivog, pouzdanijeg i sigurnijeg EES-a [1, 3].

Jedno od rješenja uspostavljanja stabilnijeg i pouzdanijeg EES-a zbog prisutnosti visokog udjela energije iz IOIE je korištenje spremišta energije. Spremišta energije se smatraju jednim od ključnih tehnologija za integraciju velikih količina proizvedene energije iz IOIE. Uloga samih spremišta u svrhu stabilizacije EES-a raste svakim danom. Sposobnost spremanja energije kad je prisutan višak energije u sustavu i naknadno korištenje te spremljene energije u slučaju nedostatka energije u sustavu predstavlja najveću korist spomenute tehnologije. Također, neke tehnologije spremišta mogu odgovoriti na određene zahtjeve u vremenskom intervalu ms, dok su nekima potrebne sekunde i minute. Pored toga, od nekih spremišta se traži skladištenje energije na duže vrijeme koje može biti mjesečno, sezonsko pa čak i godišnje. Pored svega nabrojanog, tehnologija spremišta ima brojne druge primjene u EES-u koje smanjuju neželjene posljedice fluktuirajuće energije [4, 5].

Pored prethodno spomenutog problema IOIE, sve veća važnost spremišta energije očituje se zbog promjena na tržištu električne energije. EES prolazi kroz velike promjene, s obzirom na sudionike i načine trgovanja na njemu, pretvarajući monopolni sustav u konkurentni. Pojava novih tehnologija te sve većeg broja tržišnih sudionika vodi prema uspostavi konkurentnog tržišta električne energije. Liberalizacija tržišta električne energije podrazumijeva prisutnost različitih usluga na tržištu, otvoreniji pristup mreži te tržišta gdje se mogu natjecati različiti sudionici (opskrbljivači, kupci, trgovci energijom, ...). Cilj je promijeniti sustav iz monopola u oligopol, povećati dostupnost energije, razviti nove („čistije“) izvore energije, poboljšati kvalitetu usluge i smanjiti troškove sustava. Za razliku od monopolnih struktura, u restrukturiranim tržištima sudionici (naročito opskrbljivači energijom) nastoje razviti optimalne strategije rada kako bi maksimizirali profit i u što većoj mjeri smanjili rizik od gubitka profita, dok je zadaća operatora sustava brinuti se o sigurnosti i pouzdanosti cijeloga sustava. Natjecanje među tržišnim sudionicima (posebno među opskrbljivačima) zahtjeva razvitak korisnih i učinkovitih metoda za optimiziranje strategije rada, koje će im omogućiti ostvarivanje željenog cilja. Međutim, različiti utjecaji kao što su ograničenja prijenosne mreže, neočekivani ispadi generatora i prijenosnih vodova, fluktuirajuća proizvodnja IOIE te ostala ograničenja proizvođača i tržišnih sudionika čine to natjecanje još izazovnijim i konkurentnijim [6, 7].

Sve tehnologije spremišta se razlikuju po svojim karakteristikama te ne postoji jedinstveno idealno rješenje. Naime, postoji više čimbenika (zahtjevi EES-a, karakteristike IOIE, količina energije iz IOIE, ...) koji utječu na izbor prikladne tehnologije spremišta u EES-u te je potrebna detaljna analiza pri samom izboru [1].

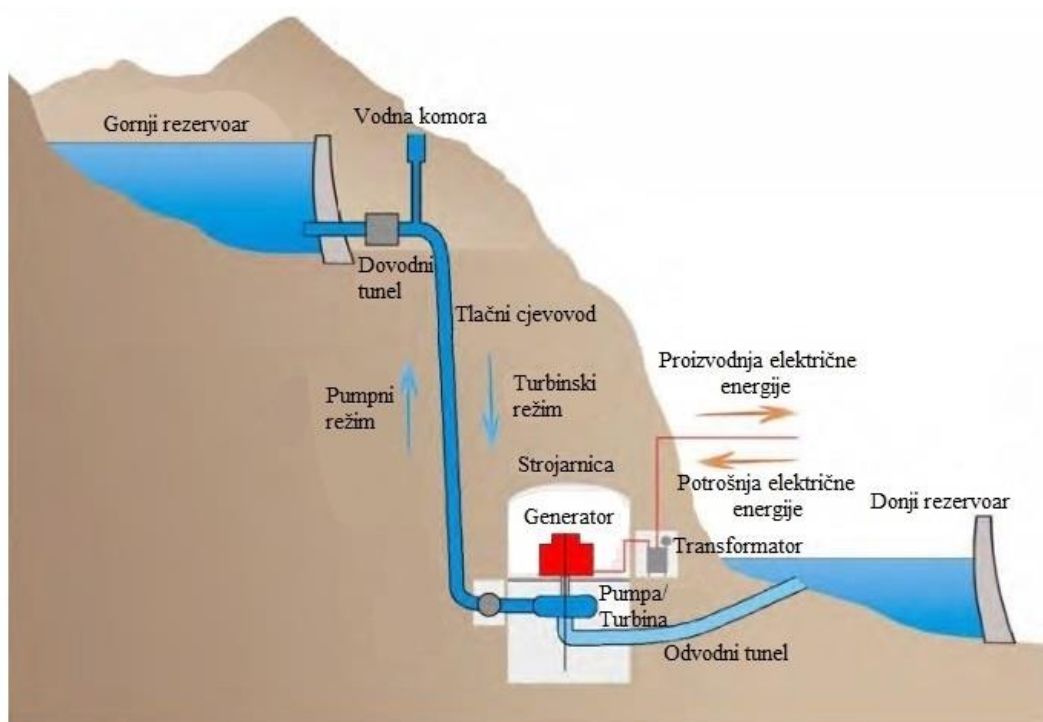
Ovaj rad se bavi tehnologijama spremišta energije s posebnim osvrtom na primjenu tih tehnologija u liberaliziranim elektroenergetskim sustavima te je u njemu dan prikaz i usporedba niza zajedničkih karakteristika.

U drugom poglavlju dan je pregled tehnologija, a svako potpoglavlje opisuje pojedinu tehnologiju s tehnološkog stajališta, njezine osnovne karakteristike te njezinu primjenu u EES-u i na tržištu električne energije. U trećem poglavlju su prikazane i uspoređene osnovne karakteristike spremišta te su dane osnovne usluge u kojima sudjeluju spremišta energije s odabirom najpogodnije tehnologije za pojedinu uslugu.

2. PRIMJENA SPREMIŠTA ENERGIJE U TRŽIŠNIM ELEKTROENERGETSKIM SUSTAVIMA

2.1. Reverzibilne hidroelektrane

Reverzibilne hidroelektrane (RHE) su postrojenja koja pripadaju tehnologiji za spremanje energije te se koriste u više svrha diljem svijeta [8]. Sa 158 GW snage čine 94% svjetske instalirane snage u spremištima i preko 96% svjetske spremljene energije dostupne za mrežne potrebe [9]. Slika 2.1 prikazuje shematski prikaz RHE s njezinim osnovnim dijelovima, a to su: gornji rezervoar, dovodni tunel, vodna komora, tlačni cjevovod, strojarnica, pumpa, turbina, odvodni tunel i donji rezervoar. Tehnologija RHE za turbinski (proizvodni) režim iskorištava potencijalnu energiju vode iz gornjeg rezervoara, dok u pumpnom režimu prebacuje vodu iz donjeg u gornji rezervoar koristeći električnu energiju iz mreže [10].



Slika 2.1. Prikaz dijelova reverzibilne hidroelektrane [11]

Postoje različite podjele RHE pa s obzirom na pritoke u gornji i donji rezervoar razlikuju se:

- RHE s pritocima u gornji i donji rezervoar (engl. *open loop system*),
- RHE s pritokom u gornji ili donji rezervoar (engl. *semi-open loop system*),
- RHE bez pritoka u oba rezervoara (engl. *closed loop system*) [8].

Prema instaliranoj snazi, RHE se dijele na:

- piko (za snage manje od 5 kW),
- mikro (za snage 5-10 kW),
- male (za snage 0,01-10 MW),
- velike (za snage veće od 10 MW) [12].

S obzirom na rad u pumpnom režimu razlikuju se:

- 1) strojevi s fiksnom brzinom pumpanja
- 2) strojevi s promjenjivom brzinom pumpanja
- 3) strojevi koji mogu raditi u hidrauličnom kratkom spoju (engl. *hydraulic short circuit* – HSC).

RHE imaju očekivani životni vijek 50-100 godina, koeficijent učinkovitosti (engl. *round-trip efficiency*) 75-85% te brz odziv na promjene (u rangu sekunda i minuta) [10, 13]. Tehnologija RHE je najveći (s obzirom na snagu) i tehnički najrazvijeniji oblik spremanja energije u cijelom svijetu te predstavlja efektivno i pouzdano rješenje za spremanje velike količine energije [14]. Također, korisnost ove tehnologije se ogleda u tome što je cijena električne energije u vršnom razdoblju opterećenja i do nekoliko puta veća nego u baznom opterećenju, stoga je moguće spremati tj. kupiti energiju za vrijeme niskih opterećenja (niska cijena energije) i koristiti (prodati) je za vrijeme visokih opterećenja (visoka cijena energije). RHE se uvelike koristi u regulaciji energije zbog toga što se njeno pokretanje i promjena načina rada mogu ostvariti u kratkom vremenu. Vrijeme pokretanja RHE je kratko (1-2 minute), a vrijeme potrebno za prelazak iz turbinskog u pumpni režim je reda veličine 5 minuta pa se zbog toga koristi u proizvodnji energije za vrijeme vršnih opterećenja te u regulaciji frekvencije [15]. RHE su pogodne za crni start, odnosno mogu se pokrenuti samostalno, neovisno o mreži, a također mogu sudjelovati u rotirajućoj i nerotirajućoj rezervi te u regulaciji napona. Pravilno korištenje RHE u EES-u može dovesti do smanjenja troškova rada sustava, a zbog svog velikog kapaciteta spremanja može utjecati na cijene električne energije, omogućiti bolju integraciju IOIE u EES te na taj način smanjiti emisije stakleničkih plinova [8, 16].

S ciljem ostvarivanja što veće zarade na tržištu električne energije, brojni autori su razvijali optimalne strategije rada RHE koja će im omogućiti maksimizaciju profita [17-28].

Autori su u članku [17] razvili algoritam koji daje optimalnu strategiju rada RHE na dan unaprijed tržištu (engl. *day ahead market* – DAM) i tržištu pomoćnih usluga (engl. *ancillary services market* - ASM). Predloženi model računa proizvedenu i spremljenu energiju te gornju kotu rezervoara te na osnovu tržišnih satnih cijena maksimizira zaradu. Algoritam je testiran na RHE te je pokazana korisnost algoritma u pronalaženju optimalnog dnevnog i tjednog rada RHE.

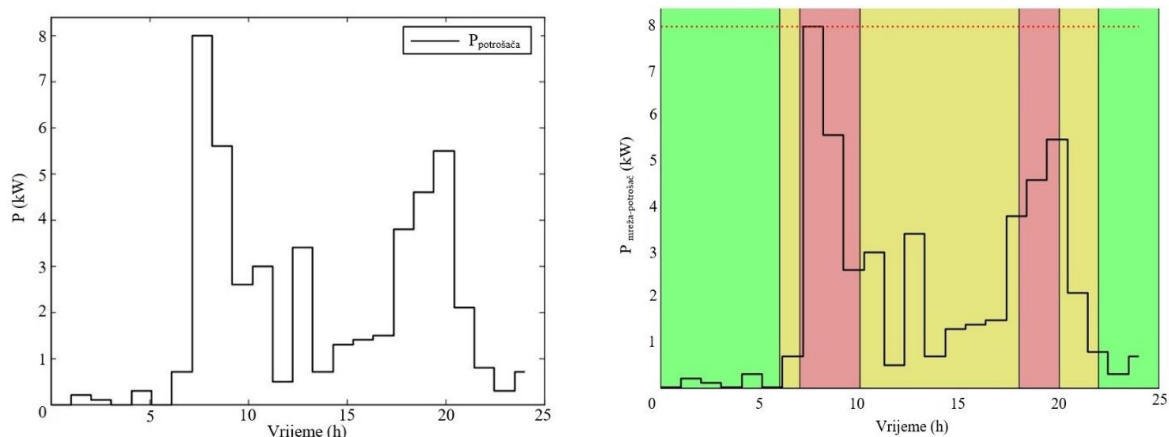
U [18] je dan matematički model koji maksimizira zaradu RHE optimizirajući strategiju rada na Južnoafričkom tržištu. Za razliku od prethodnog navedenog sustava [17] ovdje se promatrani sustav, osim RHE i mreže, sastoji i od potrošača te je cilj modela minimizirati preuzetu energiju iz mreže i maksimizirati prihod od prodaje energije u mrežu. Istraživala su se dva slučaja:

- 1) samo s električnom mrežom kao izvorom energije,
- 2) kombinirani rad mreže i RHE.

Rezultati istraživanja pokazuju da je korištenjem RHE moguće smanjiti trošak preuzet iz mreže te da promatrani sustav može i zaraditi kad se energija prodaje u mrežu po većoj cijeni nego kad je kupljena, odnosno kad se radi energetska arbitraža (engl. *energy arbitrage*). Slike 2.2-2.4 pokazuju koordiniran rad RHE i električne mreže u opskrbi potrošača energijom u usporedbi samo s mrežom. Dan je podijeljen u nekoliko vremenskih perioda:

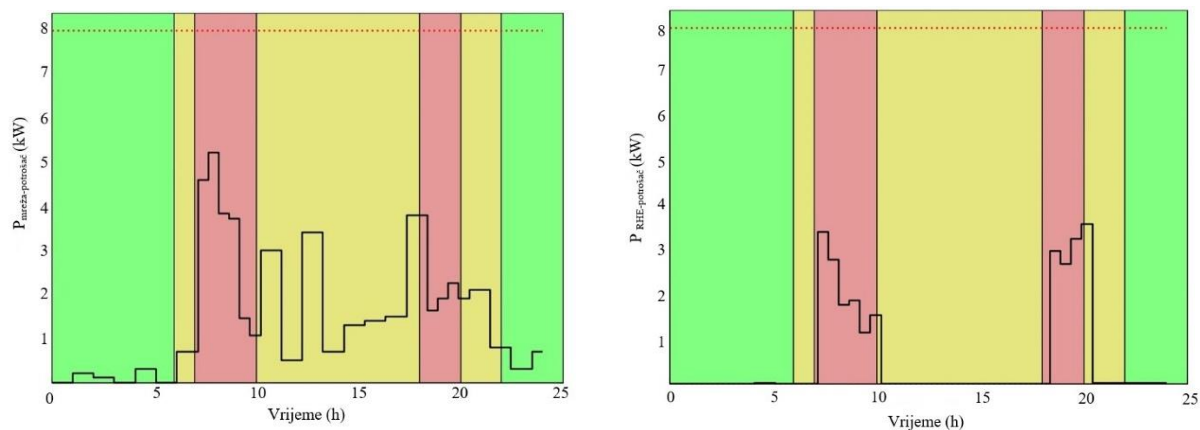
- period niskih cijena i opterećenja (zelena boja),
- period srednjih cijena i opterećenja (žuta boja),
- period visokih cijena i opterećenja (crvena boja).

Slika 2.2 prikazuje dnevni zahtjev potrošača i angažiranu snagu iz mreže u slučaju 1). Vidi se da mreža daje svu energiju koju zahtjeva potrošač.

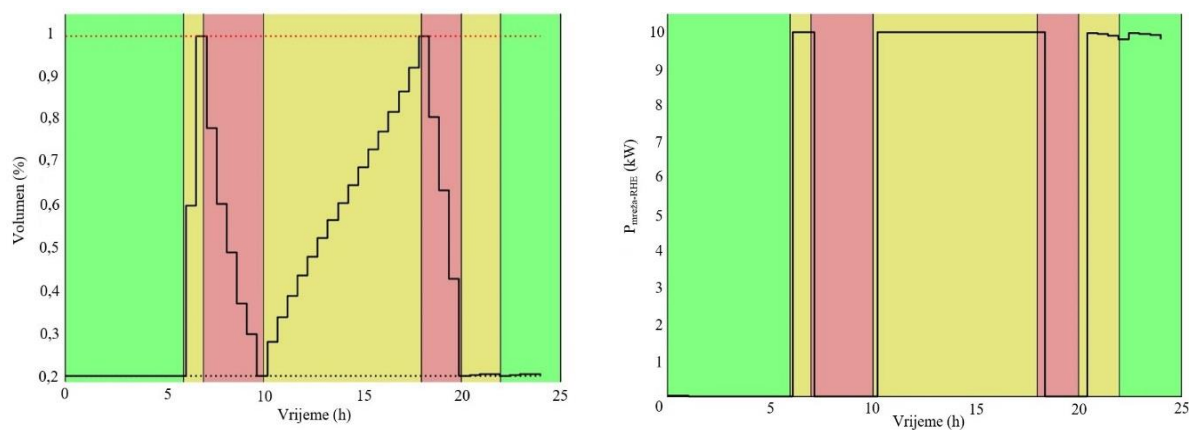


Slika 2.2. Zahtjev potrošača (a) i angažirana snaga iz mreže (b) u slučaju 1)

Slike 2.3 i 2.4 prikazuju koordiniran rad RHE i mreže. Sa slika se može vidjeti da RHE pumpa vodu u gornji rezervoar u vrijeme niskih cijena i opterećenja da bi tu spremljenu vodu mogla koristiti kasnije u vremenu visokih cijena i opterećenja.



Slika 2.3. Angažirana snaga iz mreže (a) prema potrošaču i snaga iz RHE prema potrošaču (b) u slučaju 2)



Slika 2.4. Volumen rezervoara RHE (a) i angažirana snaga iz mreže prema RHE (b) u slučaju 2)

Autori su u [19] i [20] slično kao u [18] promatrali utjecaj RHE na DAM tržištu, ali su modeli u [19] i [20] riješeni dinamičkim programiranjem. Pokazali su da prisutnost RHE ima samo pozitivne učinke na promatrane parametre pa je tako u [19] ostvarena približno dvostruka financijska dobit kad se RHE uzela u obzir u postojeći hidrološki sustav, dok je u [20] pokazano da RHE može smanjiti rizik u fluktuaciji cijena.

U [21] i [22] promatrao se kaskadni sustav hidroelektrana (HE) zajedno s RHE. U [21] uspoređivana je godišnja dobit istog kaskadnog sustava akumulacijskih HE s i bez mogućnosti reverzibilnog rada na DAM u Turskoj (Coruh Basin). Analiza se provela kroz nekoliko scenarija i razvijen je model koji daje optimalnu strategiju promatranog sustava akumulacijskih HE s mogućnošću rada u reverzibilnom režimu, nastalog od već postojećeg sustava kaskadnih akumulacijskih HE. Autori su zaključili da kaskadni sustav akumulacijskih HE u reverzibilnom radu donosi dodatni prihod (u promatranom slučaju 12 milijuna €/godini), za razliku od sustava bez mogućnosti reverzibilnog rada. U jednom od scenarija gdje su se varirale tržišne cijene, zarada od reverzibilnog rada je bila veća za 14,2 milijuna € od sustava bez mogućnosti reverzibilnog rada.

U [22] autori su razvili kombinirano cjelobrojni nelinearni model (engl. *Mixed integer non-linear programming* – MINLP) koji također maksimizira dobit kaskadnog sustava HE i RHE, ali su autori u ovom članku promatrali DAM i ASM, za razliku od [21] gdje se promatralo samo DAM. Funkcija cilja se sastoji od zarade na DAM, zarade od usluge sekundarne regulacije prema gore i dolje te rotirajuće rezerve, ali u obzir se uzimaju i troškovi pokretanja te rada i održavanja. Model se pokazao koristan u svojoj primjeni.

S obzirom da postoje različite izvedbe RHE sa stajališta hidrauličnih i električnih pogonskih strojeva (pumpa-turbina, motor-generator), autori su u člancima [29-41] istraživali prednosti i nedostatke u radu različitih izvedbi, koncentrirajući se na njihovo sudjelovanje na tržištu električne energije pa su stoga autori u [29] razvili model koji daje optimalnu strategiju rada, odnosno maksimizira zaradu RHE na Austrijsko-Njemačkom DAM i ASM. Uzete su u obzir razne izvedbe strojeva pumpa-turbina s fiksnom i promjenjivom brzinom te je istražen njihov rad s tehnološkog i ekonomskog stajališta. Funkcija cilja maksimizira dobit na način da određuje najbolju strategiju rada RHE na dva različita tržišta. Dobiveni rezultati pokazuju da je u većini slučajeva dobit od ASM veća od dobiti na DAM. Zbog činjenice da ASM generira veći dio zarade od DAM, autori su zaključili da je parametar koji najviše utječe na zaradu radno područje strojeva. One izvedbe strojeva koje zbog svojih tehničkih sposobnosti ne mogu sudjelovati na ASM zarađuju vrlo malo jer naknada za korištenje mreže kompenzira gotovo cijelu zaradu s DAM. Međutim, budući da autori nisu uzimali u obzir troškove investicije, rada i održavanja, naglašavaju da najveća zarada ne mora značiti najveću profitabilnost.

Slično istraživanje proveli su Chazarra, Pérez-Díaz i García-González u [30], gdje su također uspoređivali prihod RHE s promjenjivom i fiksnom brzinom pumpanja na DAM i tržištu sekundarne regulacije (engl. *secondary reserve market* – SRM), ali u okviru Španjolskog EES-a. Kombinirano cjelobrojni linearni model (engl. *Mixed integer linear programming* – MILP) uzima u obzir satne cijene te nastoji maksimizirati dobit na DAM te od sekundarne regulacije prema dolje i gore (SRM). Dobiveni rezultati su pokazali na mogućnost povećanja prihoda između 25,27% i 30,97% u slučaju korištenja promjenjive za razliku od fiksne brzine. Naime, i u ovom radu kao i u [29] pokazano je da je SRM glavni izvor zarade.

Isti autori su u [31], proširili istraživanje iz [30] tako što su istraživali RHE u DAM i SRM bez pritoka u rezervoare u okviru Pirinejskog i Španjolskog EES-a. Razlika u odnosu na [30] je u tome što je u [31] uzeta u obzir nesigurnost u predviđanju cijena na DAM i SRM te je istraživana razlika prihoda pumpe s:

- fiksnom brzinom (sinkroni stroj),
- fiksnom brzinom i frekvencijskim pretvaračem (sinkroni stroj s pretvaračem),
- pumpom kao asinkronim strojem (asinkroni stroj).

Pokazali su da je razlika u prihodu između pumpe s fiksnom brzinom i pumpe s promjenjivom brzinom (pumpa sa frekvencijskim pretvaračem i asinkrona pumpa) 12,2% u korist promjenjive brzine kada sudjeluju samo na DAM te 163% ako sudjeluju na DAM i SRM. Također, asinkrona pumpa ima veći prihod od izvedbe pumpe s fiksnom brzinom i pretvaračem.

U [32] autori su predstavili model koji, također kao i prethodno navedeni radovi [29-31] maksimizira profit RHE na DAM i SRM. Postavili su nekoliko slučajeva kada RHE sudjeluje na tržištu te ispitivali najveću dobit:

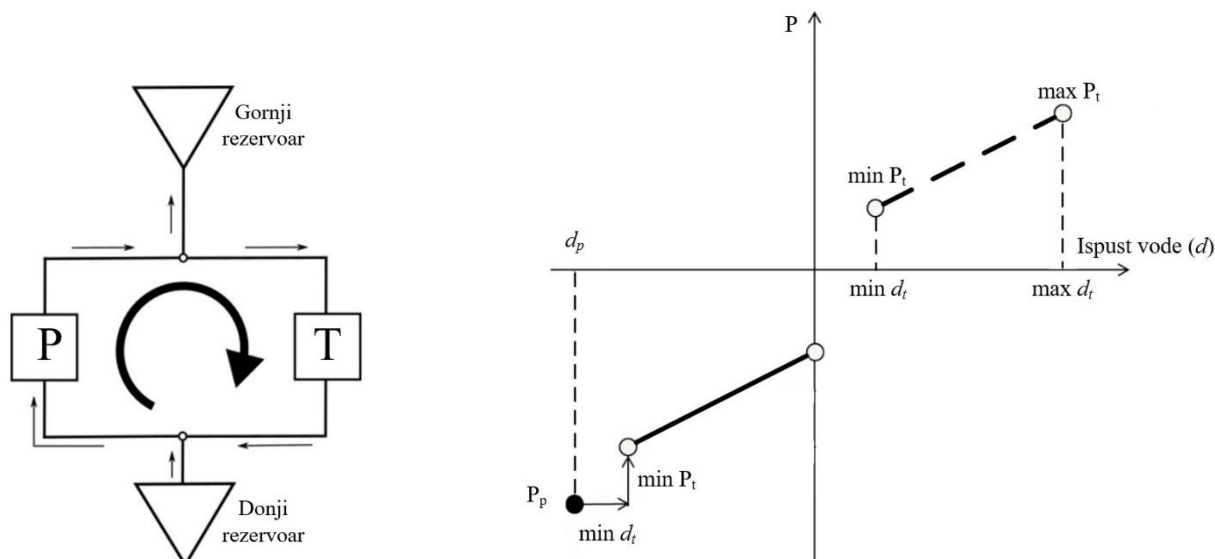
- 1) RHE sudjeluje samo na DAM,
- 2) RHE sudjeluje na oba tržišta (DAM i SRM) ali s fiksnom brzinom vrtnje pumpe,
- 3) RHE sudjeluje na oba tržišta, ali s promjenjivom brzinom vrtnje pumpe.

Autori su koristili cijene preuzete s MIBEL (engl. *Iberian electricity market*) za DAM tržište, a za SRM su korištene cijene s Portugalskog tržišta električne energije. U promatranom vremenu od tjedan dana, najveći profit se pojavio u 3. slučaju, odnosno kada RHE sudjeluje na oba tržišta i to s promjenjivom brzinom vrtnje, jer u tom slučaju može i u pumpnom režimu sudjelovati na SRM.

Chazarra, Pérez-Díaz i García-González, koji su u [30, 31] istraživali razliku između RHE s fiksnom i promjenjivom brzinom pumpe na tržištu, u ovom radu su otišli malo dalje pa su u [33] pored fiksne brzine u obzir uzeli i rad u HSC. Razvili su MILP model koji maksimizira prihod RHE koja sudjeluje na DAM i SRM u okviru Španjolskog EES-a. U obzir su uzeli tri različite izvedbe strojeva:

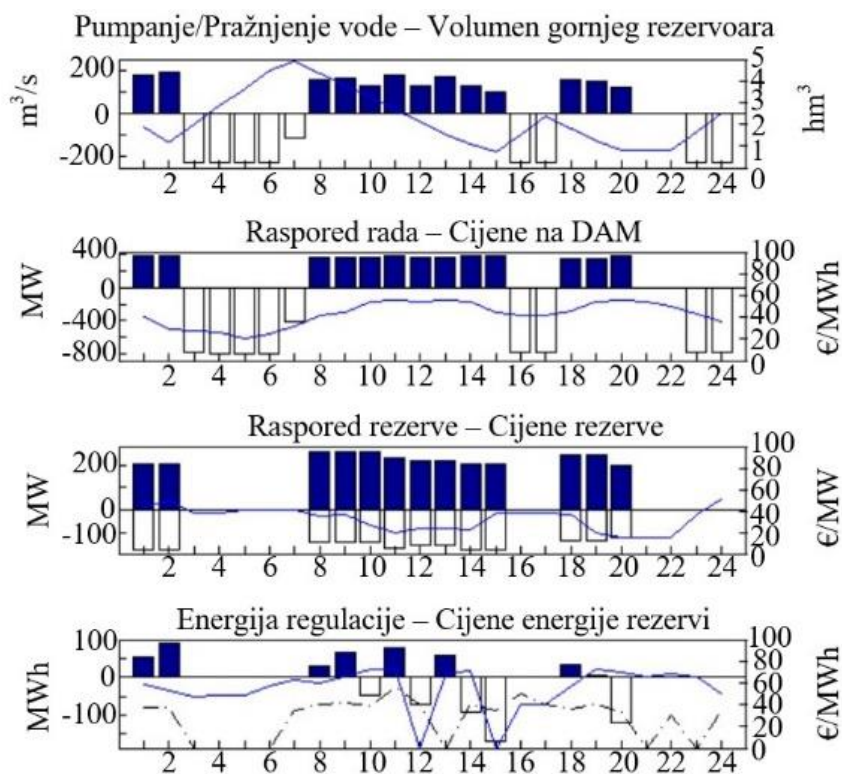
- 1) RHE s fiksnom brzinom pumpanja,
- 2) RHE s dvodijelnom izvedbom stroja (engl. *binary unit* - BU) koja radi u HSC,
- 3) RHE s trodijelnom izvedbom stroja (engl. *terniary unit* – TU) koja također radi u HSC.

Princip rada HSC je prikazan na slici 2.5 a), dok je njegova radna karakteristika za trodijelnu izvedbu prikazana na slici 2.5 b). Naime, kada stroj radi u HSC, tada istovremeno pumpa i ispušta vodu, odnosno istovremeno je aktivna pumpa i turbina. Isprekidana linija na slici 2.5 b) prikazuje turbinski režim, crna točka predstavlja pumpni režim (fiksna brzina), dok puna linija predstavlja rad u HSC. Naime, glavna prednost rada u HSC je da RHE tada može regulirati snagu u pumpnom režimu i na taj način sudjelovati na tržištu regulacije energije. RHE se tada može smatrati upravljivim potrošačem, doprinoseći na taj način boljoj integraciji IOIE za razliku od RHE s fiksnom brzinom pumpanja.

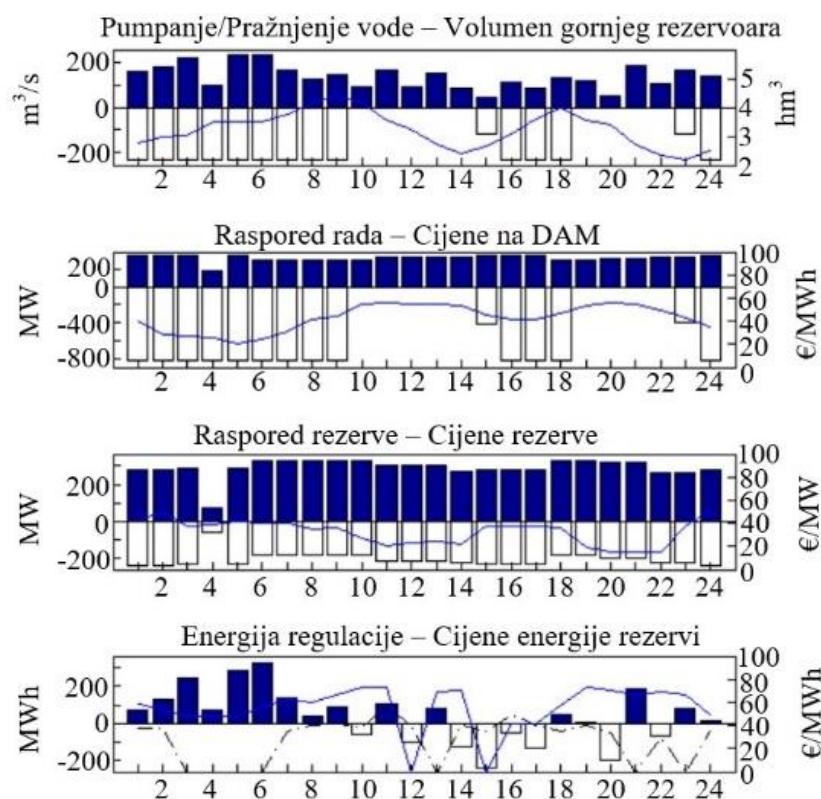


Slika 2.5. Princip rada HSC (a) i radna karakteristika TU u HSC radu (b)

Slike 2.6 i 2.7 prikazuju rad RHE s fiksnom brzinom pumpanja i RHE s TU na DAM i SRM. Pokazalo se da sve izvedbe RHE zarađuju većinom na SRM zbog toga što su na tom tržištu cijene veće od DAM cijena. Također, RHE koja radi u HSC može povećati svoju dobit za 162,3% u usporedbi s onom koja ne radi u HSC, odnosno što je RHE fleksibilnija u radu, prihod sa SRM je veći pa je stoga i ukupni prihod veći.



Slika 2.6. Rad klasične RHE



Slika 2.7. Rad trodijelne izvedbe stroja

Chazarra, Pérez-Díaz i García-González su u [34] analizirali ekonomsku održivost RHE koja nema pritoke u rezervoare te rad u HSC, sudjelujući na DAM i SRM u okviru Španjolskog EES-a. Model za procjenu maksimalnog prihoda s obzirom na cijene s tržišta temelji se na njihovom modelu razvijenom u [33]. S obzirom na rad u HSC, dobilo se vrijeme povrata ulaganja s obzirom na investicijske troškove. Rezultati pokazuju da je vrijeme povrata ulaganja novca bez obzira na rad HSC (s i bez njega) značajno manje od očekivanog životnog vijeka RHE te da se vrijeme povrata može dodatno smanjiti uključenjem radnje HSC.

Isti ti autori su u [35] predstavili novu metodu koja maksimizira prihod RHE bez pritoka u rezervoare, sudjelujući na DAM i na SRM u okviru Pirinejskog EES-a. Uspoređivane su dvije metodologije koje se razlikuju po tome što za optimizaciju promatranog dana uzimaju različit period budućeg promatranja. Pokazali su da predložena metoda povećava prihod u svim slučajevima kada RHE sudjeluju na DAM i SRM te da povećanje prihoda uvelike ovisi o veličini postrojenja. U konkretnom slučaju to povećanje iznosi između 455 i 9645 €/MW instalirane snage ako RHE samo sudjeluje na DAM i između 519 i 10388 €/MW ako RHE sudjeluje i u SRM.

Chazarra i dr. su u [36] analizirali ekonomsku održivost 12 RHE s obzirom na strojeve s fiksnom brzinom, promjenjivom brzinom te na HSC, a koje sudjeluju na DAM i SRM u okviru Pirinejskog EES-a. Cilj ovoga rada nije bio pružiti optimizacijski model za rad RHE nego procijeniti njihovu ekonomsku održivost. Došlo se do sličnih rezultata kao u [34], odnosno da ekonomska održivost nije ugrožena ako postrojenja sudjeluju na SRM bez obzira rade li ili ne rade s promjenjivom brzinom ili u HSC. Međutim, vrijeme povrata ulaganja se može smanjiti ako RHE radi s promjenjivom brzinom i/ili radi u HSC, odnosno takva postrojenja će imati najkraće vrijeme povrata.

U [37] autori su usporedili prihod RHE koja radi s fiksnom brzinom pumpanja i u HSC na DAM tržištu i SRM, uzimajući u obzir prihod zarađen na promatranim tržištima i troškove pumpanja te pokretanja postrojenja. MILP model optimizira strategiju rada te maksimizira

profit s obzirom na rad RHE s fiksnom brzinom pumpanja i na rad u HSC. Autori su zaključili da bez obzira radi li RHE s fiksnom brzinom ili u HSC, ona ostvaruje profit, ali da se zbog svoje fleksibilnosti u radu značajno veći profit ostvaruje u slučaju rada u HSC.

U većini EES-a termoelektrane (TE) pokrivaju glavni dio opterećenja i rade nazivnom snagom te se teško prilagođavaju promjenama u zahtjevu energije, a zbog svoje tromosti posebno nisu pogodni u pokrivanju vršnih opterećenja. Budući da RHE imaju brz odziv na promjene, upravo su one jedna od pogodnijih tehnologija za regulaciju sustava i pokrivanje vršnih opterećenja [42]. U [42-44] opisan je rad RHE u sustavu s TE u kojima je cilj RHE smanjiti trošak sustava te su stoga u [43] autori predstavili unutar-dnevni MILP model koji računa minimalni trošak proizvodnje hidro-termalnih postrojenja. Glavni uvjet je da je zadovoljena potrošnja potrošača, a ostali uvjeti su ograničenja na postrojenja (minimalna i maksimalna snaga, troškovi pokretanja itd.) Model koristi 15-minutne tržišne cijene za kupovinu ili prodaju energije na tržištu, u vremenskom intervalu od 2 dana. U [42] autori su dali algoritam za jednodnevnu optimizaciju gubitaka sustava koji se sastoji od TE i RHE. EES se sastoji od 12 sabirnica, 5 TE, jedne RHE, 25 prijenosnih vodova i 7 potrošača. Napravljena su 2 slučaja:

- 1) samo s TE,
- 2) s TE i RHE.

Troškovi goriva TE su minimizirani u oba slučaja. Također su se u oba slučaja računali tokovi energija. Cilj je bio dobiti proizvedenu energiju svakog agregata, a da se zadovolje svi uvjeti i ograničenja. Dobiveni su sljedeći rezultati za konkretan primjer. Prvi slučaj pokazuje 124246,6 \$ troškova goriva i 157,2 MW gubitaka na prijenosnim vodovima. U drugom slučaju (s RHE), gubici snage su bili 178,2 MW, dok je trošak goriva iznosio 123685,9 \$ odnosno, uštedilo se 560,7 \$.

Ključni problem kod IOIE je kontrola promjenjivosti njihove proizvodnje. Akumulacijske HE i RHE preuzimaju veliki dio u regulaciji energije zbog svoje tehnološke sposobnosti i brzine te zbog povoljnih ekoloških utjecaja na okoliš. Naime, ta postrojenja postaju sve značajnija u smislu regulacije energije u hibridnim sustavima (sustavi spremišta energije i IOIE). Istraživanja su pokazala da zajednički rad hidroelektrana (posebno RHE) i IOIE postaje sve učestaliji zbog dobrih karakteristika takvih sustava. S obzirom na tržište električne energije, HE imaju ključnu ulogu u pomoćnim uslugama pa doprinos pomoćnih usluga u integraciji IOIE postaje važna tema [45].

Budući da su se RHE s promjenjivom brzinom vrtnje u pumpnom režimu pokazale efikasnije od RHE s fiksnom brzinom s gledišta pomoćnih usluga autori su u [45, 46] prikazali rad RHE s fiksnom brzinom vrtnje i s promjenjivom brzinom vrtnje uz vjetar kao IOIE. U [46] uspoređivana je zarada RHE s fiksnom brzinom vrtnje u pumpnom režimu, promjenjivom brzinom vrtnje te s TU izvedbom koja radi u HSC. RHE sudjeluje na DAM te na SRM s i bez prisutnosti vjetroenergije. Studija je rađena u ljeto i zimu zbog razlika u opterećenju sustava i razini energije iz vjetra. Rezultati pokazuju da bez obzira na postojanje energije iz vjetra, RHE s promjenjivom brzinom i RHE s TU izvedbom imaju veći prihod od RHE s fiksnom brzinom te da te dvije izvedbe više sudjeluju na oba tržišta za razliku od RHE s fiksnom brzinom. Također, rad u HSC nudi više prednosti nego izvedba s promjenjivom brzinom.

U [47] prikazan je dnevni rad RHE koja sudjeluje u pokrivanju vršnih opterećenja sustava koji se sastoji od TE, VE i RHE s glavnim uvjetom da zahtjev potrošača bude zadovoljen. Funkcija cilja je minimizacija troškova rada TE (troškovi goriva, pokretanja). Uspoređena su tri slučaja:

- 1) zadovoljenje potrošnje samo s TE,
- 2) zadovoljenje potrošnje s TE i VE,
- 3) zadovoljenje potrošnje s TE, VE i RHE.

Pokazalo se dobrim rješenjem korištenje RHE u svrhu spremanja energije zbog toga što RHE kompenzira proizvodnju iz TE za vrijeme vršnog opterećenja pa na taj način smanjuje troškove rada cijelog sustava.

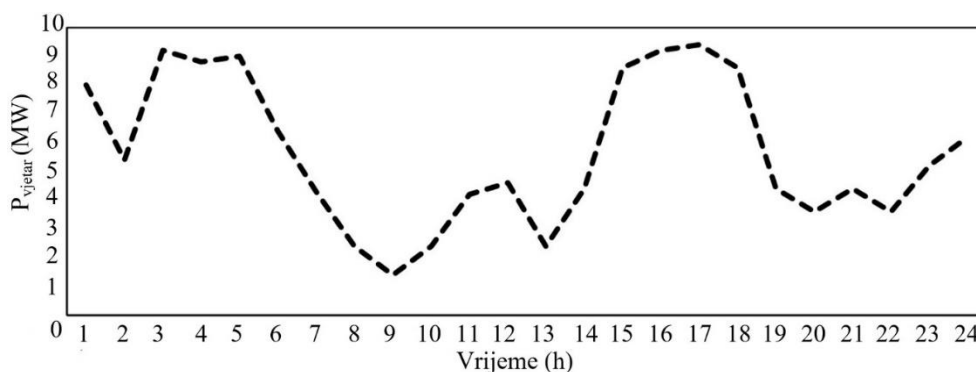
Također, u [48] je rađena minimizacija troškova rada sustava koji se sastoji od TE, VE i RHE, odnosno posebno se ispitivalo uključanje RHE u otočni sustav koji ima dostupnu znatnu količinu energije iz vjetra. Pokazalo se da uključanje RHE u promatrani sustav može biti korisno jer omogućuje veću iskoristivost i apsorpciju energije iz vjetra, poboljšavajući dinamičku sigurnost i ekonomični rad cijelog sustava.

Uz prethodno spomenute članke u kojima su autori minimizirali troškove promatranog sustava gdje je jedan od izvora energije bio vjetar, autori su [49-58] istraživali utjecaj RHE također s vjetrom kao IOIE, ali sa stajališta maksimizacije profita promatranog sustava uzimajući u obzir pogreške u prognozi vjetra (što rezultira pogreškom u pretpostavljenoj proizvodnji energije iz vjetra). U [49] optimizirana je dnevna strategija rada hibridnog postrojenja koji se sastoji od VE i RHE u vlasništvu neovisnog proizvođača energije koji sudjeluje na DAM. Funkcija cilja je maksimizacija profita od prodaje električne energije iz hibridnog postrojenja, uzimajući u obzir troškove rada RHE u pumpnom i turbinskom režimu, troškove zbog neiskorištene energije iz vjetra (engl. *dump power*) te prihod od održavanja minimalno zadane snage sustava (kazna zbog proizvodnje ispod minimalno zadane granice proizvodnje). Rezultati pokazuju da je u periodima niskih cijena na DAM tržištu prodana energija vrlo mala u usporedbi s periodima kad su cijene visoke. Također, tijekom perioda niskih cijena, veći dio energije iz VE se koristio za pumpanje vode u gornji rezervoar da bi se kasnije ta pumpana energija mogla iskoristiti u periodima visokih cijena.

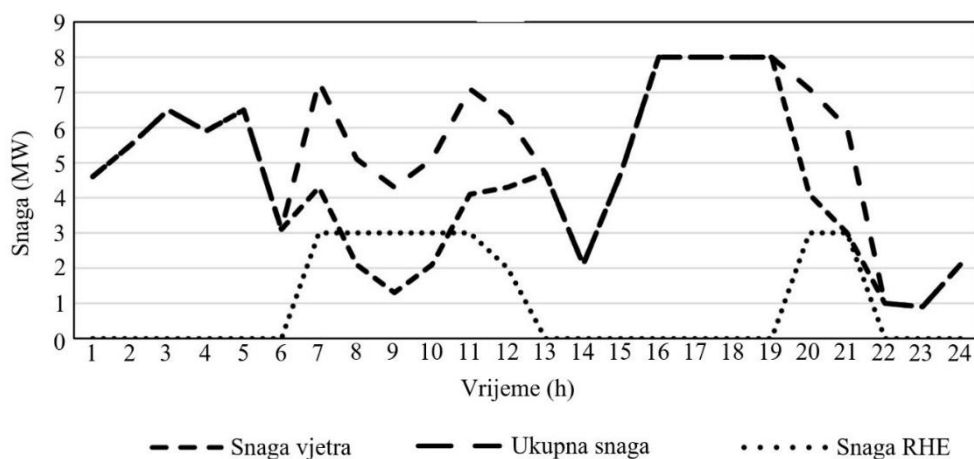
Sličan problem autori su istraživali u [50], odnosno ispitivali su može li RHE doprinijeti boljem iskorištavanju energije iz vjetra. Naime, rađene su dvije optimizacije:

- 1) dnevna optimizacija samo VE,
- 2) dnevna optimizacija VE i RHE.

U oba slučaja cilj je bio maksimizacija profita sustava. Funkcija cilja uzimala je u obzir profit od proizvedene energije iz VE i RHE te gubitak profita zbog pumpane energije i troškova (penala) nastalih zbog proizvodnje energije ispod minimalno dogovorene granice (3 MW). Slika 2.8 prikazuje dostupnu satnu snagu VE dok se na slici 2.9 može vidjeti proizvedena energija samo iz VE (slučaj 1), proizvedena energija samo iz RHE te ukupno proizvedena energija iz VE i RHE (slučaj 2).

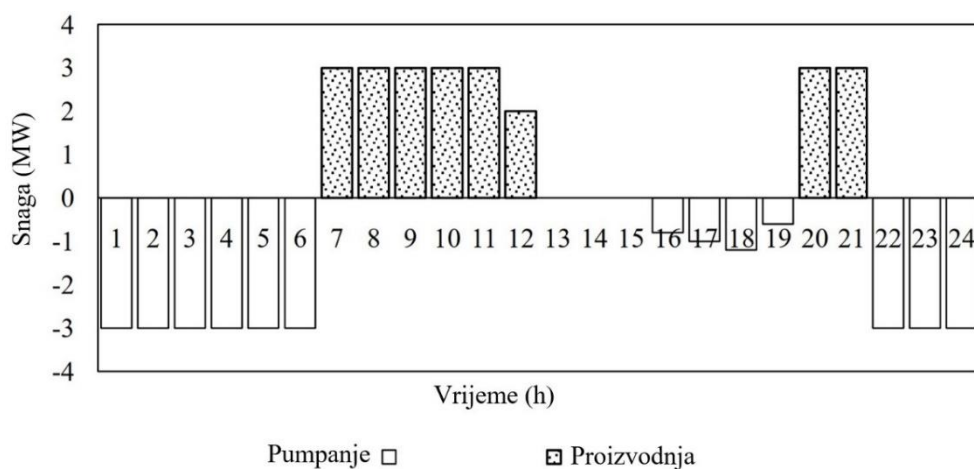


Slika 2.8. Dostupna snaga iz vjetra

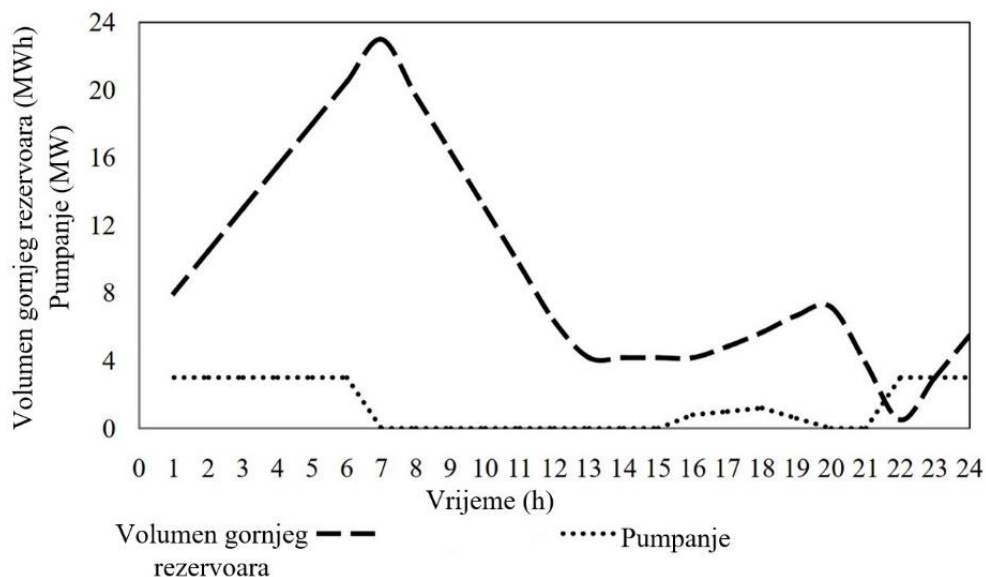


Slika 2.9. Pojedinačni rad VE, RHE te ukupna energija

Jasno se može vidjeti da su u prvom slučaju veći ukupni penali jer VE češće daje snagu ispod 3 MW (period 7-10 h, oko 14 h te 21-24 h) za razliku od drugog slučaja kada je ukupna snaga samo u periodima oko 14 h i 22-24 h ispod 3 MW. Sa slika 2.10 i 2.11 može se vidjeti režim rada RHE te spremljena energija u gornjem rezervoaru RHE i snaga pumpe. Jasno se vidi da se pumpa voda iz donjeg u gornji rezervoar u periodima kada je dostupna velika količina vjetroenergije dok u periodima male količine energije iz vjetra RHE upotpunjuje proizvodnju iz VE. Također, trošak penala je veći u slučaju bez RHE što dovodi do manjeg profita.



Slika 2.10. Režimi rada RHE



Slika 2.11. Volumen gornjeg rezervoara i snaga pumpe

Integracija vjetroenergije na tržištu električne energije zahtijeva određenu prognozu, odnosno predviđanje proizvodnje energije iz VE. Budući da je to prognozirana (predviđena) energija, moguće su razlike i pogreške u toj procjeni koje mogu dovesti do troškova (penala) zbog neisporučene energije. Zbog toga je u [51] predstavljen zajednički rad VE i RHE u svrhu smanjenja tih troškova, odnosno ispitano je može li rad RHE ublažiti troškove nastale zbog pogreške u procjeni proizvedene energije iz vjetra. Da bi se optimizirao zajednički rad, modelirana je nesigurnost u prognozi proizvodnje energije iz vjetra. Procjena nesigurnosti je uključena u optimizacijski proračun te su rezultati pokazali da RHE prilagođava svoju proizvodnju na način da se smanje troškovi nastali zbog pogreške u prognozi, odnosno dobivena ekonomska dobit opravdava kombinirani rad VE i RHE.

U [52] Al-Swaiti, Al-Awami i Khalid daju strategiju rada sustava koji se sastoji od VE, TE i RHE koji trguju u DAM i SRM. Strategija je modelirana kao Mixed Integer Linear Stochastic Programming (MILSP) koja uzima u obzir nekoliko parametara nesigurnosti, kao što su proizvodnja energije iz vjetra, tržišne cijene, energija regulacije. Funkcija cilja maksimizira profit cijelog sustava održavajući ukupni rizik na prihvatljivoj razini. Rezultati pokazuju da koordinirani i zajednički optimiziran rad VE, TE i RHE značajno poboljšava ukupni profit te smanjuje rizik.

U [53] Cerejo i dr. opisuju sličan problem nastao zbog pogreške u procjeni proizvodnje energije iz vjetra, odnosno, rješavaju dnevni optimizacijski problem proizvodnje hidroenergije za kaskadu od tri rezervoara, u kojoj jedna od HE ima reverzibilni rad, a uzimajući u obzir prognozu vjetroenergije i cijena na DAM. Analizirana je različita zarada koja proizlazi iz nesigurnosti od predviđanja proizvodnje energije iz vjetra. Pokazalo se da će hidrosustav zarađivati u vremenu kad se pojavi višak energije iz vjetra zbog toga što će tada RHE tu energiju koristiti za pumpanje vode iz donje u gornje jezero. Sustav će biti u gubitku kada mora nadoknaditi deficit energije iz vjetra, odnosno kada pretpostavljena energija iz vjetra bude veća od stvarne.

Slična tematika razrađena je i u [54], gdje se istraživao sustav od VE, TE, kaskadnog sustava HE i RHE te je cilj bio minimizirati trošak rada cijelog sustava uz predviđanje greške zbog vjetra. Zaključilo se da prisutnost RHE u promatranom sustavu značajno smanjuje negativni efekt predviđanja proizvodnje energije iz vjetra.

Također u [55], cilj autora je bio prikazati rad RHE i VE uz uvjet minimizacije fluktuacije izlazne energije da se spriječi diskontinuitet i nestabilnost proizvodnje prouzrokovane od vjetra te maksimizira proizvodnja cijeloga sustava. Naime, sustav radi tako da se zahtjev za električnom energijom prvo zadovolji iz vjetra, a ako energija vjetra nije dovoljna onda RHE kompenzira tu energiju. Kada postoji viška energije iz vjetra, onda se taj višak koristi za pumpanje. Simulacije pokazuju da tijekom kišne sezone hibridni sustav ima manje fluktuacije energije za razliku od sušne sezone. Zaključak je da prisutnost RHE može povećati iskorištenje energije vjetra bez ugrožavanja pouzdanosti sustava zbog toga što hidroenergija igra važnu ulogu u cjelokupnom hibridnom sustavu.

Članci u kojima se autori bave hibridnim modelima spremišta RHE i FNE kao IOIE su [59-65]. U [59] uspoređivala su se tri različita sustava:

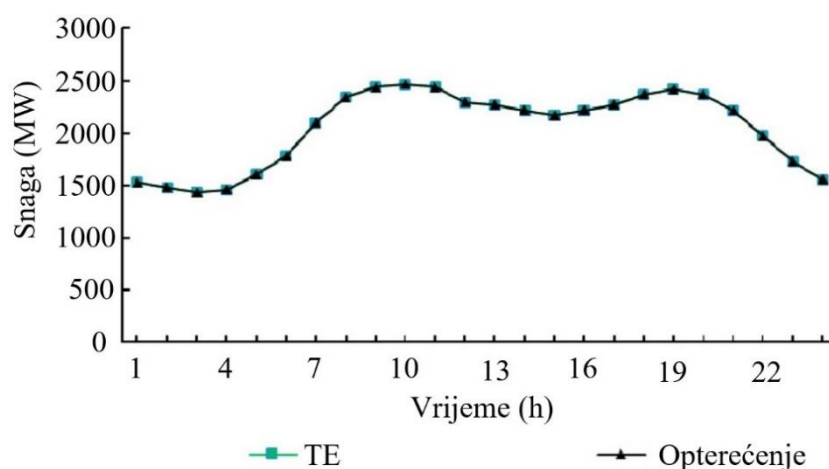
- 1) sustav koji se sastoji od samostalne plutajuće FNE,
- 2) sustav koji se sastoji od samostalne RHE,
- 3) sustav koji se sastoji od FNE i RHE zajedno.

Procjenjivao se potencijal cjelokupnog (integriranog) sustava u proizvodnji električne energije te očuvanju vode. Funkcija cilja je istovremena maksimizacija proizvedene električne energije i minimizacija neuravnotežene energije. Metodologija se primijenila na sustav koji se sastoji od FNE sa snagom od 2 GW i RHE sa snagom od 1 GW. Pokazalo se da kombinirani sustav ima veliku mogućnost proizvodnje električne energije bez negativnih utjecaja na pouzdanost mreže. Nadalje, korištenje plutajuće FNE može istovremeno doprinijeti na uštedi prostornog zemljišta (ušteda prostora), očuvanju vodnih resursa zbog isparavanja te većoj proizvodnji električne energije zbog prirodnog hlađenja čelija.

U [60] je predstavljen dnevni MILP model za optimizaciju rada hibridnog sustava FNE i RHE s TE, uzimajući u obzir troškove goriva, troškove pokretanja te trošak zbog nemogućnosti davanja pune snage iz FNE. Uspoređivala su se tri slučaja:

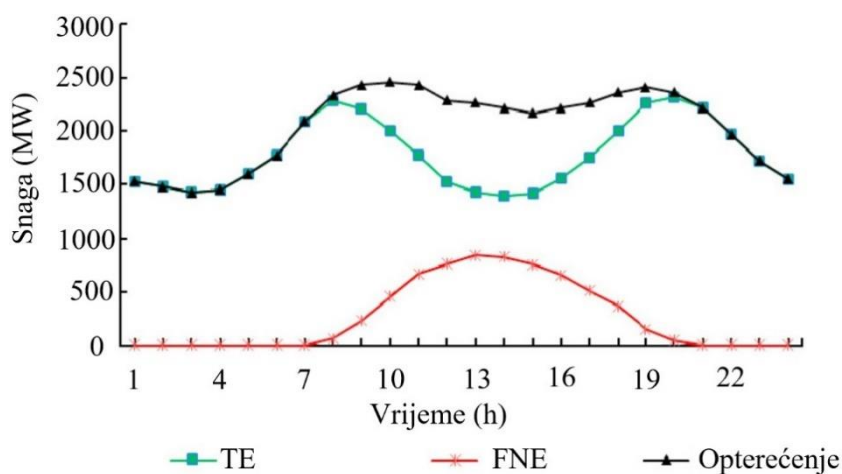
- 1) sustav se sastoji samo od TE,
- 2) sustav se sastoji od TE i FNE,
- 3) sustav se sastoji od TE, FNE i RHE.

U drugom i trećem slučaju promatrao se još utjecaj instalirane snage RHE i različit udio energije iz FNE. Sa slike 2.12 vidljivo je da TE sudjeluju u opskrbi energije zbog zadovoljenja potrošnje.

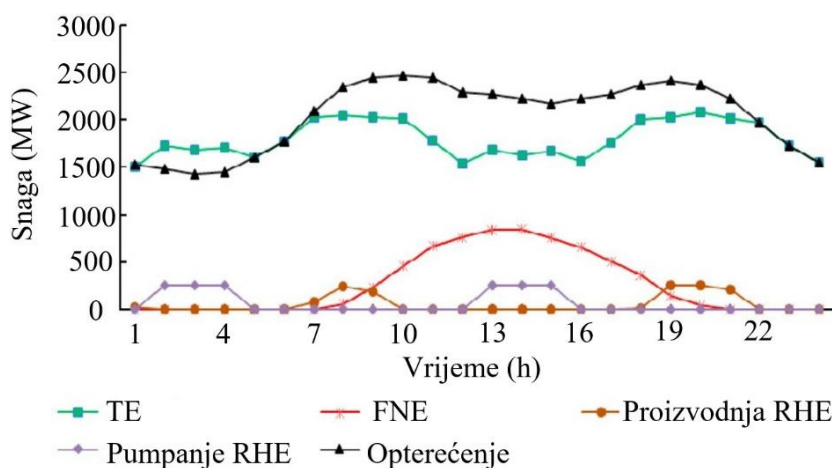


Slika 2.12. Rezultat prvog slučaja (TE)

Sa slike 2.13 vidljivo je da kad je i FNE u sustavu, kombiniran rad TE i FNE daje ukupnu energiju za potrošače, dok se na slici 2.14 vidi da kad je i RHE u sustavu ona proizvodi energiju u vremenima vršnog opterećenja (6 – 10h i 18-22h), a pumpa vodu kad je prisutan višak energije u sustavu (1-5 i 12-16).

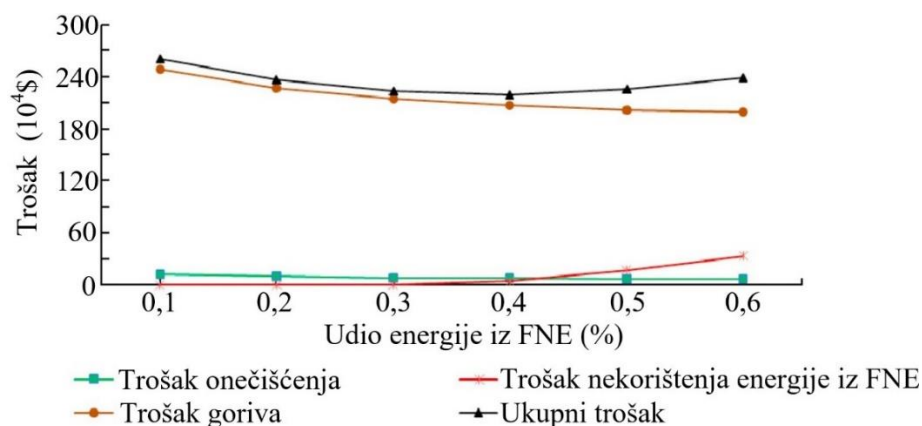


Slika 2.13. Rezultat drugog slučaja (TE i FNE)



Slika 2.14. Rezultat trećeg slučaja (TE, FNE i RHE)

Slika 2.15 prikazuje troškove sustava s obzirom na različit udio energije iz FNE. Vidljivo je da s porastom udjela energije iz FNE, troškovi goriva za TE i troškovi zbog zagađenja opadaju, dok tek kod udjela energije iz FNE od 40% počinju rasti troškovi zbog nemogućnosti puštanja cijele energije iz FNE te s toga rastu i ukupni troškovi. Tablica 2.1 prikazuje troškove sustava za sva 3 slučaja. Jasno se vidi da najmanje ukupne troškove ima slučaj 3, odnosno kad se sustav sastoji od TE, FNE i RHE jer RHE aktivno sudjeluje u proizvodnji energije za vrijeme vršnog opterećenja („peglanje vršnog opterećenja“ engl. *peak shaving*) te aktivno sudjeluje u periodnima niskih opterećenja (engl. *valley filling*) pumpajući vodu u gornji.



Slika 2.15. Usporedba troškova s obzirom na različit udio energije iz FNE

Tablica 2.1. Rezultati troškova za sva 3 slučaja

Slučaj	Troškovi goriva (10 ⁴ \$)	Trošak onečišćenja (10 ⁴ \$)	Trošak nekorištenja energije iz FNE (10 ⁴ \$)	Ukupni troškovi (10 ⁴ \$)
1	267,84	10,65	0	278,49
2	237,47	9,39	0,18	247,03
3	214,74	8,44	0	223,18

U [61] je optimiran rad sustava koji se sastoji od FNE, RHE, invertera, potrošača i upravljačke jedinice koja upravlja radom cijeloga sustava. Cilj je postići minimalni gubitak neisporučene energije. Radilo se nekoliko slučajeva, s obzirom na tipični zimski i ljetni dan te s obzirom na različite veličine gornjeg rezervoara RHE. Ako FNE proizvodi više energije nego što je potreba potrošača, taj višak se koristi za pumpanje vode iz donjeg u gornji rezervoar RHE, a kad FNE proizvodi manje energije od potrebe potrošača onda manjak isporučene energije nadoknađuje RHE, koja tada radi u turbinskom pogonu. Pokazalo se da uloga RHE može uvelike smanjiti postotak neisporučene energije te na taj način povećati pouzdanost sustava. Kao važan parametar se pokazala optimalna veličina gornjeg rezervoara RHE, zbog toga što će mali kapacitet gornjeg rezervoara prouzročiti ozbiljan gubitak opskrbe potrošača, dok će preveliki kapacitet biti neisplativ.

U [62] Mousavi i dr. su razvili algoritam koji minimizira kupljenu energiju iz mreže za promatranu farmu u ruralnom području. Sustav se sastoji od FNE, pumpe, turbine, rezervoara te potrošača (električni uređaji na farmi). Energija proizvedena iz FNE koristi se za pokretanje pumpe koja pumpa vodu iz bunara u rezervoar, koji se nalazi na površini zemlje. Iz tog rezervoara voda se može koristiti u svrhu navodnjavanja ili se može vratiti nazad u bunar preko turbine. Rezultati eksperimenta pokazuju da se efikasnim upravljanjem RHE mogu smanjiti troškovi električne energije preuzete iz mreže, odnosno da su godišnji troškovi električne energije bitno smanjeni ugradnjom sustava RHE sa sustavom FNE. Autori predlažu korištenje ovakvog sustava za farme koje imaju bunare i rezervoare.

U [63] dan je stohastički model za optimizaciju rada hibridnog sustava koji se sastoji od FNE, RHE, dizel agregata te potrošača. Sustav RHE može raditi u turbinsko-pumpnom režimu, ali može i kao akumulacijska HE. U gornji rezervoar utječe pritok koji pokazuje značajnu promjenjivost u sezonskim periodima i periodima unutar godine. Ispitana je uloga hidropotencijala za regulaciju energije iz FNE dok potrošnja varira u raznim omjerima. Zaključci do kojih su autori došli su da zajednički rad RHE i FNE može uvelike pomoći kod

rješavanja problema fluktuirajuće proizvodnje iz FNE te na taj način omogućiti da se veća snaga FNE instalira na mrežu. Pokazalo se da prisutnost RHE može smanjiti udio proizvodnje iz dizel agregata više nego sustav sa akumulacijskim HE te na taj način smanjiti ukupni trošak sustava. Također, pokazano je da za obavljanje istih funkcija veličina gornjeg rezervoara RHE može biti manja od veličine gornjeg rezervoara kod akumulacijske HE, što znači da se postojeće akumulacijske HE mogu prenamijeniti u RHE bez nekih posebnih zahvata vezano za veličinu rezervoara. U usporedbi uloge RHE u otočnom sustavu i sustavu gdje je spojena na krutu mrežu, RHE u otočnom sustavu ima veći doprinos kao proizvođač energije, dok u sustavu gdje je spojena na mrežu ima više ulogu kao regulator opterećenja (u regulaciji energije).

2.2. Tehnologija komprimiranog zraka

Korištenje komprimiranog (stlačenog) zraka kao spremišta energije (engl. *compressed air energy storage* – CAES) temelji se na dobro poznatoj tehnologiji plinskih turbina. U ovom sustavu energija se sprema u obliku komprimiranog (stlačenog) zraka u spremnicima (podzemni prostori ili posebni spremnici prilagođeni za to). U slučaju potrebe za proizvodnjom energije, stlačeni zrak se izvlači iz podzemnih spremnika, zagrijava se i ekspandira u visokotlačnoj i niskotlačnoj plinskoj turbini koja pretvara energiju stlačenog zraka u mehaničku (rotacijsku) energiju. Zrak se dodatno miješa sa prirodnim plinom radi pregrijavanja te onda sagorijeva i ekspandira u turbinama. Otpadna toplina koja nastaje u turbini odvodi se u grijač koji se koristi za zagrijavanje zraka iz podzemnog spremišta (slika 2.16).

S obzirom na prostor gdje se skladišti zrak, postoje različite vrste spremišta:

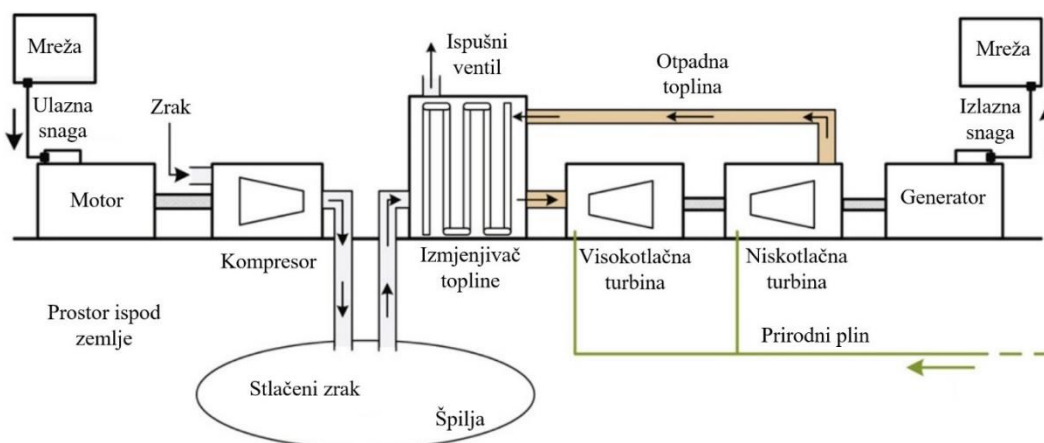
- špilje posebno razvijene za spremište zraka,
- postojeće špilje stvorene za proizvodnju soli i pretvorene u spremišta,
- rudarske špilje,
- pećine iskopane posebno u svrhu spremišta,
- preuređeni rudnici,
- kamenolomi, zatvorene podzemne površine...

Prikladno mjesto za ovakvo spremište se odabire uzimajući u obzir različite geološke karakteristike poput:

- dubine (između 200 m i 1000 m),
- debljine stjenke špilje,
- stabilnosti špilje u uvjetima promjene tlaka,
- prisutnosti minerala i opasnosti od oksidacije.

Upravo se trošak spremišta smatra glavnim čimbenikom koji ograničava razvoj CAES tehnologije. Ako već postoji prirodno spremište onda CAES tehnologija može biti isplativa, međutim ako ga je potrebno izgraditi, troškovi postaju preveliki. Da bi bili ekonomski isplativi CAES postrojenja se grade s 500-2500 MWh energije i 50-300 MW snage. Životni vijek ovakvog sustava je oko 40 godina te ima stupanj korisnosti oko 70%. Budući da je koeficijent samopražnjenja vrlo nizak, ovakvi sustavi se smatraju prikladnim spremištima za dugoročnu pohranu energije. Većina CAES postrojenja su manja od tipičnih postrojenja RHE, ali mjesta pogodna za njihovu izgradnju su rasprostranjenija od onih za RHE. Također, CAES tehnologija je jedina tehnologija nakon RHE koja može skladištiti veliku količinu energije pa su zato pogodna za uravnoteženje energije iz IOIE, kao i za mnoge druge usluge u EES-u [66-68]. U

[69-74] opisiva se CAES tehnologija kao samostalni sustav koji sudjeluje na tržištu pod različitim okolnostima.

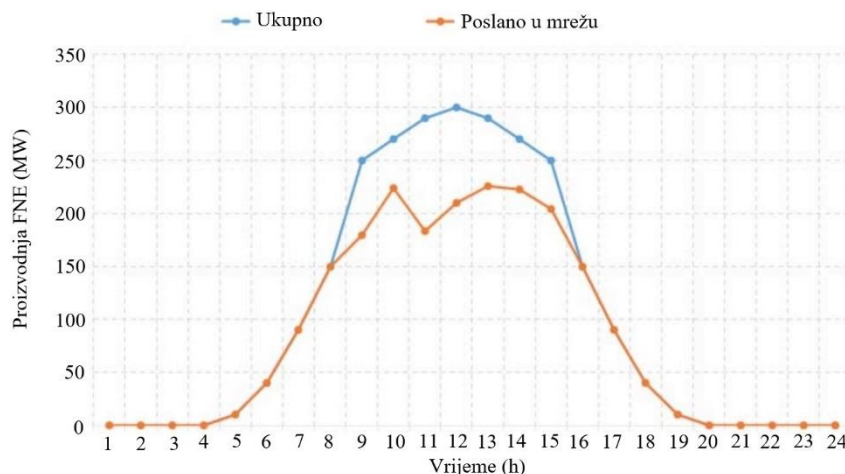


Slika 2.16. Shema CAES postrojenja [67]

U [69] i [70], Khatami, Oikonomou i Parvania su predstavili MILP model koji maksimizira profit CAES sustava na DAM, ASM i dnevnom tržištu. Funkcija cilja je maksimizacija zarade od prodaje i kupovine energije na promatranim tržištima uzimajući u obzir i troškove rada sustava. Rezultati su pokazali da se na ASM postiže veći dio zarade, za razliku od DAM i dnevnog tržišta.

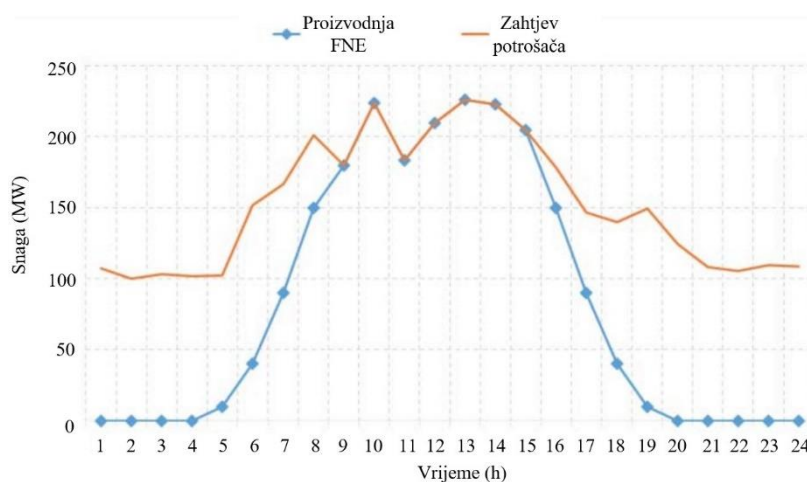
U [71] i [72] autori su promatrali rad CAES tehnologije s obzirom na promjenjivost cijena na tržištu. Funkcija cilja je zarada na promatranom DAM uzimajući u obzir prodanu i kupljenu energiju te troškove rada CAES sustava. Autori su potvrdili primjenjivost svoje metode [72] te su varirajući cijene dobili tri različita scenarija. Pokazali su da s obzirom na korištene scenarije (cijene) zarada od arbitraže može uvelike varirati.

U [75] i [76] ispitivan je zajednički rad CAES-a i FNE. U [75] se pokazalo da je povrat ulaganja u cjelokupni sustav puno manji od životnog vijeka promatranog sustava kad su se uzeli u obzir svi troškovi. CAES sustav može poslužiti u boljoj integraciji FNE u EES. U [76] autori su prikazali kombinirani rad FNE i CAES sustava sa mrežom. Naime, funkcija cilja je zarada od prodaje energije u mrežu, a pojava nedostatka energije (neravnoteža energije) se smatra gubitkom profita. Energija iz FNE se koristi za opskrbu potrošača (mreže), a ako postoji višak proizvedene energije, taj višak se koristi za skladištenje zraka u CAES sustav. Kada FNE ne proizvodi dovoljno energije za potrebe mreže, manjak energije se nadoknađuje iz CAES-a, a kad se ukupna potrošnja ne može zadovoljiti ni iz CAES-a ni iz FNE to se smatra gubitkom profita (neravnoteža energije). Slika 2.17 prikazuje ukupnu proizvodnju iz FNE te energiju injektiranu u mrežu.



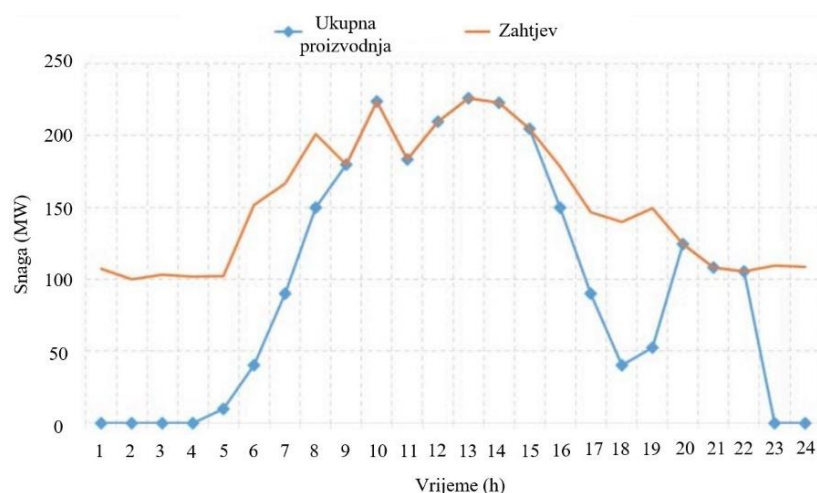
Slika 2.17. Ukupna proizvodnja FNE i njena energija injektirana u mrežu

Sa slike se vidi da postoji višak proizvedene energije u razdoblju od 08-16 sati te se ta energija koristi za spremanje zraka u CAES, što je vidljivo na slici 2.20 (u istom razdoblju CAES komprimira zrak). Slika 2.18 prikazuje energiju injektiranu u mrežu iz FNE i zahtjev potrošača.

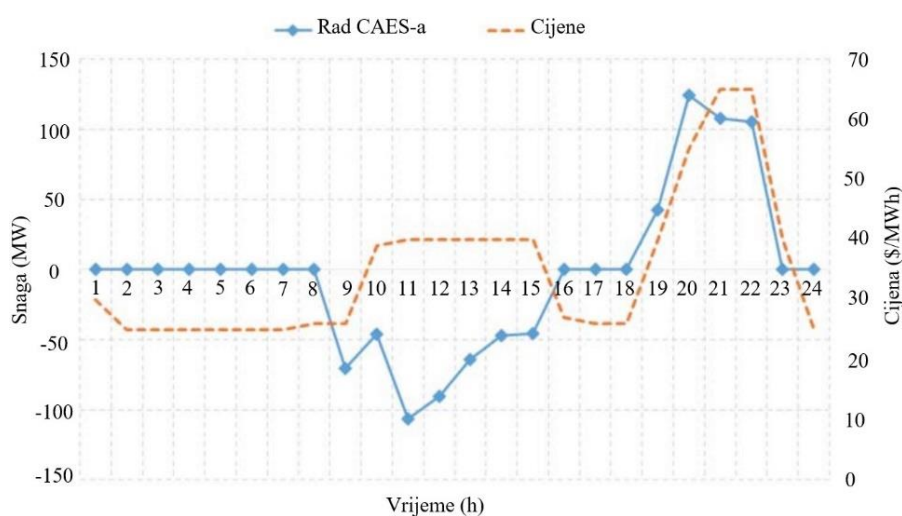


Slika 2.18. Injektirana energija u mrežu iz FNE i zahtjev potrošača

Vidi se da FNE pokriva ukupnu potrošnju u razdoblju od 9-15 sati. Slika 2.19 prikazuje energiju injektiranu u mrežu od strane FNE i CAES-a. Vidi se da CAES sudjeluje u opskrbi energijom u razdoblju od 19-22 sata. Slika 2.20 prikazuje rad CAES-a i tržišne cijene. Vidi se da su najveće cijene u razdoblju od 19-23 sata, a to je upravo vrijeme kada CAES opskrbljiva mrežu energijom. Iz tablice 2.2 se vidi da je postignuta veća dobit u zajedničkom radu FNE i CAES-a, za razliku od samostalnog rada FNE.



Slika 2.19. Energija injektirana u mrežu od FNE i CAES i ukupni zahtjev potrošača



Slika 2.20. Rad CAES-a i tržišne cijene

Tablica 2.2. Prikaz rezultata sa i bez CAES-a kao spremišta

Slučaj	Prihod od CAES-a (\$)	Prihod od FNE (\$)	Gubitak prihoda zbog nedostatka energije (\$)	Ukupni profit (\$)
Bez CAES-a	0	70502	43043	27459
Sa CAES-om	4664	70502	26227	48939

U [77-84] opisan je rad CAES-a u kombinaciji s vjetrom kao IOIE. U [77] prikazana je optimalna strategija rada sustava koji se sastoji od CAES-a, VE i mreže. Funkcija cilja je maksimizacija profita od prodaje energije iz vjetra i CAES-a, uzimajući u obzir troškove rada i održavanja sustava. Pokazalo se da rad, a s tim i isplativost sustava uvelike ovisi o parametrima sustava poput koeficijenta korisnosti, tržišnih cijena te vjetra.

U [78] autori su promatrali CAES u funkciji spremišta s ciljem smanjenja fluktuacije vjetroenergije. Osim CAES-a i VE, sustav ima i TE koji sudjeluju u proizvodnji energije. Funkcija cilja je minimizacija 24-satnih troškova rada cjelokupnog sustava, odnosno, trošak

rada, paljenja i gašenja TE te trošak rada CAES-a. Napravljene su 2 analize s obzirom na prisutnost CAES-a kao spremišta (s i bez). Rezultati su pokazali da korištenje CAES-a kao spremišta energije značajno utječe na smanjenje troškova proizvodnje cjelokupnog sustava te se tehnologija CAES-a pokazala korisnim rješenjem za peglanje vršnog opterećenja.

Manchester i Swan su također u [79] promatrali sustav CAES-a i VE s ciljem maksimizacije profita na tržištu energije. Algoritam određuje raspodjelu energije iz VE i CAES s obzirom na period dana (visoka ili niska potražnja za energijom) te stanja napunjenosti spremnika CAES-a pa u slučaju da je period dana s visokim cijenama, energija iz CAES-a i VE se šalje u mrežu, a ako je period dana s niskim cijenama, energija iz VE se koristi za spremanje zraka u CAES. Ako je stanje napunjenosti CAES-a 100%, a period niskih cijena, onda će cijela energija iz VE služiti za opskrbu mreže dok će se u periodu visokih cijena nastojati cijela energija injektirati u mrežu. Rezultati istraživanja pokazuju da je korištenje CAES-a kao spremišta energija učinkovita metoda za smanjenje fluktuacije energije iz VE te da čini energiju iz vjetra bolje iskoristivom.

U [80] autori su istraživali rad CAES-a s TE i VE sa stajališta tvrtke koja ih posjeduje i želi maksimizirati svoj dnevni profit na tržištu, odnosno smanjiti troškove rada sustava. Rađena su dva slučaja:

- 1) tvrtka sudjeluje na tržištu energije nastojeći maksimizirati svoju zaradu bez ikakvih uvjeta vezanih za opskrbu potrošača (čista prodaja energije na tržištu). Funkcija cilja u ovom slučaju je maksimizacija zarade od proizvodnje energije TE, VE i CAES-a uzimajući u obzir troškove rada TE.
- 2) promatran je isti sustav kojemu je cilj zadovoljiti potrošnju potrošača uz minimizaciju troška sustava. Funkcija cilja u ovom slučaju je minimizacija troška rada cjelokupnog sustava uz uvjete da potrošnja mora biti zadovoljena.

Da bi se usporedio utjecaj CAES-a u promatranim slučajevima, svaki od slučajeva je rađen sa CAES-om i bez CAES-a. Rezultati pokazuju da prisutnost CAES-a znatno utječe na povećanje profita u prvom slučaju te na smanjenje troškova sustava u drugom slučaju.

Slično kao u [80], u [81] je promatrana tvrtka koja posjeduje sličan sustav proizvodnih jedinica (TE, VE, CAES) s ciljem maksimizacije profita na DAM i ASM. Došlo se do sličnih rezultata kao u [80], a to je da CAES može smanjiti troškove rada sustava i povećati njegovu profitabilnost.

U [82-84] istraživao je rad CAES-a kao spremišta energije u kombinaciji s visokim udjelom različitih IOIE [82] te vjetrom [83, 84] s ciljem maksimizacije profita i smanjenja ukupnih troškova sustava pod različitim uvjetima i okolnostima. Pokazalo se da CAES može:

- efektivno obavljati energetska arbitraža,
- povećati ukupni prihod,
- smanjiti emisije CO₂,
- smanjiti troškove sustava,
- omogućiti bolju integraciju IOIE u EES.

2.3. Baterije

Napravljena su brojna istraživanja koja pokazuju razne tipove baterija kao korisna, pouzdana i prikladna rješenja za pohranu energije. Zbog velike raznovrsnosti i širokog spektra različitih materijala koji se koriste u industriji proizvodnje baterija postoji opasnost od ispuštanja značajnih količina štetnih tvari (npr. opasni otpad, emisije stakleničkih i otrovnih plinova) tijekom procesa kao što su rudarenje, proizvodnja, uporaba, transport, sakupljanje, skladištenje odlaganje i recikliranje. Uskoro se očekuje uporaba baterija u širokom opsegu (s instaliranom snagom većom od 50 MW) te se smatra da će to imati značajne društvene i okolišne učinke. Baterije su većinom izrađene od elektroda uronjenih u kemikaliju u kojoj se kemijska energija pretvara u električnu i obrnuto. Razvijeni su razni tipovi baterija koji se koriste u različite svrhe. Neke od baterija pogodne za korištenje u svrhu EES-a su:

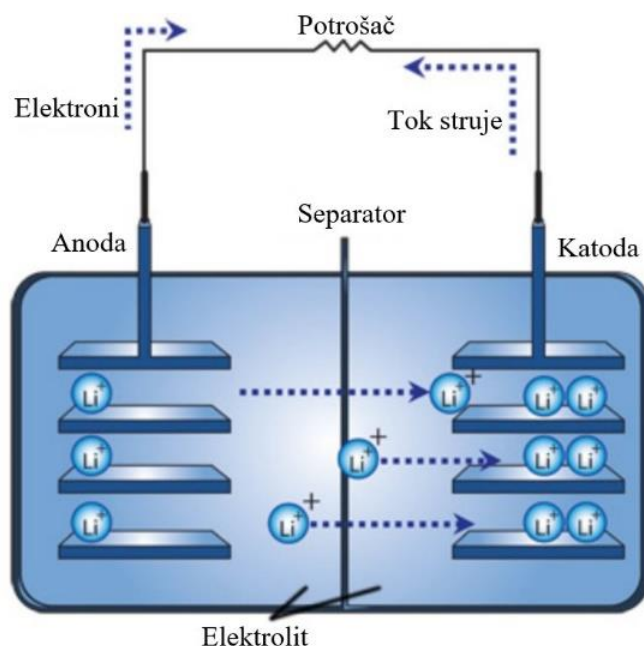
- Litij-ionska (Li-ion),
- Natrij-sumporna (NaS),
- Olovna baterija,
- Protočna baterija [85, 86].

Također, razlikuju se i po svojim značajkama među kojima se izdvajaju:

- snaga,
- kapacitet,
- učinkovitost,
- životni vijek (najčešće dan kao broj ciklusa paljenja/gašenja),
- radna temperatura,
- dubina pražnjenja (engl *depth of discharge* – DoD),
- samopražnjenje...

2.3.1. Litij-ionske baterije

Li-ion baterije široko se koriste u mobilnim uređajima i prijenosnim elektroničkim uređajima. Ova vrsta baterije privlači veliko zanimanje s obzirom na materijale od kojih se proizvodi, kako bi se omogućila njihova primjena u sustavima velikih snaga, poput električnih automobila i skladišta energije. Rad Li-ion baterije temelji se na elektrokemijskim reakcijama između pozitivnih litijevih iona sa analitičkim i katalitičkim aktivnim materijalima. Elektrode (katoda i anoda) su uronjene u elektrolitnu tekućinu u kojoj se nalazi separator, koji omogućuje prolaz litijevih iona. Katoda se obično sastoji od litijevog metalnog oksida, dok je anoda grafit, a elektrolit je tekućina koja sadrži otopljene litijeve soli. U ciklusu punjenja pozitivni ioni litija idu prema anodi, dok je proces pražnjenja obrnut (slika 2.21).



Slika 2.21. Princip rada Li-ion baterije (pražnjenje) [87]

Kao važne značajke Li-ion baterija ističe se:

- visoka gustoća energije (170-300 Wh/l),
- specifična energija (80-150 Wh/kg),
- niska stopa samopražnjenja,
- jednostavno održavanje.

Očekivani broj ciklusa punjenje/pražnjenje je 1000-4000, što uvelike ovisi o dubini pražnjenja. Još jedna od važnih značajki je mogućnost brzog punjenja i pražnjenja. Vrijeme potrebno za dostizanje 90% nazivne snage baterije je približno 200 ms s vrlo visokim stupnjem korisnosti. Upravo ove karakteristike čine Li-ion baterije prikladnim za primjenu u uvjetima gdje su važni vrijeme odziva i težina. Glavni nedostatak Li-ion baterija su visoki troškovi ulaganja, a također nisu primjerene za uporabu u sigurnosnim radnjama gdje se mogu isprazniti do kraja jer im vijek trajanja ovisi o već spomenutoj DoD. Zbog krhkosti ovih baterija, vrlo je važno održavati napon i temperaturu u zadanom opsegu [66, 67].

Svoju ulogu su pronašle u brojnim primjenama od kojih se najviše ističu elektronika i automobilska industrija. Međutim, pored te dvije primjene važno je spomenuti i primjenu u industriji, odnosno kao spremište energije. Primjena spremišta energije može se podijeliti u nekoliko kategorija:

- svrha stabilizacije mreže, odnosno regulacija energije iz IOIE,
- svrha regulacije energije za potrebe EES,
- svrhu neprekidnog napajanja za hitne slučajeve,
- svrhu spremanja energije iz IOIE,
- u privatnim domaćinstvima i dr.

Iako su brojne primjene Li-ion baterija još u fazi istraživanja, razvoju tehnologije se pridaje velika pozornost zbog trenutnih energetskih problema i zagađenja okoliša. Raspon snage Li-ion baterija kao spremišta kreće se od malih (za kućnu uporabu) do onih koji se koriste u regulaciji proizvedene energije iz velikih IOIE [88].

Brojni autori su ispitivali korisnost, uporabu te tehno-ekonomsku procjenu Li-ion baterija kao spremišta energije u EES-u i na tržištu električne energije, maksimizirajući pritom dobit te minimizirajući gubitke sustava [89-95].

U [89] autori su maksimizirali profit Li-ion baterija zajedno s FNE. Model istovremeno daje optimalnu veličinu sustava te optimalnu strategiju rada baterijskog sustava uključujući vijek trajanja, troškove investicije i zaradu. Istraživali su utjecaj sustava baterije na tržište te su promatrali može li rad baterije biti isplativ gledajući s više aspekata kao što su:

- zarada od DAM,
- rad u vrijeme vršnih opterećenja,
- smanjenje pogreške zbog procjenjenije proizvodnje itd.

Uzeto je u obzir nekoliko scenarija s obzirom na pogrešku u predviđanju proizvodnje iz FNE, potrošnju i tržišne cijene. Sustav se sastoji od FNE 500 kW i sustava Li-ion baterija. U konkretnom primjeru rezultat je pokazao optimalnu veličinu sustava baterija od 123,5 kWh i vijek trajanja od 20 godina. Profit baterije je 32541 \$ dok su troškovi investicije 38603 \$. Također, baterija prodaje energiju na DAM u vremenu visokih cijena, dok se puni u vremenu niskih cijena. Također, aktivno sudjeluje u peglanju vršnog opterećenja i regulaciji energije zbog pogreške u predviđenoj potrošnji iz FNE.

U [90] autori su istražili utjecaj cijena na tržištu rezerve primarne regulacije na rad i profit Li-ion sustava baterija. Pokazalo se da sustav Li-ion baterija može generirati zaradu na promatranom tržištu. Autori ističu da su ključne dvije stvari s obzirom na pogodnosti pružanja usluga u promatranom tržištu, a to su:

- daljnje kretanje cijena tržišta,
- cijena baterija.

Autori su u [91] i [92] promatrali rad Li-ion sustava baterija u SRM. U [91] napravljena je optimalna strategija rada sustava Li-ion baterija. Optimiziran je rad s ciljem maksimizacije ekonomske dobiti. Rezultati su pokazali da se s trenutnim tržišnim cijenama i cijenama baterije ne može postići ekonomska zarada od samostalnog rada sustava baterija. Rezultati nadalje impliciraju da sustav baterija radeći na burzi može biti ekonomski održiv zbog sudjelovanja ostalih opskrbljivača energijom. U [92] autori su istražili nekoliko scenarija s obzirom na rad sustava Li-ion baterija s ostalim sudionicima na SRM (kao npr. TE, vjetroenergija i energija iz Sunca). Uzimajući u obzir sve promatrane scenarije, autori su došli do zaključka da ekonomski održiv rad sustava za promatranu 2019. godinu nije moguć. Cijene na promatranom tržištu nisu dovoljne za pokrivanje gubitaka cjelokupnog sustava. Pretpostavljene cijene za 2025. godinu bit će dovoljne za stvaranje dobiti, ali ne uzimajući u obzir samostalni sustav baterija već u zajedničkom radu s drugim izvorima.

Maeyaert, Vandevelde i Döring su u [93] promatrali sustav Li-ion baterija kao spremišta energije te FNE kao IOIE u distribucijskoj mreži. Ispitana je ekonomska dobit sustava baterija na tržištu pomoćnih usluga, s tim da su i varijacije tržišnih cijena uzete u obzir. Pokazalo se da sustav baterija može biti koristan u pružanju pomoćnih usluga povećavajući dobit samog sustava. Također, povećala se fleksibilnost, sigurnost, pouzdanost i kvaliteta same mreže.

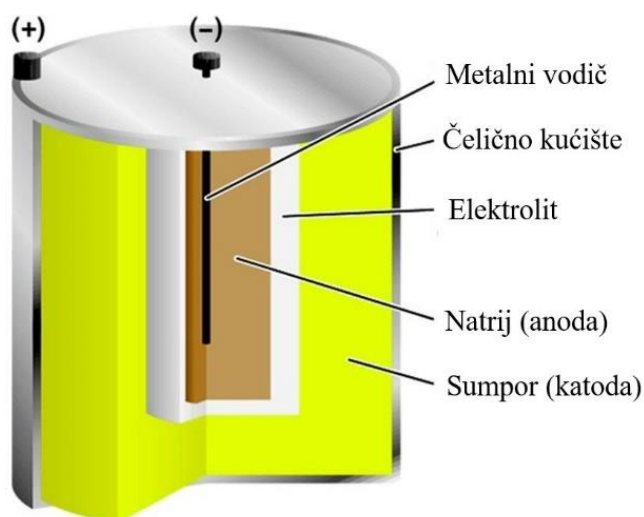
U [94] promatran je rad sustava Li-ion baterija kao spremišta energije te VE kao IOIE u DAM, SRM i unutardnevnom tržištu uzimajući u obzir pogrešku u procjeni proizvodnje vjetroenergije i tržišnih cijena. Funkcija cilja je maksimizacija ukupnog profita sustava baterija i VE. Da bi se mogao analizirati rad sustava baterija na promatranim tržištima promatralo se nekoliko slučajeva:

- sama VE,
- VE sa sustavom baterija ali bez sudjelovanja na SRM,
- VE i sustav baterija sudjeluju na SRM.

Pokazalo se da se sudjelovanjem na SRM uvelike mijenja strategija rada i optimalne ponude na DAM, zbog velikog utjecaja SRM tržišta na ukupni profit. Promjenjivost u radu sustava baterija smanjuje se kada sustav sudjeluje na SRM zbog toga što sustav baterija nastoji raditi što bliže maksimalno dopuštenoj granici rezerve. Iako unutardnevno tržište nema nekog ekonomskog značaja, ovo tržište može biti korisno u periodima povećane proizvodnje iz VE. Također, sudjelovanje cjelokupnog sustava na SRM povećava profit skoro četverostruko za razliku kad sustav ne sudjeluje na SRM.

2.3.2. Natrij-sumporne baterije

U natrij sumpornoj (engl. *sodium sulfur* – NaS) bateriji anoda je napravljena od natrija, dok je katoda od sumpora. Aluminijev oksid predstavlja i elektrolit i separator. Tijekom pražnjenja, Na^+ ioni s anode putuju prema katodi, dok katoda ispušta S^{2-} anione. Elektrolit omogućava prijenos natrijevih iona do katode gdje se oni kombiniraju sa sumporovim anionima stvarajući natrijeve polusulfide. Tijekom punjenja događa se obrnuti proces. NaS baterije se obično izvode u cjevastom obliku gdje se natrij nalazi u unutarnjoj šupljini koju sačinjava elektrolit (slika 2.22). Budući da su u NaS baterijama elektrode u tekućem obliku, jedna od važnijih karakteristika ovog tipa baterija je visoka radna temperatura (oko 350°C). Na ovoj temperaturi su natrij, sumpor i natrijev polusulfid u tekućem stanju što omogućava visoku reaktivnost elektroda. Gustoća energije i stupanj korisnosti ovih baterija su visoki (151 W/l i 85%). Također, važna odlika ovih baterija je da nemaju samopražnjenja, lako im je održavanje, a mogućnost reciklaže im je 99%. Životni vijek im je otprilike 15 godina i mogu napraviti više od 4000 ciklusa punjenje/pražnjenje. Mogu se koristiti za velike snage (nekoliko MW) što ih čini pogodnima kao spremišta energije u električnim mrežama. NaS baterije se sastoje od dostupnih i jeftinih materijala te se mogu koristiti u svrhu regulacije i općenito spremanja energije u EES-u [66, 67].



Slika 2.22. NaS baterija [96]

Ippolito i dr. su u [97] uzeli u obzir NaS bateriju kao spremište energije s ciljem smanjenja troška električne energije za krajnjeg potrošača (pasivnog korisnika). Sustav se sastoji od

električne mreže, potrošača i baterije te je tok energije iz mreže uvijek jednosmjernan (prema potrošaču ili bateriji). Spremljena energija se ne može prodavati u mrežu, već služi samo za pokrivanje potrošnje. Napravljena su dva slučaja u kojem se istraživala ekonomska održivost baterijskog sustava s obzirom na različite cijene električne energije (na nacionalnoj i regionalnoj razini u talijanskom DAM). Rezultati pokazuju da ekonomska održivost nije zadovoljena jer je period vraćanja ulaganja duži od životnog vijeka baterije u slučaju s cijenama kao na nacionalnoj razini te da NaS baterija zbog visokih investicijskih troškova nije profitabilna u promatranom primjeru. U drugom slučaju, ekonomska održivost je na granici isplativosti. Međutim, uzimanjem u obzir troškova rada i održavanja, tehnologija NaS baterije pokazala se vrlo neisplativom.

U [98] autori su koristili NaS bateriju kao spremište energije s ciljem smanjenja troška rada TE, uzimajući u obzir razne prognoze proizvodnje energije iz VE. Pokazalo se da u promatranom slučaju, korištenje NaS baterije kao spremišta može smanjiti troškove sustava 2-4% te smanjiti potrebnu proizvodnju iz TE za 185 MW.

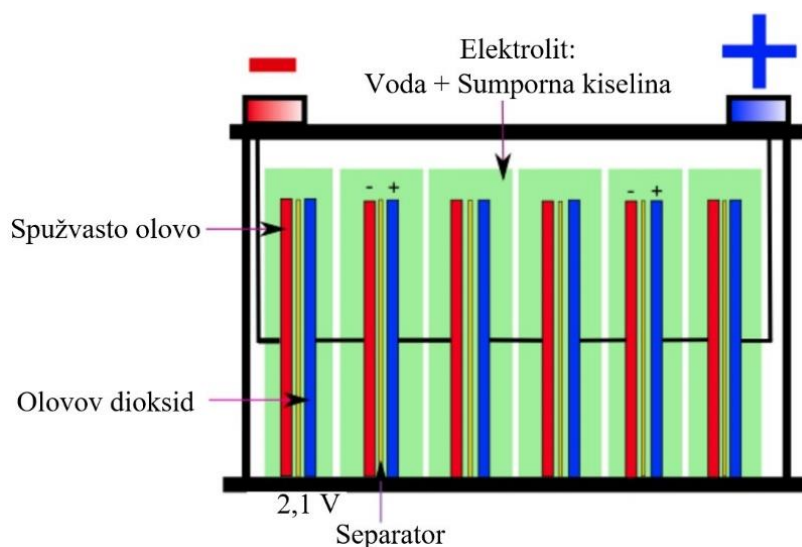
Kazempour i Moghaddam su u [99] također proučavali ekonomsku održivost NaS baterije koja sudjeluje na DAM i ASM. Funkcija cilja je maksimizacija profita na spomenutim tržištima, uzimajući u obzir i troškove rada i održavanja. Rezultati su pokazali da s obzirom na zarađeni prihod u spomenutim tržištima, ekonomska održivost nije zadovoljena te da bi ulagači u tehnologiju NaS baterije kao spremišta energije trebali biti poticani financijskim sredstvima. U [100] autori su razvili model za optimalan rad NaS baterije koja radi u sustavu koji se sastoji od već spomenute baterije kao spremišta, FNE i električne mreže. Funkcija cilja je tjedna optimizacija rada, odnosno maksimizacija profita pod uvjetom da je potrošnja zadovoljena, a u slučaju da nije, plaćaju se penali. Uspoređena su dva slučaja, jedan koji uzima u obzir bateriju u sustavu i drugi bez baterije. Rezultati su pokazali veći profit u slučaju s baterijom. Budući da je snaga FNE 13 MW, a kapacitet i snaga baterije 7,2 MWh i 1,2 MW (mali kapacitet u usporedbi sa snagom FNE), penali su bili neizbježni.

U [101] Kazempour i dr. su istražili rad NaS baterije s elektranom na gorivo, u cilju povećanja profita cjelokupnog sustava. Uspoređivao se prihod dobiven zbrajanjem prihoda samostalnog rada baterije i elektrane, s prihodom dobivenim zajedničkim radom baterije i elektrane. Promatrao se također i utjecaj kapaciteta baterije na zaradu. Rezultati su pokazali da zajednički rad baterije i elektrane dovodi do većeg profita, nego u pojedinačnom radu te iste baterije i elektrane.

2.3.3. Olovne baterije

Olovna baterija se smatra najrazvijenijim tipom baterije. Sastavljena je od ćelija uronjenih u razrijeđenu sumpornu kiselinu koja služi kao elektrolit (slika 2.23). Pozitivna elektroda svake ćelije sastoji se od olovnog dioksida, dok je negativna elektroda od spužvastog olova. Tijekom pražnjenja obje se elektrode pretvaraju u olovni sulfat, dok se tijekom punjenja obje elektrode vraćaju u njihovo početno stanje. Reverzibilne reakcije uništavaju elektrode, dajući vijek trajanja baterije od 1200-1800 ciklusa (ovisno o DoD) punjenje/pražnjenje s koeficijentom učinkovitosti od 75-80%. Životni vijek im je otprilike 5-15 godina i ovisi o radnoj temperaturi baterije. Zbog niskog koeficijenta samopražnjenja, olovne baterije su pogodne za spremanje energije na duže vrijeme. Osim relativno loših karakteristika baterije pri niskim i visokim temperaturama okoline te kratkom životnom vijeku, glavni nedostaci olovne baterije su nužnost održavanja vode u njima te niska specifična snaga i energija (180 W/kg i 30 Wh/kg). Olovne baterije se najviše koriste u automobilima te u industriji. Glavna uporaba u industriji im je primjena za stanje pripravnosti, odnosno služe kao sigurnosno napajanje gdje je bitan

kontinuitet opskrbe električnom energijom te se u nekim slučajevima upotrebljavaju i u pohrani energije [66, 67, 102].



Slika 2.23. Olovna baterija [103]

U [104] promatran je sustav olovnih baterija kao spremišta energije s ciljem bolje integracije vjetroenergije na tržištu električne energije. Cilj je maksimizirati cjelokupni profit sustava na način da taj profit ne dolazi samo od prodaje energije na tržištu, već i od smanjenja troška zbog produljenja životnog vijeka baterija. Naime, pravilnim radom baterije (zbog ciklusa punjenje/praznjenje) moguće joj je uvelike produljiti životni vijek. Problem je riješen unazadnim dinamičkim programiranjem. Napravila su se i usporedila dva slučaja. U prvom slučaju troškovi zbog smanjenog trajanja baterije nisu bili uvršteni u funkciju cilja, ali su se računali, dok su se u drugom slučaju u funkciji cilja ti troškovi uzeli u obzir. Rezultati su pokazali da je dobit od tržišta energije veća u prvom slučaju, ali je računati trošak baterija također veći u prvom slučaju, što rezultira ukupnoj povećanoj dobiti od 9% u drugom slučaju.

Akbari-Dibavar i dr. su u [105], a slično kao u [104], istražili rad olovne baterije u maksimizaciji profita na DAM uzimajući u obzir životni vijek baterije. Zbog malog kapaciteta baterije, smatra se da rad baterije na tržištu nema ikakvog utjecaja na tržišne cijene (engl. *price-taker*). Korišteno je stohastičko programiranje za definiranje cijena na tržištu, na temelju kojih sustav baterija daje svoje ponude nastojeći maksimizirati funkciju cilja. Funkcija cilja se sastoji od dva dijela, gdje se prvi dio odnosi na zaradu na tržištu energije, dok je drugi dio povezan s troškom koji nastaje zbog smanjenog životnog vijeka baterije. Radeći energetske arbitraže, baterija će često mijenjati svoj rad (punjenje ili praznjenje), ali učestala promjena rada dovodi do smanjenog životnog vijeka baterija te na kraju do smanjenog profita. Ispitalo se nekoliko slučajeva s različitim cijenama i uključenim rizicima. Rezultati su pokazali značajno smanjenje profita kad se uzeo u obzir trošak zbog smanjenja životnog vijeka baterije.

U [106] autori su razvili algoritam za optimalnu strategiju rada sustava koji se sastoji od FNE i sustava olovnih baterija kao spremišta energije s ciljem smanjenja fluktuacija iz FNE. Sustav se sastoji od FNE snage 1,2 MW, sustava baterija i mreže. Cilj rada je razviti model koji će minimizirati kapacitet baterije (minimalna potrebna snaga baterije) za promatrani sustav FNE, optimizirati rad baterije i smanjiti mogućnost kvara baterije. Rezultati su pokazali da je olovna baterija kao spremište energije dobro rješenje s gledišta investicijskih troškova.

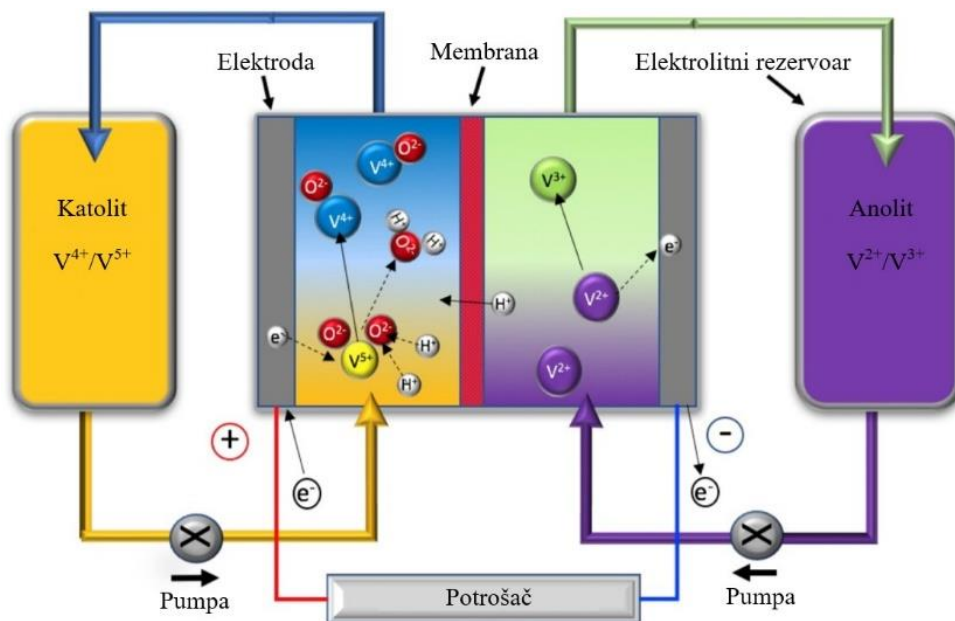
Mallol-Poyato i dr. su u [107] prikazali primjenu olovne baterije kao spremišta energije u sustavu koji se sastoji od potrošača, proizvodnih jedinica i baterije kao spremišta. Sustav je spojen na mrežu te je cilj minimizirati preuzetu energiju iz mreže. Naime, kada postoji višak energije u sustavu, odnosno kada je energija iz proizvodnih jedinica veća od zahtjeva potrošača, baterija sprema energiju koju će koristiti u vremenu kad zahtjev potrošača bude veći od proizvodnje. Ako nema dovoljno energije iz baterije i proizvodnih jedinica za opskrbu potrošača, preuzima se energija iz mreže. Model je testiran na nekoliko slučajeva: s i bez baterije kao spremišta energija te s obzirom na profil proizvođača i potrošača u sustavu (njihova potrošnja, snaga...). Rezultati su pokazali da korištenje baterije kao spremišta energije ima utjecaj na promatrane sustave na način da su se postigle uštede od oko 5% za razliku od slučajeva kad nije bilo spremišta.

2.3.4. Protočne baterije

Rad protočnih baterija temelji se na reverzibilnim elektrokemijskim reakcijama koje se javljaju u ćelijama povezanim u seriju, paralelu ili kombinirano, ovisno o naponu koji se želi dobiti. U ovih se baterija dvije različite elektrolitske otopine nalaze u odvojenim rezervoarima (slika 2.24). Tijekom rada baterije, vodene otopine se pumpaju kroz elektrokemijsku ćeliju u kojoj se odvijaju reakcije. Najčešća tri tipa protočnih baterija su:

- 1) vanadijumska redoks baterija (VRB),
- 2) cink bromska baterija,
- 3) polisulfid bromidna baterija.

Budući da se njihov rad temelji na redukciji i oksidaciji elektrolita, ovi tipovi baterija još se nazivaju reduksijsko-oksidacijske (redoks) protočne baterije. Tijekom procesa punjenja, jedan elektrolit se oksidira na anodi, dok se drugi elektrolit reducira na katodi. Proces pražnjenja se sastoji od obrnutog postupka. Jedna od glavnih prednosti protočnih baterija da je njihov kapacitet energije lako podesiv, jer ovisi o količini pohranjenog elektrolita. Zbog toga su snaga i energija kod protočnih baterija nezavisne karakteristike. Snaga baterija ovisi o broju ćelija i veličini elektroda. Protočne baterije se mogu u potpunosti isprazniti bez ikakvih oštećenja te imaju vrlo nizak stupanj samopražnjenja, jer se elektroliti skladište u posebnim, zatvorenim tankovima. Redoks protočne baterije imaju dug životni vijek i niske troškove održavanja te su sposobne skladištiti energiju tijekom dužih razdoblja. Troškovi rada kod protočnih baterija nisu zanemarivi zbog kontrole elektrolitičkog protoka i pumpi. Najpoznatiji tip protočnih baterija je VRB. Životni vijek joj je oko 15-20 godina s više od 10000 ciklusa punjenje/pražnjenje pri 100% DoD. Takve baterije postižu učinkovitost od 78% i rezultiraju relativno niskim troškovima skladištenja energije na dulje vrijeme. Nedostatci su niska specifična energija i gustoća energije (25-35 Wh/kg i 20-33 Wh/l) [66, 67].



Slika 2.24. Princip rada redoks protočne baterije (VRB) [108]

U [109] autori su istraživali ekonomsku održivost protočnih baterija kao spremišta energije. Ispitivala se profitabilnost baterija na tržištu električne energije te u izoliranim sustavima s velikim udjelom energije iz IOIE. Naime, prvo su se računali troškovi cjelokupnog rada baterije te su se ti troškovi uspoređivali s mogućim prihodima zarađenim na tržištu električne energije te s radom u dva izolirana otočna sustava. Izolirani sustav se sastoji od baterija, TE i VE. Rezultati pokazuju da protočne baterije postižu zaradu od 43-60% svojih ukupnih troškova u promatranom periodu (2013. – 2017. godine). U slučaju rada u izoliranim sustavima, baterije su se pokazale korisnijima jer zajedno s IOIE smanjuju proizvodnju iz TE koji imaju visoke troškove goriva. Naime, korištenje protočnih baterija kao spremišta energije u izoliranim sustavima koji imaju visok udio energije iz IOIE se smatra dobrim rješenjem zbog njihovog dugog životnog vijeka. Pokazalo se također da prihod i ukupna profitabilnost sustava uvelike ovise o cijenama goriva.

Adebayo dr. su u [110] također ispitivali ekonomsku održivost (povrat investicijskih troškova) protočne baterije i to VRB tipa. Razvili su MILP model koji računa maksimalnu zaradu promatrane protočne baterije od arbitraže na tržištu električne energije. Funkcija cilja maksimizira financijsku dobit, uzimajući u obzir troškove rada i održavanja te pristojbu. Rezultati pokazuju isplativ arbitražni rad baterija u promatranom tržištu te da će njihovo sudjelovanje kao spremište energije u pomoćnim uslugama dovesti do značajnog povećanja zarade. Osim toga, vrijeme povrata investicijskih troškova se također pokazalo zadovoljavajuće.

U [111] pokazano je kako VRB sudjeluje u obavljanju pomoćnih usluga, posebice u regulaciji frekvencije i proizvodnji energije za vrijeme vršnih opterećenja. Rezultati su pokazali da baterija zbog svoje sposobnosti brzog odziva učinkovito sudjeluje u regulaciji frekvencije te u peglanju vršnog opterećenja. Ekološka prihvatljivost te dostupnost materijala od kojih se radi VRB čini ove baterije obećavajućim rješenjem za rad u spomenutim uslugama.

Pored članka [111] koji se bavi radom VRB u pomoćnim uslugama, u [112] istraživao je rad VRB u pružanju usluga primarne rezerve snage, kontrole jalove energije i u peglanju vršnog opterećenja. VRB se pokazala funkcionalna u pružanju svih navedenih usluga.

U [113] Turker i dr. su istraživali rad VRB s ciljem bolje integracije vjetroenergije na Španjolskom EES-u. Naime, korištenjem VRB nastoje se smanjiti odstupanja u proizvodnji VE

nastale pogrešnim predviđanjem proizvodnje. Procjenjivala se ekonomska dobit cijelog sustava uzimajući u obzir troškove VRB i penale nastale zbog pogrešnog predviđanja proizvodnje. Pokazalo se da korištenje VRB može značajno smanjiti nastala odstupanja.

2.4. Supravodljivi sustav za pohranu magnetske energije

Supravodljivi sustav za pohranu magnetske energije, superzavojnica (engl. *superconducting magnetic energy storage* – SMES) koristi istosmjernu struju koja stvara magnetsko polje kroz supravodljivu zavojnicu pri niskoj temperaturi. Slika 2.25 prikazuje izgled SMES sustava. Osnovni dijelovi SMES sustava su:

- supravodljiva zavojnica,
- sustav za pretvorbu energije,
- hladnjak.

Karakteristike SMES sustava najviše ovise o karakteristikama same zavojnice. Ovisno o temperaturi na kojoj sustav radi supravodljiva zavojnica može biti:

- visokotemperaturna zavojnica (radi na oko 70 K),
- niskotemperaturna zavojnica (radi na oko 5 K).

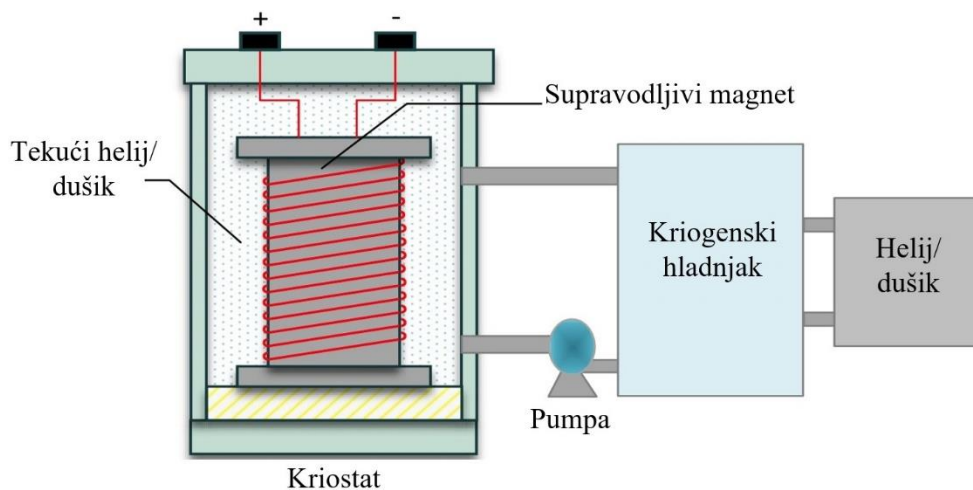
Maksimalna struja koja može teći kroz supravodljivu zavojnicu ovisi o temperaturi, odnosno što je temperatura na kojoj sustav radi manja, veća struja može teći sustavom. Karakteristike SMES sustava su:

- vrlo nizak koeficijent samopražnjenja jer ne postoji otpor struji koja protječe (zbog niske temperature),
- velika specifična snaga,
- mala gustoća energije,
- učinkovitost ovakvog sustava je visoka (oko 95%),
- sposobnost injektiranja ili apsorpcije velike količine energije u kratkom vremenu,
- dug životni vijek,
- veliki investicijski troškovi.

Zbog svojih karakteristika SMES se koristi u slučajevima kao što su:

- potreba za kvalitetom električne energije,
- kao neprekinuti izvor napajanja,
- u stabilizaciji mreže,
- u regulaciji proizvodnje i potrošnje na lokalnoj razini.

Međutim, zbog velikih investicijskih troškova te nemogućnosti opskrbe sustava energijom na duže vrijeme, SMES još uvijek nije našao širu uporabu u EES-u [66, 67, 114].



Slika 2.25. SMES tehnologija [115]

U [116-119] SMES se proučavao u svrhu regulacije frekvencije, regulacije napona zajedno sa VE, regulacije proizvedene energije iz VE te za regulaciju napona u sustavu s VE. Dobiveni rezultati su pokazali vrlo učinkovito djelovanje SMES-a u smanjenju odstupanja frekvencije, koje je uzrokovano pojavom različitih opterećenja u sustavu. Također, SMES se pokazao učinkovitim rješenjem za stabilizaciju frekvencije i napona u sustavu s VE te u sustavu gdje se koristio u regulaciji proizvedene energije iz VE. Osim toga, pokazao se kao učinkovito rješenje za poboljšanje naponske stabilnosti.

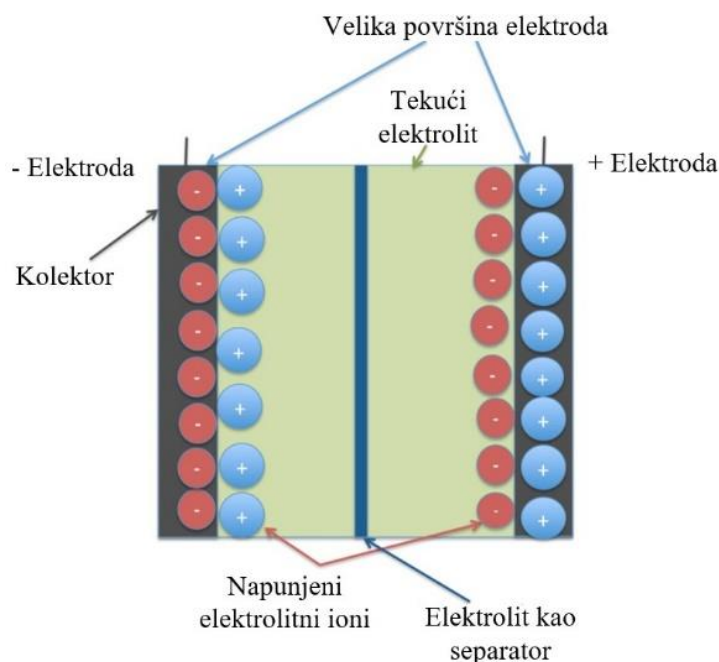
2.5. Superkondenzatori

Superkondenzatori se još nazivaju i ultrakondenzatori te svoj rad temelje na elektrokemijskim ćelijama koje sadrže dvije vodljive elektrode, elektrolit i membranu kao separator, pri čemu ioni prolaze kroz njega između dviju elektroda. Za razliku od baterija, u ćelijama superkondenzatora se ne odvijaju reakcije oksidacije i redukcije. Zapravo, ovu strukturu čine dva kondenzatora (elektrolit-negativna elektroda, elektrolit-pozitivna elektroda) te se zbog toga još nazivaju dvoslojni kondenzatori (slika 2.26). Spremljena energija u kondenzatorima je proporcionalna njihovom kapacitetu i kvadratu napona među stezaljkama ćelija, dok je kapacitet proporcionalan površini elektroda i obrnuto proporcionalan udaljenosti među njima. Glavna razlika između kondenzatora i superkondenzatora je korištenje poroznih elektroda s velikom površinom samih elektroda, omogućavajući pri tome veću gustoću energije od kondenzatora. Zbog malog napona koji vlada među ćelijama, željeni izlazni napon dobije se serijskim ili paralelnim spajanjem setova ćelija. Naime, najveći utjecaj na snagu, energiju i dinamičke promjene superkondenzatora ima materijal od kojeg su napravljene elektrode i elektrolit. Karakteristike superkondenzatora su:

- velika specifična snaga i gustoća snage ($\sim 2000-5000$ W/kg, $\sim 20000-30000$ W/l),
- mala specifična energija i gustoća energije ($\sim 2-5$ Wh/kg, 10 Wh/l),
- niski troškovi održavanja,
- visoki investicijske troškove.

Zbog malog otpora između elektroda i elektrolita, koeficijent samopražnjenja može doseći čak 20% nazivne snage za 12 sati pa zbog toga ovakav sustav ne može spremati energiju na duže vremena. Budući da im životni vijek prelazi preko milijun ciklusa punjenje/pražnjenje, superkondenzatori mogu bez narušavanja kvalitete isporučene energije sudjelovati u kratkotrajnim opskrbama energijom kao što je peglanje vršnog opterećenja, pad proizvodnje

flukuirajuće energije (iz IOIE)... Činjenica da im potrebno vrijeme za punjenje i pražnjenje do nazivne snage ne prelazi 30 s, čini ih najboljom tehnologijom za korištenje u sustavima gdje je potrebna velika snaga u kratkom vremenu. Zbog toga su pogodni za regulaciju frekvencije te zamjena za rotirajuću rezervu. S obzirom na druge tehnologije, superkondenzatori svoje namjene obavljaju u kratkom vremenu na vrlo ekonomičan način jer njihova učinkovitost ide prema 98%. Superkondenzatori mogu biti pouzdano rješenje u regulaciji napona te za pružanje stabilnosti u mikromrežama. Unatoč svim svojim dobrim karakteristikama superkondenzatori se zbog niske gustoće energije, velikog koeficijenta samopražnjenja te visokog investicijskog troška ne koriste u većoj mjeri za potrebe spremišta energije u EES-u, već imaju pomoćnu ulogu [66, 67, 120].



Slika 2.26. Superkondenzator [121]

Autori u [122-125] opisuju rad superkondenzatora u njihovim različitim primjenama. U [122] autori su koristili superkondenzatore za smanjenje fluktuacije napona i snage VE spojenih na mrežu. Rezultati su pokazali da su superkondenzatori pouzdano rješenje u promatranim slučajevima [122]. U [123, 124] autori su također proučavali rad superkondenzatora s ciljem smanjenja fluktuacija vjetera te su potvrdili njihovu korisnost u promatranom slučaju. U [125] autori su proučavali korištenje superkondenzatora za regulaciju frekvencije. Pokazalo se da je korištenje superkondenzatora u promatranom slučaju praktično i korisno rješenje te da donosi značajna poboljšanja u sustavu.

2.6. Zamašnjak

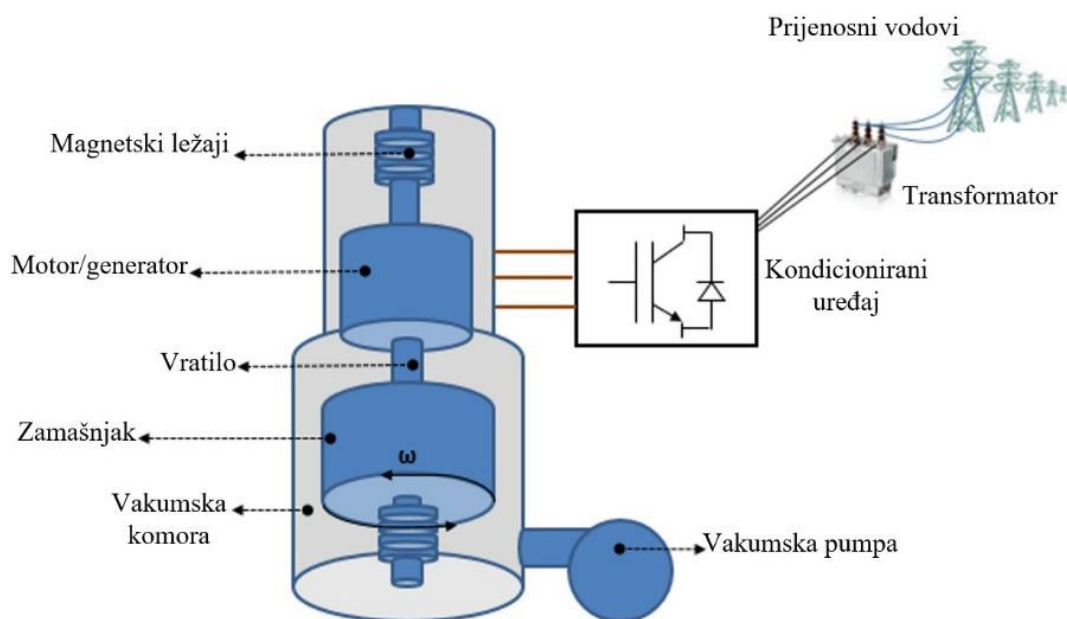
Tehnologija zamašnjaka je elektromehanički sustav koji svoju energiju pohranjuje u obliku kinetičke energije. Zamašnjak je spojen na motor/generator te rotira na mehaničkim ili magnetskim ležajima (kod magnetskih ležaja je manje trenje). Cjelokupni sustav (zamašnjak, ležaji, motor/generator) se najčešće nalazi u vakuumskoj komori zbog smanjenja trenja i gubitaka energije. Energija se sprema u zamašnjak na način da se pokrene motor koji ubrzava okretanje zamašnjaka, dok se energija iz zamašnjaka koristi na način da rotirajući zamašnjak pokreće generator koji tada usporava okretanje zamašnjaka (slika 2.27). Podjele zamašnjaka mogu biti različite, a to su:

- po izvedbi stroja motor/generator,
- po brzini okretanja zamašnjaka,
- po materijalu od kojeg se sastoji zamašnjak...

Glavne karakteristike cjelokupnom sustavu daje materijal korišten za komponente sustava te je bolji čvršći i laganiji materijal. Karakteristike sustava su:

- dobra učinkovitost (oko 90%),
- dug životni vijek,
- fleksibilna DoD,
- visoka gustoća snage i energije,
- niski troškovi održavanja,
- malo vrijeme odziva (otprilike 1 ms),
- dug životni vijek.

Važna značajka zamašnjaka je značajna snagu koju može pružiti u kratkom vremenu pa je pogodan za korištenje u regulacijama (regulacija frekvencije), u primjenama gdje je potrebna kvaliteta električne energije (smanjenje propada snage i kratkih beznaponskih stanja). Glavni nedostaci zamašnjaka kao spremišta energija su visoki gubici samopražnjenja (20% nazivne snage po satu) te nemogućnost dugoročne opskrbe što ga sprječava za korištenje kao dugotrajno spremište energije [66, 67].



Slika 2.27. Shematski prikaz zamašnjaka [126]

U [127] autori su proučavali rad zamašnjaka kao spremnika energije u svrhu smanjenja troška proizvodnje iz dizel agregata u sustavu koji se sastoji od zamašnjaka, dizel agregata, VE i mreže. Pokazalo se da korištenje zamašnjaka u promatranom sustavu doprinosi financijskoj uštedi.

Thatte, Zhang i Xie su [128] proučavali rad zamašnjaka u regulaciji energije i frekvencije VE. Iz dobivenih rezultata zaključilo se da zamašnjak u kombinaciji sa VE može predstavljati koordiniran rad sustava te da može doprinijeti boljem radu i većoj koristi samog sustava.

U [129] razvili su model koji daje optimalnu strategiju rada zamašnjaka u svrhu pružanja usluge regulacije frekvencije na dva različita tržišta. Dobiveni rezultati pokazuju da zamašnjak s optimiziranom strategijom rada pruža zajamčenu uslugu bez iznimke.

Lazarewicz i Rojas su u [130] istraživali rad zamašnjaka u regulaciji frekvencije. Naime, kada se pojavi višak energije u sustavu ona se sprema u obliku kinetičke energije u zamašnjaku. Rezultati potvrđuju da je tehnologija zamašnjaka korisno rješenje u pružanju regulacije frekvencije.

U [131] ispitivan je utjecaj rada zamašnjaka kao spremišta energije u otočnom sustavu koji se sastoji od dizel generatora, hidrogeneratora i VE. Uspoređivao se slučaj s i bez zamašnjaka u promatranom sustavu. Pokazalo se da prisutnost zamašnjaka uvelike poboljšava stabilnost samoga sustava, također omogućuje veće iskorištavanje energije i IOIE te smanjuje vrijeme korištenja dizel agregata, odnosno smanjuje troškove rada sustava.

3. USPOREDBA KARAKTERISTIKA SPREMIŠTA ENERGIJE

3.1. Osnovne karakteristike sustava

Svaka tehnologija spremanja ima svoje specifične karakteristike koje određuju upotrebljivost same tehnologije u različitim primjenama. Prije samog odabira prikladne tehnologije potrebno je napraviti analizu s obzirom na zahtjev sustava i svojstva spremišta te nakon toga izabrati najprikladnije rješenje [132]. Osnovne značajke po kojima se tehnologije spremišta razlikuju su:

- učinkovitost,
- nazivna snaga,
- kapacitet spremanja energije,
- vrijeme odziva,
- gustoća snage i energije,
- trajanje opskrbe energijom,
- vrijeme odziva,
- životni vijek,
- koeficijent samopražnjenja,
- tehnološka razvijenost...

Tablice 3.1 i 3.2 prikazuju spremišta energije s njihovim osnovnim karakteristikama, dok tablica 3.3 prikazuje tehnologije s njihovim početnim troškovima po jedinici snage i spremljene energije [13].

Tablica 3.1. Osnovne karakteristike tehnologija [133-135]

Tehnologija	Učinkovitost (%)	Nazivna snaga (MW)	Vrijeme odziva	Trajanje opskrbe energijom nazivnom snagom (h)	Kapacitet spremanja energije (MWh)	Koeficijent samopražnjenja (%/dan)
RHE	65-85	1-5000	min	1-24 ⁺¹	500-8000	0-0,02
CAES	50-89	<300	min	1-24+	<1000	0-1
Li-ion baterije	75-97	0,005-100	ms	0,017-2+	0,004-10	0,09-0,36
NaS baterije	75-92	<34	ms	4-8	244,8	0,05-1
Olovne baterije	80-82	0-40	ms	4-8	0,001-40	0,09-0,4
Protočne baterije	65-85	0,03-3	ms	2-12	<60	0-33,6
SMES	95-98	0-100	ms	$2,7 \cdot 10^{-7}$ - 0,0022	<20	10-15
Superkondenzatori	84-98	0-0,3	ms	$2,7 \cdot 10^{-7}$ -1+	0,00005	40
Zamašnjak	90-95	0,1-20	ms	$2,7 \cdot 10^{-7}$ - 0,25	<5	20-100

¹ + označava da vrijednost može biti i iznad gornje granice

Tablica 3.2. Osnovne karakteristike tehnologija [133-135]

Tehnologija	Životni vijek (godine; ciklusi)	Specifična energija (Wh/kg)	Specifična snaga (W/kg)	Gustoća energije (Wh/l)	Gustoća snage (W/l)	Tehnološka razvijenost
RHE	30-100; 12000-10 ⁵	0,5-1,5	0,01-0,12	0,5-2	0,01-1,5	Razvijeno
CAES	20-40; 10 ⁴ -10 ⁵	30-60	2,2-24	0,5-20	0,04-10	Razvijeno
Li-ion baterije	5-20; 500-2·10 ⁴	75-200	150-2000	90-500	1500-10 ⁴	Probna faza
NaS baterije	10-25; 10 ³ -10 ⁴	100-345	90-240	150-345	140-180	Komercijalizirano
Olovne baterije	3-15; 250-2500	25-50	75-300	25-90	10-400	Razvijeno
Protočne baterije	5-20; 300-14000	10-30	80-160	10-90	2,5-33,4	Probna faza
SMES	30; 10 ⁵	0,5-5	10 ⁷ -10 ⁹	0,2-2,5	10 ³ -4000	U razvoju
Superkondenzatori	10-30; >5·10 ⁴	0,05-20	500-10 ⁴	1-35	>10 ⁵	U razvoju, probna faza
Zamašnjak	15-25; 10 ⁵ -10 ⁶	5-100	400-1500	1-300	10 ³ -5000	Komercijalizirano

Tablica 3.3. Troškovi tehnologija [134, 136]

Tehnologija	Ukupni početni troškovi po jedinici snage (€/kW)	Ukupni početni troškovi po jedinici spremljene energije (€/kWh)	Troškovi rada i održavanja (€/kW/god)
RHE	1406	137	~2,7
CAES	1315	263	~17,1-22,5
Li-ion baterije	2512	546	~6,9
NaS baterije	2254	343	~72
Olovne baterije	2140	437	~45
Protočne baterije	1360	307	~63
SMES	218	6090	~18,5
Superkondenzatori	229	765	~5,4
Zamašnjak	867	4791	~18

Zamašnjak, superkondenzator, SMES te Li-ion baterija pokazuju najveći koeficijent korisnosti. Najbrže vrijeme odziva ima zamašnjak, superkondenzator te SMES, ali to su tehnologije koje imaju jedne od najvećih ukupnih troškova po jedinici spremljene energije. RHE i CAES su tehnologije koje imaju najveći kapacitet spremanja energije te su jedine sposobne pružiti konstantnu opskrbu energijom u trajanju od 24 sata, ali imaju jednu od najmanjih gustoća energije od svih spremišta. RHE ima visoke troškove po jedinici snage, ali jedne od najnižih troškova po jedinici energije i troškova rada i održavanja. Osim toga, potrebno

je puno vremena za njezinu izgradnju. Najveći dnevni koeficijent samopražnjenja ima zamašnjak te zbog toga nije prikladan za spremanje energije na duže vrijeme, za razliku od RHE koja ima jedan od nižih koeficijenata (tablica 3.1 i 3.2). Najveće početne troškove po jedinici snage ima Li-ion baterija, a najmanje SMES. Najveće početne troškove po jedinici spremljene energije ima SMES, a najmanje RHE. Najveće troškove rada i održavanja ima NaS baterija, dok najmanje ima RHE [13]. Tablica 3.4 ukratko prikazuje tehnologije sa njihovim najistaknutijim prednostima i manama te njihovom primjenom.

Tablica 3.4. Prednosti, mane i primjena tehnologija [132, 134]

Tehnologija	Prednost	Mana	Primjena
RHE	Tehnološki razvijena tehnologija, velik kapacitet spremišta i izlazna snaga, dug životni vijek	Zahtjeva posebno mjesto za izgradnju, dugo vrijeme izgradnje	Arbitraža, regulacija frekvencije, usluge balansiranja
CAES	Tehnološki razvijena tehnologija,	Zahtjeva posebno mjesto za izgradnju kao što su napušteni rudnici, ili spremišta soli	Arbitraža
Li-ion baterije	Visoka učinkovitost, dobra gustoća snage i energije	Visoki troškovi ulaganja	Regulacija snage, peglanje vršnog opterećenja, smanjenje fluktuacija
NaS baterije	Visoka gustoća snage i energije, visoka učinkovitost,	Visoki početni troškovi, smanjena sigurnost	Peglanje vršnog opterećenja, regulacija snage
Olovne baterije	Niski početni troškovi, visoka pouzdanost	Kratak životni vijek, visoki troškovi održavanja, značajan utjecaj na opkoliš	Peglanje vršnog opterećenja
Protočne baterije	Relativno visoka gustoća energije i snage, lako se nadograđuje	Relativno skupa, zahtjeva elektroniku	Peglanje vršnog opterećenja, regulacija snage
Superkondenzatori	Visoka gustoća snage, dug životni vijek, visoka učinkovitost, brzo pražnjenje	Visoki početni troškovi, niska gustoća energije	Kvaliteta energije, smanjenje fluktuacija
SMES	Visoka učinkovitost	Niska gustoća energije, skupa tehnologija	Kvaliteta energije
Zamašnjak	Velika gustoća snage, stabilan izlazni napon,	Niska gustoća energije, visok koeficijent samopražnjenja	Regulacija frekvencije, smanjenje fluktuacija

3.2. Primjene tehnologija za različite svrhe

3.2.1. Primarna regulacija frekvencije i radne snage

Na razne načine u EES-u može doći do nejednakosti između potrošnje i proizvodnje električne energije. Ako IOIE odstupaju od svoje predviđene proizvodnje (najčešće manjak proizvodnje), u EES-u će nastati neravnoteža koja se mora ispraviti aktiviranjem novih proizvodnih jedinica. Promatrajući vremensku skalu, mikropromjene u proizvodnji IOIE stvaraju promjenjivost i nepredvidljivost u dinamičkoj ravnoteži između potrošnje i proizvodnje. Tehnologije spremišta koje se uspješno nose s gore navedenim problemima moraju imati sposobnost opskrbe velike snage u što kraćem vremenu (10-20 MW/s) i mogućnost opskrbe nazivnom snagom najmanje 1h. Rješenje za navedene probleme su superkondenzatori, zamašnjaci, SMES i NaS baterija [133].

3.2.2. Sekundarna i tercijarna regulacija frekvencije i radne snage

Zahtjev za regulacijom snagom nastaje zbog sporih ali energetske velikih kolebanja u dnevnom zahtjevu za snagom. Zahtjevi za radnom snagom su manji tijekom noći, a veći tijekom dana. Tehnologija spremišta koja se koristi u ovu svrhu ne zahtijeva sposobnost opskrbe velikom snagom u što kraćem vremenu (0,3-1 MW/s) već je bitniji kapacitet spremanja i izlazna snaga. Da bi spremište koje sudjeluje na tržištu električne energije bilo isplativo te zadovoljilo potrebe EES-a, potrebno je spremanje i punjenje/praznjenje energije u periodu od nekoliko sati. U tu svrhu najčešće se koriste RHE te CAES. Također, NaS baterije su se pokazale dobrim rješenjem za ovu primjenu zbog mogućnosti praznjenja nekoliko sati nazivnom snagom (6-7h) [133].

3.2.3. Rotirajuća i nerotirajuća rezerva

Rotirajuća rezerva se definira kao neekorištena snaga generatora koja se može aktivirati po odluci operatora mreže. Koristi se za potrebe regulacije („regulacijska rezerva“) i u slučaju kvara (tzv. „havarijska rezerva“). Ona je sinkronizirana sa samim sustavom te ju je moguće koristiti unutar nekoliko sekundi. Nerotirajuća rezerva se definira kao rezerva koja nije sinkronizirana na sustav, ali se može aktivirati s određenim zakašnjenjem. Spremišta pogodna za ove primjene su: zamašnjaci, SMES, baterije, CAES i RHE [14].

3.2.4. Smanjenje vršnog opterećenja

Smanjenje vršnog opterećenja i izravnavanje („peglanje“) dijagrama opterećenja odnosi se na strategiju rada spremišta koji sprema energiju tijekom niskih opterećenja u sustavu (to su periodi kada je cijena električne energije niska) te je ponovno vraća u EES za vrijeme vršnih opterećenja. Vrijeme potrebno za peglanje je 1-10 h. Prikadne tehnologije spremišta su: RHE, CAES, baterije [14].

3.2.5. Sezonsko spremanje energije

Tehnologije spremišta energije pogodni za ovu primjenu moraju imati velik kapacitet spremanja energije i mali koeficijent samopraznjenja, dok su gustoća snage i koeficijent korisnosti od srednje važnosti. Sposobnost opskrbe velikom snagom u što kraćem vremenu je

neznačajno u ovoj primjeni spremišta. Pogodne tehnologije za sezonsko spremanje energije su RHE, protočne baterije i CAES [133].

3.2.6. Naponske smetnje

S obzirom na trajanje i promjenjivost naponskih smetnji, one se dijele na dugoročne (engl. *blackout*) i kratkoročne (engl. *voltage sags*) prekide, prenapone (engl. *voltage peaks*) i treperenje napona (engl. *voltage flicker*). Da bi se izbjeglo stanje *blackout-a* korisno rješenje je instalacija izvora neprekidnog napajanja (engl. *uninterruptible power supply* – UPS). Treperenje napona se može pojaviti u slučaju brze promjene proizvodnje IOIE ili potrošnje industrijskih i kućnih uređaja kao što su valjaonice, elektrolučne peći, oprema za zavarivanje te crpke. Tehnologije spremišta energije poput superkondenzatora, baterija i zamašnjaka mogu smanjiti već spomenute naponske smetnje u sustavu te ga učiniti pouzdanijim. Pojava mrežnog poremećaja u blizini spoja generatora na tu mrežu može uzrokovati pad napona koji ograničava izlaznu snagu samog generatora (engl. *low voltage ride-through* – LVRT). Ako generator daje veliku izlaznu snagu, a već postoji gore spomenuti kvar u mreži, doći će do nekontroliranog povećanja brzine turbine ili do naponskog poremećaja na istosmjernim sabirnicama. Spremišta energije koja mogu spriječiti spomenuto nekontrolirano povećanje brzine te stabilizirati napon na istosmjernim sabirnicama su superkondenzatori, zamašnjak, SMES [14].

3.2.7. Kvaliteta električne energije

Kvaliteta električne energije se svakodnevno narušava različitim uređajima i čimbenicima koji svojim radom i pojavom smanjuju stabilnost mreže. Ti čimbenici mogu biti VE kada dolazi do njihovog paljenja/gašenja, zatim FNE koje mogu uzrokovati nagle skokove u proizvodnji energije zbog prolaska oblaka iznad njih. Rad konvertera koji se koriste kod FNE i nekih VE generiraju neželjene harmonike koji mogu imati negativne utjecaje na elektroničku opremu. Tehnologije spremišta koje se koriste za rješavanje gore navedenih i njima sličnih problema zahtijevaju mogućnost velikog broja ciklusa punjenje/pražnjenje i brz odziv, a to su: zamašnjaci, superkondenzatori, SMES i baterije [133].

ZAKLJUČAK

Zbog činjenice da u svijetu raste udio promjenjive energije iz IOIE, sve veći problem postaje njihova integracija u EES. Jedno od rješenja je korištenje spremišta energije, koji će ublažiti njihov fluktuirajući karakter te omogućiti njihovu veću integraciju u EES. Kada se pojavi višak energije u sustavu spremište energije će spremiti taj višak koji će kasnije moći koristiti u periodima nedostatka energije u sustavu. Međutim, liberalizacijom tržišta električne energije ono se pretvara iz monopolnog u konkurentni sustav, omogućujući otvoreniji pristup i uslugama kojima se trguje na njima i sudionicima na njemu. U takvom okruženju, svi sudionici će imati jedan cilj, a to je smanjiti vlastite troškove odnosno povećati svoju zaradu.

RHE su tradicionalni, najveći i tehnički najrazvijeniji oblik spremanja energije u cijelom svijetu. Zbog svog niskog koeficijenta samopražnjenja pogodne su za spremanje velike količine energije na duže vrijeme. Efikasne su u obavljanju energetske arbitraže, a zbog brzine promjene režima rada (turbinski/pumpni režim) te brzog pokretanja, pogodne su za regulaciju energije, frekvencije i peglanje vršnog opterećenja. Budući da se mogu pokrenuti samostalno (neovisno o mreži) to ih čini idealnim kandidatom za crni start. Međutim, nedostatak im je u što zahtijevaju posebno mjesto za izgradnju (izgradnja im ovisi o karakteristikama terena te im je potrebno dugo vremena za izgradnju).

CAES ima vrlo nizak koeficijent samopražnjenja te je jedina tehnologija nakon RHE koja može skladištiti veliku količinu energije i imaju sposobnost (isto kao i RHE) pružiti konstantnu opskrbu energijom u trajanju od 24 sata. Zbog toga ih se smatra dobrim rješenjem za spremanje energije na duže razdoblje, regulaciju energije velikih IOIE te za energetske arbitraže. Nedostatak im je mala gustoća energije te, slično kao RHE, izgradnja im ovisi o karakteristikama terena.

Li-ion baterije imaju visok koeficijent učinkovitosti, veliku gustoću energije i specifičnu energiju, nisku stopu samopražnjenja te jednostavno održavanje. Brzo se pune i prazne. Prikladne su za primjenu gdje su važni vrijeme odziva i težina. Nedostatak im je visoki trošak ulaganja te nisu primjerene za uporabu u sigurnosnim radnjama gdje se mogu isprazniti do kraja.

NaS baterije imaju niski koeficijent samopražnjenja, lako im je održavanje te se lako recikliraju. Mogu se koristiti do snage od nekoliko MW, mogu raditi opskrbu mreže 6-7 sati što ih čini pogodnima kao spremišta energije u EES-u te u primarnoj i sekundarnoj regulaciji.

Olovne baterije imaju niski koeficijent samopražnjenja te su zbog toga pogodne za spremanje energije na duže vrijeme. Imaju niske početne troškove i visoku pouzdanost. Glavni nedostaci olovne baterije su visoki troškovi održavanja te kratak životni vijek. U industriji se koriste za stanja pripravnosti, odnosno služe kao sigurnosno napajanje gdje je bitan kontinuitet opskrbe električnom energijom.

Protočne baterije se mogu u potpunosti isprazniti bez ikakvih oštećenja te imaju vrlo nizak stupanj samopražnjenja, dug životni vijek, niske troškove održavanja te mogu skladištiti energiju tijekom dužeg razdoblja. Nedostaci su im visoki troškovi rada te niska specifična energija i gustoća energije. Koriste se za peglanje vršnog opterećenja, regulaciju frekvencije te kao spremište energije za EES.

SMES, superkondenzatori i zamašnjak, nisu pogodni za spremanje energije na duže razdoblje. Međutim, zbog svoje brzine djelovanja pogodni su u slučajevima gdje je potrebna velika snaga u kratkom vremenu. Najčešće se koriste za: poboljšanje kvalitete električne energije, u regulaciji frekvencije, smanjenju fluktuacija energije.

LITERATURA

- [1] Haas, J. i dr.: "Challenges and trends of energy storage expansion planning for flexibility provision in low-carbon power systems – a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 80, pp. 603-619, 2017.
- [2] Yunusov, T.; Zangs, M.; Holderbaum, W.: "Control of Energy Storage", *Energies*, Vol. 10, pp. 1010, 2017.
- [3] Baumgarte, F.; Glenk, G.; Rieger, A.: "Business Models and Profitability of Energy Storage", *iScience*, Vol. 23, No. 10, pp. 101554-101554, 2020.
- [4] Zach, K. i dr.: "Contribution of Bulk Energy Storage in Future Electricity Systems Facilitating Renewable Energy Expansion". 2012. p. 60.
- [5] Koohi-Kamali, S. i dr.: "Emergence of energy storage technologies as the solution for reliable operation of smart power systems: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 25, pp. 135–165, 2013.
- [6] Li, J.; Li, Z.; Wang, Y.: "Optimal bidding strategy for day-ahead power market", *2015 North American Power Symposium (NAPS)*, pp. 1-6, 2015.
- [7] Mathur, S. P. S.; Arya, A.; Dubey, M.: "Optimal bidding strategy for price takers and customers in a competitive electricity market", *Cogent Engineering*, Vol. 4, No. 1, pp. 1358545, 2017.
- [8] Táci, I.; Szorenyi, G.: "Pumped storage hydroelectric power plants: issues and applications", Budapest, Hungary: Paper Presented at the Energy Regulators Regional Association Secretariat (ERRAS), 2016.
- [9] "Hydropower status report". 2021, International Hydropower Association. p. 25.
- [10] Harby, A. i dr.: "Pumped Storage Hydropower". 2013. p. 597-618.
- [11] Dvorak, P.: "Challenges and opportunities for new pumped storage development". 2014.
- [12] Rehman, S.; Al-Hadhrami, L. M.; Alam, M. M.: "Pumped hydro energy storage system: A technological review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 44, pp. 586-598, 2015.
- [13] Evans, A.; Strezov, V.; Evans, T. J.: "Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 6, pp. 4141-4147, 2012.
- [14] Koohi-Kamali, S. i dr.: "Emergence of energy storage technologies as the solution for reliable operation of smart power systems: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 25, pp. 135-165, 2013.
- [15] Riabenko, O. i dr.: "Increasing the Role of Hydro and Pumped Storage Power Plants in Energy Systems Operation Management", *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, pp. 424-428, 2020.
- [16] Pérez-Díaz, J. I. i dr.: "Trends and challenges in the operation of pumped-storage hydropower plants", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 44, pp. 767-784, 2015.
- [17] Kanakasabapathy, P.; Shanti Swarup, K.: "Bidding strategy for pumped-storage plant in pool-based electricity market", *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, No. 3, pp. 572-579, 2010.

- [18] Kusakana, K.: "Optimal Operation Control of Pumped Hydro Storage in the South African Electricity Market", *Energy Procedia*, Vol. 143, pp. 804-810, 2017.
- [19] Tica, E.; Popa, B.; Popa, R.: "Annual Performance Estimation of a Multireservoir System Including a Pumped Storage Plant for the Mean Hydrological Year", *Journal of Energy Engineering*, Vol. 143, 2017.
- [20] Hering, P. i dr.: "Optimal scheduling of a pumped-storage hydro power plant operation", *2013 13th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, pp. 166-171, 2013.
- [21] Ak, M.; Kentel, E.; Savaseneril, S.: "Quantifying the revenue gain of operating a cascade hydropower plant system as a pumped-storage hydropower system", *Renewable Energy*, Vol. 139, pp. 739-752, 2019.
- [22] Kazempour, S. J.; Hosseinpour, M.; Moghaddam, M. P.: "Self-scheduling of a joint hydro and pumped-storage plants in energy, spinning reserve and regulation markets", *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1-8, 2009.
- [23] Chazarra, M.; Pérez-Díaz, J. I.; García-González, J.: "Value of perfect information of spot prices in the joint energy and reserve hourly scheduling of pumped storage plants", *2016 13th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, pp. 1-6, 2016.
- [24] Braun, S.: "Hydropower Storage Optimization Considering Spot and Intraday Auction Market", *Energy Procedia*, Vol. 87, pp. 36-44, 2016.
- [25] Braun, S. M.; Burkhardt, M.: "Trading of pumped storage hydropower plants on energy only and ancillary services markets", *2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, pp. 649-653, 2015.
- [26] Connolly, D. i dr.: "Practical operation strategies for pumped hydroelectric energy storage (PHES) utilising electricity price arbitrage", *Energy Policy*, Vol. 39, No. 7, pp. 4189-4196, 2011.
- [27] Ning, L.; Chow, J. H.; Desrochers, A. A.: "Pumped-storage hydro-turbine bidding strategies in a competitive electricity market", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 19, No. 2, pp. 834-841, 2004.
- [28] Tian, M.-W. i dr.: "Risk and profit-based bidding and offering strategies for pumped hydro storage in the energy market", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 256, pp. 120715, 2020.
- [29] Ruppert, L. i dr.: "An analysis of different pumped storage schemes from a technological and economic perspective", *Energy*, Vol. 141, pp. 368-379, 2017.
- [30] Chazarra, M.; Pérez-Díaz, J. I.; García-González, J.: "Optimal operation of variable speed pumped storage hydropower plants participating in secondary regulation reserve markets", *11th International Conference on the European Energy Market (EEM14)*, pp. 1-5, 2014.
- [31] Chazarra, M.; Pérez-Díaz, J. I.; García-González, J.: "Optimal Joint Energy and Secondary Regulation Reserve Hourly Scheduling of Variable Speed Pumped Storage Hydropower Plants", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 33, No. 1, pp. 103-115, 2018.
- [32] Lagarto, J. i dr.: "Optimal scheduling of a pumped storage hydro unit in the day-ahead and secondary reserve electricity market", *2015 12th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, pp. 1-5, 2015.

- [33] Chazarra, M.; Pérez-Díaz, J. I.; García-González, J.: "Optimal Energy and Reserve Scheduling of Pumped-Storage Power Plants Considering Hydraulic Short-Circuit Operation", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 32, No. 1, pp. 344-353, 2017.
- [34] Chazarra, M.; Pérez-Díaz, J. I.; García-González, J.: "Economic Viability of Pumped-Storage Power Plants Equipped with Ternary Units and Considering Hydraulic Short-Circuit Operation", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 813, pp. 012013, 2017.
- [35] Chazarra, M.; Pérez-Díaz, J. I.; García-González, J.: "Deriving Optimal End of Day Storage for Pumped-Storage Power Plants in the Joint Energy and Reserve Day-Ahead Scheduling", *Energies*, Vol. 10, No. 6, 2017.
- [36] Chazarra, M. i dr.: "Economic viability of pumped-storage power plants participating in the secondary regulation service", *Applied Energy*, Vol. 216, pp. 224-233, 2018.
- [37] Alharbi, H.; Bhattacharya, K.: "Participation of Pumped Hydro Storage in Energy and Performance-Based Regulation Markets", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 35, No. 6, pp. 4307-4323, 2020.
- [38] Vargas-Serrano, A. i dr.: "Economic benefit analysis of retrofitting a fixed-speed pumped storage hydropower plant with an adjustable-speed machine", *2017 IEEE Manchester PowerTech*, pp. 1-6, 2017.
- [39] Feng, J.-s.; Zhang, F.-q.; Yuan, B.: "Case Study on Scale Optimization of Pump-storage Variable Speed Units Based on Power System Operation Simulation", 2019.
- [40] Filipe, J. i dr.: "On the Profitability of Variable Speed Pump-Storage-Power in Frequency Restoration Reserve", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 813, pp. 012010, 2017.
- [41] Filipe, J. i dr.: "Optimal bidding strategy for variable-speed pump storage in day-ahead and frequency restoration reserve markets", *Energy Systems*, Vol. 10, No. 2, pp. 273-297, 2019.
- [42] Özyön, S.: "Optimal short-term operation of pumped-storage power plants with differential evolution algorithm", *Energy*, Vol. 194, pp. 116866, 2020.
- [43] Braun, S.; Hoffmann, R.: "Intraday Optimization of Pumped Hydro Power Plants in the German Electricity Market", *Energy Procedia*, Vol. 87, pp. 45-52, 2016.
- [44] Zhang, J. i dr.: "Research on calling sequence of peaking regulation means in power system with pumped hydro power (PHP) station", *2017 2nd International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)*, pp. 543-547, 2017.
- [45] Yang, W.; Yang, J.: "Advantage of variable-speed pumped storage plants for mitigating wind power variations: Integrated modelling and performance assessment", *Applied Energy*, Vol. 237, pp. 720-732, 2019.
- [46] Nag, S.; Lee, K. Y.: "Network and Reserve Constrained Economic Analysis of Conventional, Adjustable-Speed and Ternary Pumped-Storage Hydropower", *Energies*, Vol. 13, No. 16, 2020.
- [47] Tade, S. V.; Ghate, V. N.; Kalage, A. A.: "Economic Operation of Pumped Hydro Storage Plant using Teaching Learning based Optimization (TLBO) Algorithm", *2017 International Conference on Current Trends in Computer, Electrical, Electronics and Communication (CTCEEC)*, pp. 864-869, 2017.
- [48] Brown, P. D.; Lopes, J. A. P.; Matos, M. A.: "Optimization of Pumped Storage Capacity in an Isolated Power System With Large Renewable Penetration", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 23, No. 2, pp. 523-531, 2008.

- [49] Khatod, D. K.; Pant, V.; Sharma, J.: "Optimized daily scheduling of wind-pumped hydro plants for a day-ahead electricity market system", *2009 International Conference on Power Systems*, pp. 1-6, 2009.
- [50] Kumar, M.; Saini, P.; Kumar, N.: "Optimization of wind-pumped storage hydro power system", *International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences*, Vol. 4, No. 4, pp. 67-75, 2016.
- [51] Duque, Á. J. i dr.: "Optimal operation of a pumped-storage hydro plant that compensates the imbalances of a wind power producer", *Electric Power Systems Research*, Vol. 81, No. 9, pp. 1767-1777, 2011.
- [52] Al-Swaiti, M.; Al-Awami, A.; Khalid, M.: "Co-optimized Trading of Wind-Thermal-Pumped Storage System in Energy and Regulation Markets", *Energy*, Vol. 138, 2017.
- [53] Cerejo, A. i dr.: "Hydro-wind Optimal Operation for Joint Bidding in Day-ahead Market: Storage Efficiency and Impact of Wind Forecasting Uncertainty", *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, Vol. 8, No. 1, pp. 142-149, 2020.
- [54] Xia, P. i dr.: "MILP Based Robust Short-Term Scheduling for Wind-Thermal-Hydro Power System With Pumped Hydro Energy Storage", *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 30261-30275, 2019.
- [55] Yao, L. i dr.: "Optimal day-ahead coordination on wind-pumped-hydro system by using multiobjective multistage model", *International Journal of Energy Research*, Vol. 44, 2020.
- [56] Green, H.; Sanduk, M.: "Development of a Wind Turbine System With Energy Storage in the Form of Hydropower", 2013.
- [57] Castronuovo, E. D.; Lopes, J. A. P.: "On the optimization of the daily operation of a wind-hydro power plant", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 19, No. 3, pp. 1599-1606, 2004.
- [58] Šćekić, L.; Mujović, S.; Radulović, V.: "Pumped Hydroelectric Energy Storage as a Facilitator of Renewable Energy in Liberalized Electricity Market", *Energies*, Vol. 13, No. 22, 2020.
- [59] Liu, L. i dr.: "Evaluating the benefits of Integrating Floating Photovoltaic and Pumped Storage Power System", *Energy Conversion and Management*, Vol. 194, pp. 173-185, 2019.
- [60] Miao, M. i dr.: "Research on Optimizing Operation of Hybrid PV Power and Pumped Hydro Storage System", *Energy Procedia*, Vol. 118, pp. 110-118, 2017.
- [61] Xu, X. i dr.: "Optimal Operation of Photovoltaic-Pump Hydro Storage Hybrid System", 2018.
- [62] Mousavi, N. i dr.: "Modelling, design, and experimental validation of a grid-connected farmhouse comprising a photovoltaic and a pumped hydro storage system", *Energy Conversion and Management*, Vol. 210, pp. 112675, 2020.
- [63] Kocaman, A. S.; Modi, V.: "Value of pumped hydro storage in a hybrid energy generation and allocation system", *Applied Energy*, Vol. 205, pp. 1202-1215, 2017.
- [64] Margeta, J.; Glasnovic, Z.: "Feasibility of the green energy production by hybrid solar+hydro power system in Europe and similar climate areas", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 6, pp. 1580-1590, 2010.

- [65] Ma, T. i dr.: "Pumped storage-based standalone photovoltaic power generation system: Modeling and techno-economic optimization", *Applied Energy*, Vol. 137, pp. 649-659, 2015.
- [66] Robyns, B. i dr.: "Energy Storage in Electric Power Grids", 2015.
- [67] Díaz-González, F. i dr.: "A review of energy storage technologies for wind power applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 4, pp. 2154-2171, 2012.
- [68] Arabkoohsar, A.: "Compressed air energy storage system". 2021. p. 45-71.
- [69] Khatami, R.; Oikonomou, K.; Parvania, M.: "Look-Ahead Optimal Participation of Compressed Air Energy Storage in Day-Ahead and Real-Time Markets", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 11, No. 2, pp. 682-692, 2020.
- [70] Khatami, R.; Oikonomou, K.; Parvania, M.: "Optimal Participation of Compressed Air Energy Storage in Energy and Ancillary Service Markets", *2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, pp. 1-5, 2018.
- [71] Nojavan, S. i dr.: "Optimal bidding and offering strategies of merchant compressed air energy storage in deregulated electricity market using robust optimization approach", *Energy*, Vol. 142, pp. 250-257, 2018.
- [72] Shafiee, S. i dr.: "Risk-Constrained Bidding and Offering Strategy for a Merchant Compressed Air Energy Storage Plant", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 32, No. 2, pp. 946-957, 2017.
- [73] Lund, H. i dr.: "Optimal operation strategies of compressed air energy storage (CAES) on electricity spot markets with fluctuating prices", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, No. 5, pp. 799-806, 2009.
- [74] Narayan Dash, S. i dr.: "A robust optimization method for bidding strategy by considering the compressed air energy storage", *Sustainable Cities and Society*, Vol. 48, pp. 101564, 2019.
- [75] Arabkoohsar, A. i dr.: "Thermo-economic analysis and sizing of a PV plant equipped with a compressed air energy storage system", *Renewable Energy*, Vol. 83, 2015.
- [76] Bansal, M.; Dhillon, J.; Virmani, R.: "Development of Operation Strategy for a Solar PV-CAES Based System in Market Scenario", *2016 Second International Conference on Computational Intelligence & Communication Technology (CICIT)*, pp. 362-365, 2016.
- [77] Kahrobaee, S.; Asgarpour, S.: "Optimum planning and operation of compressed air energy storage with wind energy integration", *2013 North American Power Symposium (NAPS)*, pp. 1-6, 2013.
- [78] Daneshi, H.; Srivastava, A. K.; Daneshi, A.: "Generation scheduling with integration of wind power and compressed air energy storage", *IEEE PES T&D 2010*, pp. 1-6, 2010.
- [79] Manchester, S.; Swan, L.: "Compressed Air Storage and Wind Energy for Time-of-day Electricity Markets", *Procedia Computer Science*, Vol. 19, pp. 720-727, 2013.
- [80] Abbaspour, M. i dr.: "Optimal operation scheduling of wind power integrated with compressed air energy storage (CAES)", *Renewable Energy*, Vol. 51, pp. 53-59, 2013.
- [81] Akbari, E. i dr.: "Stochastic programming-based optimal bidding of compressed air energy storage with wind and thermal generation units in energy and reserve markets", *Energy*, Vol. 171, pp. 535-546, 2019.

- [82] Foley, A.; Díaz Lobera, I.: "Impacts of compressed air energy storage plant on an electricity market with a large renewable energy portfolio", *Energy*, Vol. 57, pp. 85-94, 2013.
- [83] Sedighizadeh, M.; Esmaili, M.; Mousavi-Taghiabadi, S. M.: "Optimal joint energy and reserve scheduling considering frequency dynamics, compressed air energy storage, and wind turbines in an electrical power system", *Journal of Energy Storage*, Vol. 23, pp. 220-233, 2019.
- [84] Succar, S.; Denkenberger, D. C.; Williams, R. H.: "Optimization of specific rating for wind turbine arrays coupled to compressed air energy storage", *Applied Energy*, Vol. 96, pp. 222-234, 2012.
- [85] Divya, K. C.; Østergaard, J.: "Battery energy storage technology for power systems—An overview", *Electric Power Systems Research*, Vol. 79, No. 4, pp. 511-520, 2009.
- [86] Dehghani-Sanij, A. R. i dr.: "Study of energy storage systems and environmental challenges of batteries", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 104, pp. 192-208, 2019.
- [87] "Baš malo o litij-ion baterijama", s Interneta, <https://e-radionica.com/hr/blog/2016/07/13/bas-malo-o-litij-ion-baterijama/>,
- [88] Horiba, T.: "Lithium-Ion Battery Systems", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 102, No. 6, pp. 939-950, 2014.
- [89] Liu, J.; Wang, Z.; Hu, C.: "Optimizing Size of Lithium-Ion Battery Combined with PV Generation", *2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, pp. 1-6, 2019.
- [90] Fleeer, J. i dr.: "Techno-economic evaluation of battery energy storage systems on the primary control reserve market under consideration of price trends and bidding strategies", *The Journal of Energy Storage*, Vol. 17, 2018.
- [91] Olk, C.; Sauer, D. U.; Merten, M.: "Bidding strategy for a battery storage in the German secondary balancing power market", *Journal of Energy Storage*, Vol. 21, pp. 787-800, 2019.
- [92] Merten, M. i dr.: "Bidding strategy for battery storage systems in the secondary control reserve market", *Applied Energy*, Vol. 268, pp. 114951, 2020.
- [93] Maeyaert, L.; Vandeveld, L.; Döring, T.: "Battery Storage for Ancillary Services in Smart Distribution Grids", *Journal of Energy Storage*, Vol. 30, pp. 101524, 2020.
- [94] Heredia, F. J.; Cuadrado, M. D.; Corchero, C.: "On optimal participation in the electricity markets of wind power plants with battery energy storage systems", *Computers & Operations Research*, Vol. 96, pp. 316-329, 2018.
- [95] Terlouw, T. i dr.: "Multi-objective optimization of energy arbitrage in community energy storage systems using different battery technologies", *Applied Energy*, Vol. 239, pp. 356-372, 2019.
- [96] "Electrochemistry chemical change and electrical work", s Interneta, <https://fddocuments.in/document/chapter-21-electrochemistry-chemical-change-and-electrical-work-56b02196886e4.html>,
- [97] Ippolito, M. G. i dr.: "Economic feasibility of a customer-side energy storage in the Italian electricity market", *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, pp. 938-943, 2015.

- [98] Jurković, K.; Pandžić, H.; Kuzle, I.: "Robust unit commitment with large-scale battery storage", *2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1-5, 2017.
- [99] Kazempour, S. J.; Moghaddam, M. P.: "Economic viability of NaS battery plant in a competitive electricity market", *2009 International Conference on Clean Electrical Power*, pp. 453-459, 2009.
- [100] Almarzooqi, A. i dr.: "Optimizing Operations of Sodium Sulfur (NAS) Large-scale Battery Storage", *2020 IEEE 11th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, pp. 159-163, 2020.
- [101] Kazempour, S. J. i dr.: "Coupling fuel-constrained power plant and NaS battery system for profit increment in a competitive electricity market", *2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, pp. 1-9, 2009.
- [102] May, G. J.; Davidson, A.; Monahov, B.: "Lead batteries for utility energy storage: A review", *Journal of Energy Storage*, Vol. 15, pp. 145-157, 2018.
- [103] "Lead-acid battery", s Interneta, <https://www.off-grid-europe.com/info/lead-acid-battery/>,
- [104] Nguyen, M. Y.: "A New Battery Energy Storage Charging/Discharging Scheme for Wind Power Producers in Real-Time Markets", *Energies*, Vol. 5, pp. 5439-5452, 2012.
- [105] Akbari-Dibavar, A. i dr.: "Optimal Battery Storage Arbitrage Considering Degradation Cost in Energy Markets", *2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 929-934, 2020.
- [106] Daud, M. Z.; Mohamed, A.; Hannan, M. A.: "An improved control method of battery energy storage system for hourly dispatch of photovoltaic power sources", *Energy Conversion and Management*, Vol. 73, pp. 256-270, 2013.
- [107] Mallol-Poyato, R. i dr.: "Optimal discharge scheduling of energy storage systems in MicroGrids based on hyper-heuristics", *Renewable Energy*, Vol. 83, 2015.
- [108] "Redox flow battery", s Interneta, <http://impress-energystorage.com/redox-flow-battery/>,
- [109] Buiskikh, D. i dr.: "Economic Feasibility of Flow Batteries in Grid-Scale Applications", *2018 15th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, pp. 1-5, 2018.
- [110] Adebayo, A. i dr.: "Economic viability of price arbitrage operation of vanadium redox battey in Alberta's energy market", 2016.
- [111] Lucas, A.; Chondrogiannis, S.: "Smart grid energy storage controller for frequency regulation and peak shaving, using a vanadium redox flow battery", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 80, pp. 26-36, 2016.
- [112] Resch, M. i dr.: "Technical and economic comparison of grid supportive vanadium redox flow batteries for primary control reserve and community electricity storage in Germany", *International Journal of Energy Research*, Vol. 43, No. 1, pp. 337-357, 2019.
- [113] Turker, B. i dr.: "Utilizing a vanadium redox flow battery to avoid wind power deviation penalties in an electricity market", *Energy Conversion and Management*, Vol. 76, pp. 1150-1157, 2013.
- [114] Breeze, P.: "Chapter 5 - Superconducting Magnetic Energy Storage", *Power System Energy Storage Technologies*, P. Breeze, Editor. 2018, Academic Press. p. 47-52.

- [115] Mutarraf, M. U. i dr.: "Energy Storage Systems for Shipboard Microgrids—A Review", *Energies*, Vol. 11, No. 12, 2018.
- [116] Mufti, M.-U. D. i dr.: "Improved load frequency control with superconducting magnetic energy storage in interconnected power systems", *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 2, pp. 387-397, 2007.
- [117] Kim, A. R. i dr.: "Operating Characteristic Analysis of HTS SMES for Frequency Stabilization of Dispersed Power Generation System", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 20, No. 3, pp. 1334-1338, 2010.
- [118] Nomura, S. i dr.: "Wind farms linked by SMES systems", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 15, No. 2, pp. 1951-1954, 2005.
- [119] Shi, J. i dr.: "Application of SMES in wind farm to improve voltage stability", *Physica C: Superconductivity*, Vol. 468, No. 15, pp. 2100-2103, 2008.
- [120] Glass, E.; Glass, V.: "Enabling supercapacitors to compete for ancillary services: An important step towards 100 % renewable energy", *The Electricity Journal*, Vol. 33, No. 5, pp. 106763, 2020.
- [121] Aslani, M.: "Electrochemical double layer capacitors (supercapacitors)", Stanford University, 2012.
- [122] Muyeen, S. M. i dr.: "Application of energy capacitor system (ECS) to wind power generation", *Wind Energy*, Vol. 11, pp. 335-350, 2008.
- [123] Kinjo, T. i dr.: "Output levelling of renewable energy by electric double-layer capacitor applied for energy storage system", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 21, No. 1, pp. 221-227, 2006.
- [124] Kinjo, T. i dr.: "Output levelling of wind power generation system by EDLC energy storage", *30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004*, Vol. 3, pp. 3088-3093 Vol. 3, 2004.
- [125] Mufti, M. u. d. i dr.: "Super-capacitor based energy storage system for improved load frequency control", *Electric Power Systems Research*, Vol. 79, No. 1, pp. 226-233, 2009.
- [126] Nikolaidis, P.; Poullikkas, A.: "A comparative review of electrical energy storage systems for better sustainability", *Journal of power technologies*, 2017.
- [127] Leclercq, L.; Robyns, B.; Grave, J.-M.: "Control based on fuzzy logic of a flywheel energy storage system associated with wind and diesel generators", *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 63, No. 3, pp. 271-280, 2003.
- [128] Thatte, A. A.; Zhang, F.; Xie, L.: "Coordination of wind farms and flywheels for energy balancing and frequency regulation", *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-7, 2011.
- [129] Zhang, F. i dr.: "Effective flywheel energy storage (FES) offer strategies for frequency regulation service provision", *2014 Power Systems Computation Conference*, pp. 1-7, 2014.
- [130] Lazarewicz, M. L.; Rojas, A.: "Grid frequency regulation by recycling electrical energy in flywheels", *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004.*, pp. 2038-2042 Vol.2, 2004.
- [131] Hamsic, N. i dr.: "Increasing Renewable Energy Penetration in Isolated Grids Using a Flywheel Energy Storage System", *2007 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, pp. 195-200, 2007.

- [132] Daim, T. U. i dr.: "Evaluation of energy storage technologies for integration with renewable electricity: Quantifying expert opinions", *Environmental Innovation and Societal Transitions*, Vol. 3, pp. 29-49, 2012.
- [133] Beaudin, M. i dr.: "Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review", *Energy for Sustainable Development*, Vol. 14, No. 4, pp. 302-314, 2010.
- [134] Bullich-Massagué, E. i dr.: "A review of energy storage technologies for large scale photovoltaic power plants", *Applied Energy*, Vol. 274, pp. 115213, 2020.
- [135] Liu, J. i dr.: "Uses, Cost-Benefit Analysis, and Markets of Energy Storage Systems for Electric Grid Applications", *Journal of Energy Storage*, Vol. 32, pp. 101731, 2020.
- [136] Zakeri, B.; Syri, S.: "Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 42, pp. 569-596, 2015.

POPIS OZNAKA I KRATICA

ASM	tržište pomoćnih usluga
BU	dvodijelna izvedba stroja
CAES	tehnologija spremišta stlačenog zraka
CO ₂	ugljikov dioksid
DAM	tržište za dan unaprijed
DoD	dubina pražnjenja
d	ispust vode
d _p	količina pumpane vode
dr.	drugo
d _t	količina ispuštene vode u turbinskom režimu
e ⁻	elektron
EES	elektroenergetski sustav
engl	engleski
FNE	fotonaponska elektrana
god	godina
GW	gigavat
h	sat
H ⁺	vodikov ion
HE	hidroelektrana
HSC	hidraulični kratki spoj
IOIE	intermitirajući obnovljivi izvori energije
kg	kilogram
kW	kilovat
kWh	kilovatsat
l	litra
Li-ion	litij-ionska baterija
LVRT	pojava specifičnog pada napona u blizini generatora
m	metar
MIBEL	Pirinejsko tržište električne energije
MILSP	kombinirano cjelobrojna linearna stohastička metoda
MINLP	kombinirano cjelobrojna nelinearna metoda
ms	milisekunda
MW	megavat
MWh	megavatsat
Na ⁺	natrijev ion
NaS	natrij sumporna baterija
O ²⁻	kisikov ion
OIE	obnovljivi izvori energije
P	snaga
RHE	reverzibilne hidroelektrane
s	sekunda
S ²⁻	sumporov ion
SMES	tehnologija spremanja pomoću superzavojnice
TE	termoelektrana
TU	trodijelna izvedba stroja
tj	to jest
UPS	izvor neprekidnog napajanja
V ²⁺ , V ³⁺ , V ⁴⁺ , V ⁵⁺	vanadijevi ioni
VE	vjetroelektrana

VRB	vanadijska redoks baterija
W	vat
Wh	vatsat
\$	dolar
%	postotak
€	euro
°C	stupanj Celzijev

SAŽETAK

U ovom radu dan je pregled spremnika energije koji se koriste za potrebe EES-a, a pogodni su za korištenje na tržištu električne energije. Budući da se tehnologije spremišta razlikuju po svojim karakteristikama, također su prikazane i uspoređene osnovne karakteristike spremišta. U uvodnom dijelu rada opisani su problemi današnjeg EES-a s obzirom na sve veći udio energije iz IOIE te liberalizacije tržišta, odnosno prelaska sa monopolnog sustava u konkurentni.

U drugom poglavlju opisani su spremnici energije korišteni u EES-u i tržištu električne energije. U prvom potpoglavlju opisana je tehnologija RHE, u drugom tehnologija komprimiranog (stlačenog) zraka, dok su u trećem potpoglavlju opisane baterije (Li-ion baterija, olovna baterija, NaS baterija i protočna redoks baterija). Četvrto, peto i šesto potpoglavlje opisuju tehnologije superkondenzatora, SMES-a i zamašnjaka.

Treće poglavlje daje pregled, opisuje i uspoređuje osnovne karakteristike svih spomenutih spremišta energije. Također, daje kratak pregled usluga u kojima se koriste navedena spremišta te na kraju njihovu primjenu u spomenutim uslugama.