

Primjena spremnika energije u prijenosnim mrežama

Dokozić, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:553107>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-05**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**PRIMJENA SPREMNIKA ENERGIJE U PRIJENOSNIM
MREŽAMA**

Rijeka, rujan 2022.

Ivan Dokozić
0069075064

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**PRIMJENA SPREMNIKA ENERGIJE U PRIJENOSNIM
MREŽAMA**

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Dubravko Franković

Komentor: Doc. dr. sc. Tomislav Plavšić

Rijeka, rujan 2022.

Ivan Dokozić
0069075064

Rijeka, 21. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**
Predmet: **Vođenje elektroenergetskog sustava**
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Ivan Dokozić (0069075064)**
Studij: **Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike**
Modul: **Elektroenergetika**

Zadatak: **Primjena spremnika energije u prijenosnim mrežama / Application of battery energy storage systems in transmission networks**

Opis zadatka:

Povećanje udjela nestalnih obnovljivih izvora energije u elektroenergetskom sustavu dovodi do povećanih potreba za izvorima fleksibilnosti, kojima će biti moguće uravnotežiti nestalnu proizvodnju te osigurati potrebnu regulacijsku pričuvu. U radu je potrebno opisati tehnologije za skladištenje energije uz poseban naglasak na baterijske spremnike energije (BSE) i njihovu ulogu u prijenosnim mrežama. Objasniti moguće primjene BSE kao pružatelja pomoćnih usluga operatoru prijenosnog sustava (regulacija frekvencije, upravljanje zagušenjem, minimizacija troškova rada sustava, uravnoteženje sustava). Utjecaj priključenja BSE na prijenosnu mrežu ispitati na simulacijskom modelu.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.



Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:




Prof. dr. sc. Dubravko Franković



Doc. dr. sc. Tomislav Plavšić (komentor)

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:



Prof. dr. sc. Viktor Sučić

IZJAVA

Sukladno s člankom 8. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, od siječnja 2020. godine, izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad pod naslovom „Primjena spremnika energije u prijenosnim mrežama“ uz konzultacije s mentorom izv. prof. dr. sc. Dubravkom Frankovićem i s komentorom doc. dr. sc. Tomislavom Plavšićem.

Rijeka, rujan 2022.

Ivan Dokozić



ZAHVALA

Iznimno se zahvaljujem mentoru i profesoru izv. prof. dr. sc. Dubravku Frankoviću te komentoru i profesoru doc. dr. sc. Tomislavu Plavšiću, na stručnom mentorstvu i savjetovanju tijekom izrade ovog diplomskog rada. Isto tako, zahvaljujem se preostalim profesorima, asistentima i drugim suradnicima na Tehničkom fakultetu u Rijeci, na prenesenom znanju i iskustvu rješavanja inženjerske problematike. Konačno, neizmjernu zahvalnost pridajem svojoj obitelji i prijateljima na svim oblicima podrške i razumijevanja tijekom diplomskog studija.

SADRŽAJ

| | |
|--|----|
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. TEHNOLOGIJE SKLADIŠTENJA ENERGIJE | 2 |
| 2.1. Osnovni pojmovi i karakteristike..... | 3 |
| 2.2. Podjela prema vremenu trajanja | 7 |
| 2.3. Mehanički sustavi | 9 |
| 2.3.1. Reverzibilne hidroelektrane (PHES)..... | 9 |
| 2.3.2. Pohrana komprimiranog zraka (CAES) | 12 |
| 2.3.3. Zamašnjaci..... | 15 |
| 2.4. Električni sustavi | 17 |
| 2.4.1. Ultrakondenzatori..... | 17 |
| 2.4.2. Supravodljivi magneti (SMES)..... | 19 |
| 2.5. Kemijski sustavi..... | 20 |
| 2.5.1. Tehnologije kemijske konverzije (P2G) - pohrana vodika i metana | 21 |
| 2.6. Elektrokemijski sustavi | 24 |
| 2.6.1. Baterijski spremnici (baterije) | 24 |
| 2.6.2. Protočne baterije | 27 |
| 2.7. Toplinski sustavi..... | 28 |
| 2.7.1. Pohrana osjetne topline | 29 |
| 2.7.2. Pohrana latentne topline | 30 |
| 2.7.3. Termokemijska pohrana energije..... | 32 |
| 3. BATERIJSKI SPREMNICI ENERGIJE (BSE) | 34 |
| 3.1. Osnovne značajke baterijskih spremnika | 34 |
| 3.2. Usporedba tehnologija baterijskih spremnika | 36 |
| 3.2.1. Olovno-kiselinske baterije..... | 37 |
| 3.2.2. Baterije na bazi nikla (Ni-Cd, Ni-MH) | 39 |
| 3.2.3. Natrij-sumpor baterije (NaS) | 41 |
| 3.2.4. Litij-ionske baterije (Li-ion)..... | 42 |
| 3.2.5. Natrij-nikal-klorid ($Na - NiCl_2$) | 43 |
| 3.2.6. Cink-zrak baterije..... | 44 |
| 3.2.7. Vanadij redoks protočne baterije (VRB)..... | 45 |
| 3.2.8. Željezo-krom protočne baterije (Fe-Cr) | 47 |
| 3.2.9. Cink-brom protočne baterije (ZnBr) | 48 |

| | |
|---|----|
| 4. PRIMJENA BSE U PRIJENOSNOJ MREŽI | 50 |
| 4.1. Integracija s OIE i smanjenje emisija stakleničkih plinova | 50 |
| 4.2. Povećanje kvalitete električne energije | 52 |
| 4.3. Odgoda nadogradnje prijenosne mreže | 54 |
| 4.4. Osiguranje N-1 kriterija sigurnosti | 55 |
| 4.5. Minimizacija troškova rada sustava | 57 |
| 4.6. Primjena BSE kao pružatelja pomoćnih usluga OPS-u | 60 |
| 4.6.1. Upravljanje zagušenjima u mreži | 60 |
| 4.6.2. Uravnoteženje elektroenergetskog sustava | 62 |
| 4.6.3. Frekvencijska stabilnost i regulacijska rezerva | 63 |
| 4.6.4. Naponska stabilnost | 65 |
| 4.6.5. Crni start | 67 |
| 5. SIMULACIJA PRIKLJUČENJA BSE NA PRIJENOSNU MREŽU | 69 |
| 5.1. Analiza prijenosne mreže i BSE | 70 |
| 5.2. Simulacijski scenariji | 73 |
| 5.2.1. Normalno pogonsko stanje | 73 |
| 5.2.2. Minimalno opterećenje istarskog podsustava uz ispad TE Plomin | 75 |
| 5.2.3. Maksimalno opterećenje istarskog podsustava uz ispad TE Plomin | 76 |
| 5.3. Prednosti priključenja BSE | 79 |
| 6. ZAKLJUČAK | 80 |
| 7. LITERATURA | 82 |
| 8. POPIS OZNAKA I KRATICA | 86 |
| 9. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI | 87 |
| 10. ABSTRACT AND KEYWORDS | 88 |

1. UVOD

Električnom energijom opskrbljuju se krajnji potrošači putem prijenosnih i distribucijskih mreža. Proizvodnja električne energije najvećim udjelom odvija se iz konvencionalnih elektrana na tradicionalna fosilna goriva poput nafte, ugljena i plina te velikih hidroelektrana i nuklearnih elektrana. Provedbom raznih istraživanja, ali i razvojem mjerne tehnologije, uvidjelo se da su fosilne elektrane velikim udjelom odgovorne za emitiranje značajne količine emisija stakleničkih plinova poput ugljičnog dioksida (CO_2). Emisije stakleničkih plinova uvelike negativno utječu na atmosferu, prvenstveno povećanjem prosječne srednje temperature Zemlje. Iz toga razloga, odlučeno je provesti energetske tranzicije kojom se nastoji smanjiti udio konvencionalnih elektrana u energetske sektoru i zamijeniti ih s ekološki prihvatljivim obnovljivim izvorima energije. Obnovljivi izvori energije poput vjetroelektrana ili solarnih elektrana su izvori električne energije s nultom emisijom stakleničkih plinova. Međutim, značajan problem obnovljivih izvora energije predstavlja nestalna proizvodnja električne energije. Za razliku od konvencionalnih elektrana čija proizvodnja gotovo isključivo ovisi o količini dobavljenog energenta ili goriva, kod obnovljivih izvora energije proizvodnja električne energije ponajviše ovisi o atmosferskim uvjetima i prilikama. Za vjetroelektrane to je količina iskoristivog vjetra, a kod solarnih elektrana to je količina iskoristivog sunčevog zračenja. Zbog neravnomjerne i nestalne proizvodnje takvih izvora, potrebno je implementirati spremnike energije. Spremnici energije uravnotežuje se proizvodnja nestalne i promjenjive električne energije te se ostvaruju brojne pomoćne usluge iskoristive operatoru prijenosnog sustava. Spremnici energije mogu se implementirati u prijenosnu mrežu u sklopu obnovljivih izvora energije, konvencionalnih elektrana ili zasebno te tako omogućiti ostvarenje cilja energetske tranzicije i smanjenje broja aktivnih elektrana na fosilna goriva.

U daljnjem radu, prikazane su tehnologije skladištenja energije uz prikaz karakterističnih veličina, načina djelovanja, potencijalnih prednosti i nedostataka. Tehnologije su klasificirane u zasebne skupine uz uvažavanje kriterija strukture spremnika, oblika pohranjene energije i principa djelovanja. Svaka skupina spremnika energije je dodatno podijeljena u reprezentativne potkategorije tehnologije. Poseban naglasak pridodan je baterijskim spremnicima energije i njihovim podvrstama. Nadalje, pojašnjene su usluge (funkcije) koje pružaju baterijski spremnici energije (BSE) integrirani u prijenosnoj mreži. Konačno, izvršena je simulacija utjecaja priključenja baterijskog spremnika energije na simulacijski model prijenosne mreže Istre pri različitim scenarijima karakterističnim za navedeni elektroenergetski podsustav uz prikaz relevantnih rezultata simulacije i zaključak.

2. TEHNOLOGIJE SKLADIŠTENJA ENERGIJE

Tradicionalne elektroenergetske mreže djeluju na principu konstantnog izjednačenja proizvodnje električne energije s potrošnjom u svakom trenutku. Na taj način, ostvaruje se ravnoteža i stabilnost u mreži s obzirom na to da je pohrana velike količine električne energije u izvornom obliku teško izvediva. Električna energija izmjeničnog valnog oblika opskrbljuje se na određenom teritoriju putem prijenosnih mreža visokog napona te se kasnije distribuira putem distribucijskih mreža srednjeg i niskog napona. Međutim, povećanjem udjela obnovljivih izvora energije s nestalnom i promjenjivom proizvodnjom električne energije, u mrežu se nastoji implementirati povećani broj spremnika energije da bi se ujednačila proizvodnja. Isto tako, sve veća pozornost pridodaje se razvoju manjih mikromreža i pametnih mreža s distribuiranim izvorima energije. Implementacijom skladišta energije s obnovljivim izvorima energije ujednačuje se proizvodnja energije i izbjegavaju se problemi manjka proizvodnje kod solarnih elektrana tijekom noći ili oblačnih dana te kod vjetroelektrana tijekom perioda nepovoljne brzine vjetra.

Različiti oblici energije mogu se svrstati u pojedine sustave s obzirom na fizikalna svojstva i način djelovanja. Najzastupljenije vrste sustava su mehanički, električni, kemijski, elektrokemijski i toplinski sustavi. Pomoću navedenih sustava omogućena je pohrana energije u drugim ekonomski i tehnološki prihvatljivijim oblicima iz kojih se kasnije energija reverzibilnim putem može pretvoriti nazad u električnu energiju s ciljem opskrbe krajnjih potrošača.

Trenutno, najveću zastupljenost među spremnicima energije čine reverzibilne hidroelektrane nakon kojih slijede toplinski spremnici energije, elektrokemijski spremnici energije, električni spremnici energije i konačno mehanički spremnici energije. Dok su zemlje s najvećim instaliranim kapacitetima snage spremnika energije Kina, Japan, Sjedinjene Američke Države, Njemačka, Italija, Švedska i Španjolska.

U nastavku poglavlja prikazane su različite tehnologije skladištenja energije, odnosno različite vrste spremnika energije. Glavna osobina svih prikazanih spremnika je njihova stvarna, fizička prisutnost u mreži u obliku elementa ili postrojenja. Međutim, osim prikazanih spremnika potrebno je spomenuti i virtualne spremnike energije (eng. *Virtual Energy Storage System – VESS*). Virtualni spremnici nisu predstavljeni fizičkim elementima već sinkronim radom distribuiranih jedinica s ciljem postizanja ekvivalenta fizičkog spremnika energije. Odnosno, virtualna elektrana je skup distribuiranih, upravljivih generatora, mikromreža, električnih vozila, različitih trošila i ostalih elemenata elektroenergetske mreže kojima se manipuliraju tokovi snaga unutar mreže i tako ostvaruju usluge ekvivalentne uslugama fizičkih spremnika energije.

Virtualni spremnici se ostvaruju korištenjem naprednih komunikacijskih i mjernih sustava te usklađivanjem rada svih aktivnih elemenata čime se postiže ekvivalentna snaga i kapacitet energije za pružanje (pomoćnih) usluga u mreži. Potencijalno, može se postići visoki kapacitet i snaga spremnika ukoliko elektroenergetska mreža to može podnijeti. Uz to, mogu se izbjeći veliki investicijski troškovi u opremu fizičkih spremnika energije. Međutim, nedostatak ovog pristupa je nužnost korištenja napredne komunikacije, mjerne tehnologije i naprednih upravljačkih i optimizacijskih algoritama radi ostvarivanja optimalnog djelovanja. Isto tako, potencijalno postoji problem ugrožavanja stabilnosti i sigurnost elektroenergetskog sustava zbog nepredvidivosti stanja virtualnog spremnika, to jest uvjeta u mreži.

2.1. Osnovni pojmovi i karakteristike

Spremnici energije predstavljaju značajnu investiciju prilikom implementacije u prijenosnoj mreži. Iz tog razloga, potrebno je uzeti u obzir veliku količinu parametara i varijabli da bi se minimizirali investicijski troškovi i povećala isplativost investicije. Uz ekonomsku stranu, u obzir je potrebno uzeti i utjecaj spremnika energije na naponske i strujne prilike u mreži. Spremnici energije opravdavaju svoju investiciju osiguravanjem raznih usluga navedenih u daljnjem radu, kojima se postiže stabilnost i sigurnost energetskog sustava te osiguranje kvalitete opskrbe električnom energijom.

Spremnici energije u elektroenergetskoj mreži predstavljaju dvostruku ulogu ili funkciju. S jedne strane predstavljaju potrošača električne energije ili teret, u periodima u kojima se energija pohranjuje u spremnik energije. S druge strane, predstavljaju izvor električne energije, u periodima u kojima se iz spremnika energija injektira u mrežu. Odabir trenutne uloge spremnika energije ovisi o trenutnom stanju u mreži.

Prilikom odabira spremnika energije za integraciju u prijenosnu mrežu, to jest elektroenergetski sustav, u obzir se uzima nekolicina parametara od kojih su ključni parametri pojašnjeni u nastavku [1].

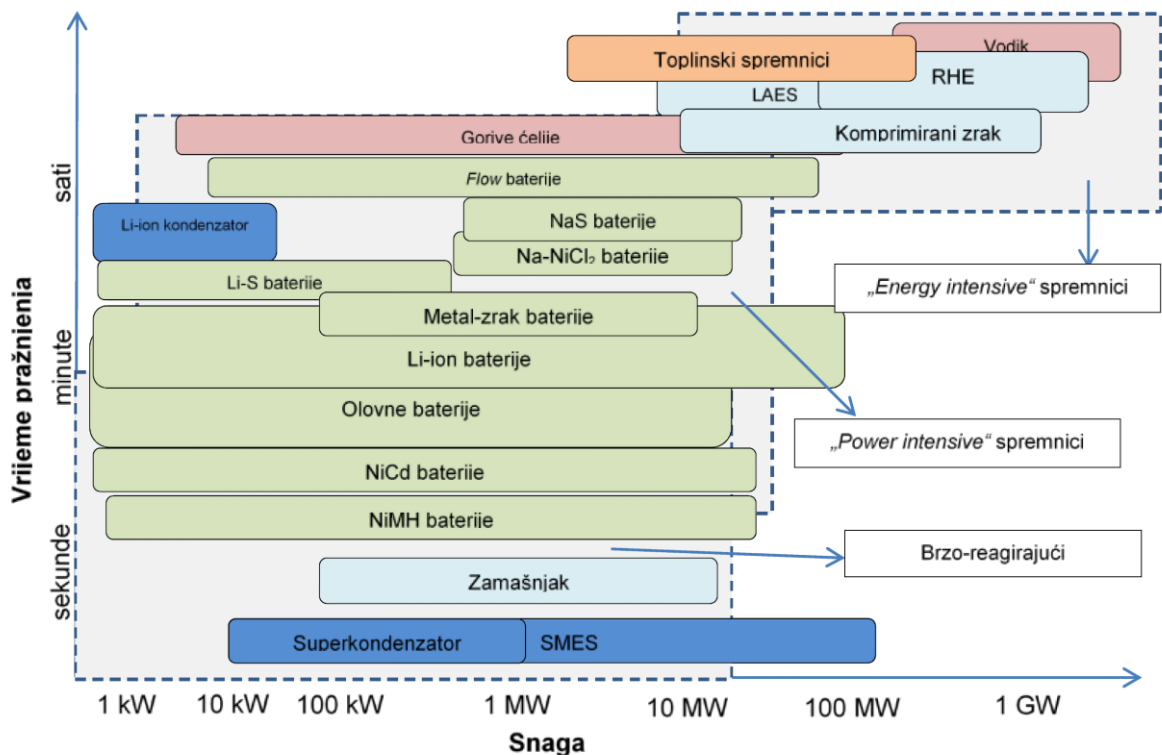
Kapacitet spremnika energije predstavlja količinu energije koju je moguće pohraniti u određenom spremniku energije i najčešće se izražava pomoću mjernih jedinica amper sat (Ah), vat sat (Wh), džul (J) te prikladnije kWh ili MWh. Za potrebe elektroenergetskog sustava, kapacitet je određen umnoškom iznosa struje pražnjenja, iznosa vremena u kojemu se spremnik isprazni i napona (uključenje napona nije nužno), ukoliko se kapacitet predstavlja pomoću električne energije.

Prilikom implementacije spremnika energije u elektroenergetsku mrežu potrebno je ispravno dimenzionirati spremnik da bi kapacitet pohranjene energije zadovoljio potrebne uvjete u mreži.

Prilikom odabira kapaciteta u obzir je potrebno uzeti maksimalni iskoristivi kapacitet energije i gubitke koji se javljaju tijekom pohrane i pružanja energije u mrežu. Na potrebni kapacitet spremnika za potrebe elektroenergetske mreže dodatno utječe položaj odnosno lokacija spremnika u mreži i treba se uzeti u obzir prilikom dimenzioniranja.

Nadalje, ključni parametri su maksimalna snaga i vremenska konstanta punjenja i pražnjenja. Maksimalna snaga se odnosi na iznos maksimalne snage prilikom pražnjenja (i punjenja) spremnika energije. S aspekta elektroenergetskog sustava, snaga spremnika je definirana umnoškom iznosa napona na stezaljkama spremnika i iznosa struje pražnjenja spremnika. Snaga se izražava preko mjerne jedinice vat (W) ili prikladnije kW ili MW. Maksimalna snaga mora se dimenzionirati s obzirom na predviđene strujno-naponske prilike u mreži. Povećanje maksimalne snage je limitirano jer se povećanjem snage uglavnom povećava volumen i masa spremnika te postoje ograničenja izdržljivosti komponenata spremnika poput primjerice elektroničkih komponenata baterijskih spremnika energije. Uz to, maksimalna snaga je ograničena prijenosnom moći vodova na koje je spremnik priključen. Nadalje, vremenska konstanta punjenja i pražnjenja odnosi se na omjer kapaciteta energije i maksimalne snage baterijskog spremnika. U osnovi, predstavlja vrijeme potrebno za punjenje ili pražnjenje određene količine energije u spremnik ili iz spremnika. Smanjenjem vremenske konstante smanjuje se vrijeme trajanja punjenja i/ili pražnjenja.

Prema kriteriju kapaciteta i snage, spremnici se mogu podijeliti na spremnike velikih kapaciteta (PHES, CAES, P2G, toplinski spremnici), srednjih kapaciteta (BSE) i malih kapaciteta (ultrakondenzatori, SMES). Dodatno, prema kriteriju vremena pražnjenja, spremnici energije se mogu podijeliti u spremnike snage i spremnike energije. Spremnici snage mogu se isprazniti u kratkom periodu, reda nekoliko milisekundi, sekundi ili minuta. S druge strane, spremnicima energije je potreban duži period od nekoliko sati za potpuno pražnjenje (Slika 2.1.).



Slika 2.1. Podjela spremnika energije prema vremenu pražnjenja i snazi [2]

Parametar specifične snage i energije odnosi se na količinu pohranjene energije u odnosu na masu (Wh/kg) ili volumen (Wh/m^3) spremnika. Dodatno se mogu prikazati po jedinici površine (W/m^2 ili Wh/m^2). Spremnik veće specifične energije ima sposobnost pohranjivanja veće količine energije u jednakoj količini mase ili volumena nego spremnik manje specifične snage. Najčešće povećavanjem specifične snage, smanjuje se specifična energija zbog povećanog obujma i mase. Navedeni parametar je dobar pokazatelj prilikom integracije spremnika na površinsko ograničen prostor ili pak na prostor (platformu) s ograničenom nosivošću. Za prikaz parametra najčešće se koristi Ragone-ov dijagram gdje su specifične snage i specifične energije postavljene na dvije osi dijagrama. Ragone-ov dijagram ponajviše se koristi za elektrokemijske spremnike energije poput baterijskih spremnika energije, pri tome ne uzimajući u obzir komponente poput elektroničkih energetske pretvarača.

Nadalje, ključni parametri su energetske gubitke i učinkovitost (efikasnost) sustava pohrane energije. Smanjenjem energetske gubitaka, povećava se učinkovitost sustava. Energetske gubitke uvelike ovise o tehnologiji spremnika energije te mogu biti grupirani u dvije osnovne skupine. Prvu skupinu čine gubitci nastali tijekom punjenja i pražnjenja i razmjerni su kvadratu snage. Drugu skupinu predstavljaju gubitci praznog hoda koji se odnose na vlastito pražnjenje baterijskog spremnika tijekom stanja mirovanja i ponajviše ovise o razini napunjenosti baterijskog spremnika.

Odnosno, povećanjem razine napunjenosti povećavaju se gubici praznog hoda. Energetski gubici najčešće se izražavaju kao postotak u jedinici vremena, primjerice postotak po satu ili danu.

Parametar starenja predstavlja starenje ili postepenu degradaciju spremnika energije s prolaskom vremena. Starenjem se smanjuju određene karakteristike spremnika poput kapaciteta ili se povećavaju određeni gubici zbog degradacije komponenata. Starenje je potencijalno uzrokovano raznim faktorima poput temperature ili termalnih naprezanja te mehaničkih ili električnih naprezanja (ovisno o iznosu frekvencije, pogonskoj snazi ili razini ispražnjenosti) tijekom ciklusa punjenja ili pražnjenja spremnika. Isto tako, atmosferski uvjeti mogu utjecati na ubrzanje procesa starenja djelovanjem na konstrukcijske ili pogonske elemente spremnika. Povećanjem utjecajnih faktora ubrzava se proces starenja.

Parametar investicije ili cijene odnosi se na investicijski trošak ili na operativni trošak spremnika energije i prikazuje se najčešće pomoću cijene (određene valute) po jedinici pohranjene energije (€/kWh), za spremnike velikih vremenskih konstanti, ili se prikazuje pomoću cijene po jedinici snage (€/kW), za spremnike manjih vremenskih konstanti. Najčešće, povećanjem kapaciteta pohrane energije, povećava se i investicijski trošak. Isto tako, investicijski trošak može uvelike ovisiti o tehnologiji samog spremnika kao i izvedbi spremnika. S druge strane, operativni trošak odnosi se na održavanje i pogon spremnika energije te ponajviše ovisi o tehnologiji i konstrukciji spremnika. Prolaskom vremena, operativni troškovi se povećavaju zbog starenja i degradacije komponenti spremnika.

Parametar vremena odziva predstavlja vrijeme potrebno da bi određeni spremnik energije proizveo i dao maksimalni iznos snage u mrežu. Vrijeme odziva ponajviše ovisi o tehnologiji spremnika energije. Primjerice, mehanički sustavi poput reverzibilne hidroelektrane imaju duže vrijeme odziva od nekoliko desetaka sekundi ili minuta dok elektrokemijski sustavi poput ultrakondenzatora mogu proizvesti maksimalnu snagu u periodu od nekoliko milisekundi. Vrijeme odziva je potrebno izabrati ovisno o događajima u mreži poput sklopnih operacija ili kao nadomjesno vrijeme prilikom pokretanja rezervnog generatora tijekom ispada pogonskog generatora.

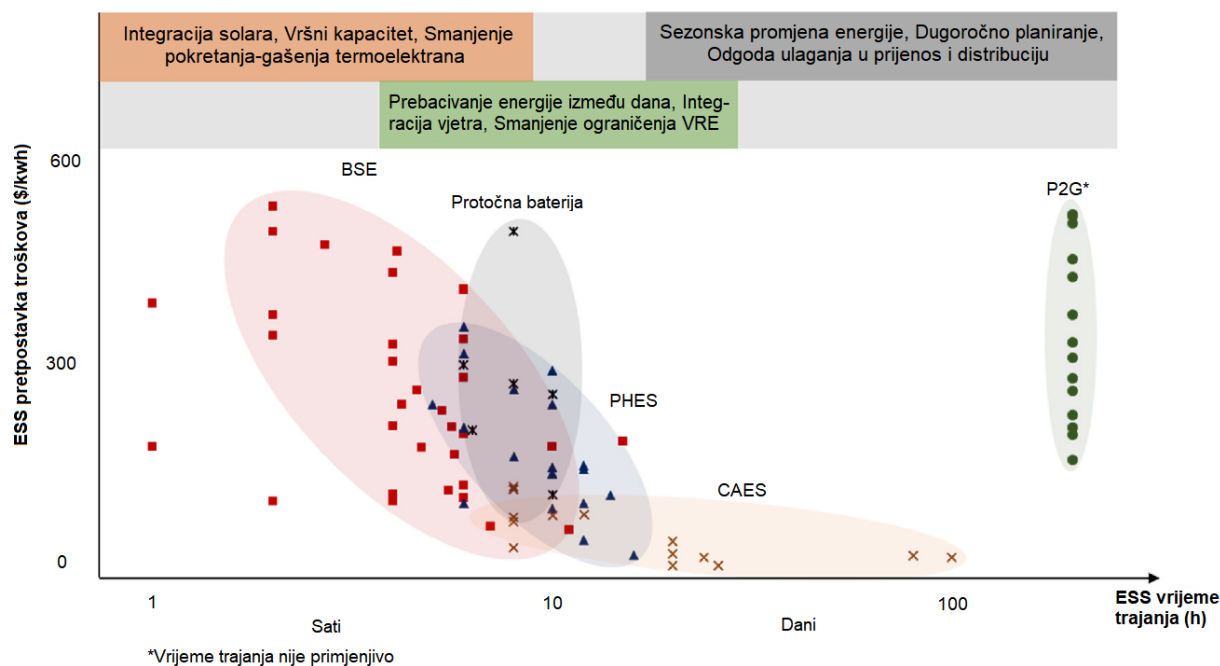
Zadnji ključan parametar je stanje energije (eng. *State of Energy - SoE*) ili stanje pohranjene energije. Stanje energije predstavlja odnos trenutne razine pohranjene energije i ukupnog kapaciteta spremnika energije. Trenutna razina pohranjene energije odnosi se na količinu energije bez uključenih gubitaka vlastitog pražnjenja spremnika. Vrijednost stanja energije od 100% predstavlja potpuno napunjen spremnik, dok vrijednost od 0% predstavlja prazan spremnik, to jest spremnik ispražnjen do donje granice pražnjenja.

Kod baterijskih spremnika to može biti trenutni kapacitet pohranjene električne energije ili kod reverzibilnih elektrana može biti razina vode u akumulacijskom jezeru. Najčešće, spremnici energije se ne mogu u potpunosti isprazniti radi čega je parametar stanja energije ključan za pravilno dimenzioniranje kapaciteta spremnika energije. Ograničenja maksimalnog pražnjenja mogu biti razna, poput mehaničkih ograničenja zbog minimalne brzine zamašnjaka ili pak minimalni iznos napona baterijskih spremnika. Prekomjernim pražnjenjem spremnika moguća je pojava ubrzanog starenja i degradacije spremnika.

2.2. Podjela prema vremenu trajanja

Vrijeme trajanja spremnika energije predstavlja period pružanja energije iz spremnika energije, pri nazivnoj snazi. Prema kriteriju vremena trajanja, spremnici energije se mogu podijeliti u kratkotrajne (eng. *short-duration*), srednjetrajanje (eng. *mid-duration*) i dugotrajne (eng. *long-duration*) spremnike energije (Slika 2.2.) [3].

Vrijeme trajanja spremnika u glavnoj mjeri je određeno kapacitetom pohranjene energije. U elektroenergetskom sustavu, optimalna je primjena sve tri kategorije spremnika radi zadovoljenja svih regulacijskih potreba sustava. Također, uporabom različitih vrsta spremnika ubrzava se integracija obnovljivih izvora energije i posljedično smanjenje emisija štetnih plinova.



Slika 2.2. Podjela spremnika energije prema vremenu trajanja [3]

Kratkotrajni spremnici energije zbog manjeg kapaciteta pohrane energije pružaju energiju pri nazivnoj snazi tijekom kraćeg perioda u približnom rasponu od jednog do deset sati. Navedeni tip spremnika prikladan je za kratkotrajne, dnevne promjene opterećenja u mreži, čime se može ujednačiti dnevno opterećenje. Primarnu primjenu pronalazi u zadovoljenju vršnih opterećenja (pružanjem energije iz spremnika) i u povećanju opterećenja punjenjem spremnika tijekom perioda nižih opterećenja. Iduća primjena je integracija spremnika u sklopu obnovljivih izvora energije poput vjetroelektrana ili solarnih elektrana. Zbog varijabilne snage proizvodnje iz obnovljivih izvora koja je ovisna o atmosferskim uvjetima, integracijom spremnika energije ujednačila bi se dnevna proizvodnja čime bi se ubrzala primjena takvih izvora u elektroenergetskom sustavu te bi se tako smanjio broj fosilnih elektrana za vršna opterećenja, poput plinskih elektrana. Primjena navedenih spremnika moguća je u sklopu konvencionalnih elektrana na fosilna goriva. Smanjenjem broja pokretanja i zaustavljanja plinskih elektrana, smanjuje se emisija štetnih plinova i cijena proizvodnje električne energije. Trenutno visoke cijene emisijskih dozvola, uvelike povećavaju opravdanost ugradnje spremnika energije. Istaknuti predstavnik kratkotrajnih spremnika energije su baterijski spremnici energije (BSE) čije prosječno vrijeme trajanja iznosi u rasponu od jednog do desetak sati.

Srednjetrojajni spremnici energije sadrže veći kapacitet pohrane energije naspram kratkotrajnih. Iz tog razloga, takvi spremnici se koriste za višednevnu regulaciju opterećenja u elektroenergetskoj mreži. Srednjetrojajni spremnici prikladni su za integraciju s vjetroelektranama tako da uravnoteže proizvodnju energije tijekom perioda od nekoliko dana. Time se ubrzava proces prelaska na obnovljive izvore energije i ublažuje se utjecaj atmosferskih uvjeta na fluktuacije snage proizvodnje iz obnovljivih izvora. Glavni predstavnici srednjetrojajnih spremnika su reverzibilne hidroelektrane (PHES) i protočne baterije. Vrijeme trajanja reverzibilne hidroelektrane može iznositi do nekoliko dana, dok je predviđeno vrijeme trajanja protočnih baterija od desetak sati do nekoliko dana.

Dugotrajni spremnici ili sezonski spremnici energije sadrže najveći kapacitet pohrane energije. Zbog iznimno velikih kapaciteta, specifična cijena investicije po jedinici kapaciteta pohrane energije je niska zbog čega predstavljaju isplativo rješenje. Nedostatak je niska učinkovitost pohrane. Koriste se za uravnoteženje opterećenja tijekom perioda od nekoliko tjedana ili mjeseci. Ukoliko je kapacitet pohrane dovoljno velik, dugotrajni spremnici se mogu koristiti pri uravnoteženju godišnje potrošnje energije, to jest između zimske i ljetne potrošnje, što je prvenstveno korisno kod turističkih zemalja poput Hrvatske (specifično obalni dio i otoci) i kod integracije vjetroelektrana. Glavni predstavnici dugotrajnih spremnika su pohrana komprimiranog zraka (CAES) i tehnologije kemijske konverzije (P2G sustav).

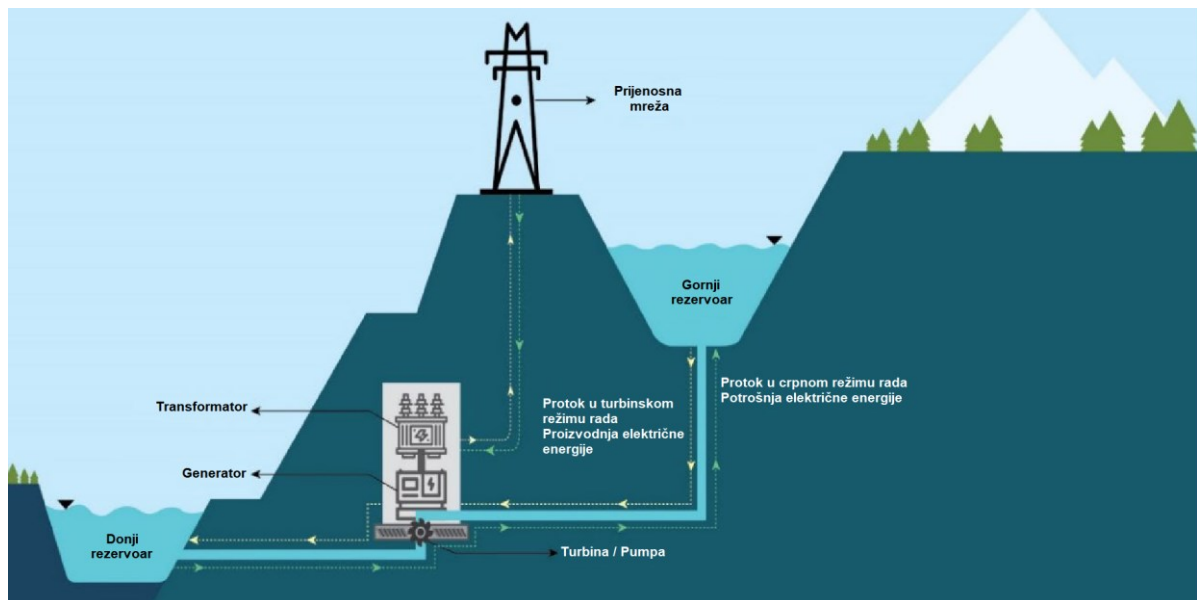
Pohrana komprimiranog zraka može imati vrijeme trajanja do više desetaka dana, dok P2G sustav može imati praktički neograničeno vrijeme trajanja.

2.3. Mehanički sustavi

Mehanički sustavi zbog konstrukcije i načina djelovanja predstavlja iznimno učinkovit i održiv način pohrane energije. Istaknuti predstavnici mehaničkih sustava su reverzibilne hidroelektrane (PHES) te pohrana komprimiranog zraka (CAES) i zamašnjaci. Mehanički sustavi mogu se dodatno kategorizirati u isključivo mehaničke i kombinirano mehaničke i električne podsustave, gdje se kod prve kategorije direktno iskorištava mehanički rad, dok se kod druge kategorije mehanički rad (energija) dalje pretvara u električnu energiju koja se potom iskorištava. U isključivo mehaničke podsustave pripadaju zamašnjaci, dok u kombinirano mehaničke i električne podsustave pripadaju PHES i CAES. Zamašnjaci se također mogu svrstati i u drugu kategoriju ukoliko sadrže mehanički vezanu generatorsku jedinicu.

2.3.1. Reverzibilne hidroelektrane (PHES)

Reverzibilne hidroelektrane (eng. *Pumped Hydro Energy Storage - PHES*), to jest crpno-akumulacijska postrojenja, vrlo su razvijena tehnologija pohrane energije koja se koristi preko stotinu godina. Prve poznate hidroelektrane nastale su tijekom 19. stoljeća u Italiji i Švicarskoj. Reverzibilne hidroelektrane ili skraćeno RHE (Slika 2.3.), u velikoj su upotrebi u elektroenergetskoj mreži zbog velikih kapaciteta pohrane energije ali i velikih snaga te predstavlja najrazvijeniju tehnologiju pohrane energije s najvećom rasprostranjenošću.



Slika 2.3. Shematski prikaz načina rada reverzibilne hidroelektrane (PHES) [4]

Reverzibilne hidroelektrane imaju dvostruku ulogu u elektroenergetskoj mreži. Tijekom faze generacije, to jest proizvodnje električne energije, voda iz rezervoara na višoj poziciji (nadmorskoj visini), propušta se kroz vodovodne kanale i/ili cjevovode preko lopatica turbine u rezervoare niže pozicije (nadmorske visine). Rezervoar na višoj nadmorskoj visini je najčešće u obliku akumulacijskog jezera. Gornjim rezervoarom se postiže skladištenje potencijalne energije vode čime se postiže uloga reverzibilne hidroelektrane kao spremnika energije. Okretanjem lopatica turbine, okreće se rotor generatora koji je mehaničkom vezom povezan sa samom turbinom te se generira električna energija izmjeničnog valnog oblika. S druge strane, tijekom faze potrošnje električne energije ili skladištenja vode, to jest pumpanja vode iz rezervoara niže pozicije u rezervoar više pozicija, električna energija se uzima iz mreže da bi se obavio rad. Za obje faze koristi se isti električni stroj (motor - generator) i turbina (najčešće tipa Francis). Proizvodnja električne energije (generacija) iz reverzibilnih hidroelektrana odvija se tijekom većeg iznosa opterećenja (potrošnje) u elektroenergetskom sustavu koje je najčešće tijekom dnevnih sati dok se potrošnja (pumpanje ili crpljenje) odvija tijekom perioda nižeg iznosa opterećenja (potrošnje) unutar sustava, odnosno tijekom noćnih sati. Na taj način, reverzibilnih hidroelektrana pomaže u izjednačavanju odnosa proizvodnje s potrošnjom električne energije unutar sustava, u svakom trenu. Međutim, zbog svojeg principa djelovanja, integracija reverzibilnih hidroelektrana uvelike ovisi o geografskom reljefu prostora na kojeg se može smjestiti hidroelektrana. Da bi se dva rezervoara nalazila na različitim nadmorskim visinama, najčešće se hidroelektrana mora integrirati u prostore brijega, gora i planina.

Također je moguće iskoristiti rasjede između podzemnih šupljina i površine tla ili pak između mora i obližnje planinske kotline. Isto tako, navedeni tip hidroelektrana zauzima iznimno veliku površinu zbog pohranjivanja velike količine vode. Zbog navedenih razloga, navedeni tip spremnika energije nije moguće integrirati u sve dijelove elektroenergetske mreže.

Dodatna mana je visoka investicija u odnosu na kapacitet instalirane snage (600 – 2.000 €/kW). Međutim ukoliko se gleda prema kapacitetu pohrane energije tada je isplativost poboljšana te iznosi od 70 do 150 €/kWh. Prednosti ove tehnologije pohrane su dugi životni vijek od nekoliko desetljeća (prosječno 30 do 50 godina), zrelost i razvijenost tehnologije, stabilnost u radu, visoka efikasnost po ciklusu u rasponu od 65 do 85% i korištenje vode kao medija za rad. Reverzibilne hidroelektrane najčešće se nalaze u rasponu snaga od nekoliko stotina megavata do preko jednog gigavata. Vrijeme pražnjenja može iznositi od 1 sata do preko 24 sata. Stupanj pražnjenja je izrazito nizak zbog čega su reverzibilne hidroelektrane prikladne za pohranu energije tijekom dužeg perioda. Ovaj tip spremnika energije prikladan je za izvršavanje pomoćnih usluga poput frekvencijske stabilnosti, uravnoteženje sustava i crni start prvenstveno zbog kratkog vremena pokretanja ili odziva (nekoliko minuta iz hladnog starta ili nekoliko desetaka sekundi iz stanja pripravnosti) [1, 5, 6].

Količina pohranjene energije može se prikazati u obliku potencijalne energije mase vode na određenoj visini, prema izrazu (2.1) [7]:

$$E = m \cdot g \cdot h \quad (2.1)$$

gdje je:

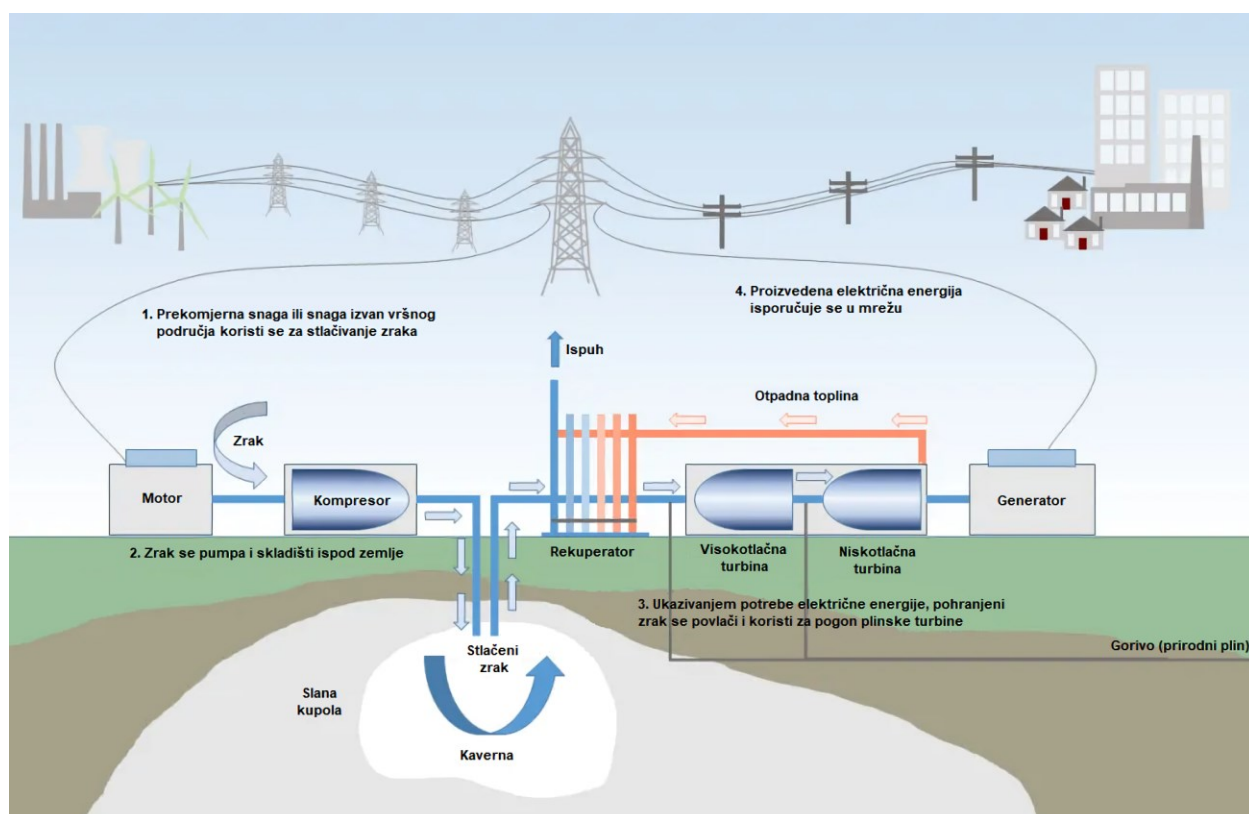
- m masa vode,
- g akceleracija sile teže,
- h visinska razlika dva spremnika.

Primjer reverzibilne hidroelektrane u Hrvatskoj je RHE Velebit koja je puštena u pogon 1984. godine u donjem toku rijeke Zrmanje. RHE Velebit je ukupnog kapaciteta instalirane snage od 276 MW pri generatorskom režimu rada i 240 MW pri motornom režimu rada. Sustav posjeduje dva gornja akumulacijska jezera, Štikada (zapremnina 13,65 hm^3 pri maksimalnoj koti uspora od 553,5 m.n.m.) i Opsenica (zapremnine 2,7 hm^3 pri maksimalnoj koti uspora od 575,0 m.n.m.) i jednu donju akumulaciju Razovac (zapremnine 1,81 hm^3 pri maksimalnoj koti uspora od 9 m.n.m.) [8].

Postrojenje se sastoji od dvije Francis crpke – turbine i dva agregata pojedinačnih snaga 138 / - 120 MW s četiri režima rada. Uz proizvodnju električne energije i reverzibilni rad, RHE Velebit vrši pomoćne usluge Q/U regulacije i tercijarne P/f regulacije [8].

2.3.2. Pohrana komprimiranog zraka (CAES)

Pohrana komprimiranog zraka (eng. *Compressed Air Energy Storage - CAES*) je oblik mehaničkog sustava spremnika energije (Slika 2.4.) gdje se u fazi skladištenja (punjenja), zrak upumpava u geološke šupljine ispod zemlje ili se komprimira (tlači) u plinske spremnike, a povlači se nazad prema površini ili iz spremnika kada za to nastane potreba. U fazi pražnjenja (ekspanzije), uzdizanjem zraka prema površini ili propuštanjem stlačenog zraka iz spremnika, stvara se zračna struja koja okreće lopatice turbine i mehanički vezan rotor generatora te se proizvodi električna energija izmjeničnog valnog oblika.



Slika 2.4. Shematski prikaz sustava pohrane komprimiranog zraka (CAES) [9]

Pohrana komprimiranog zraka je vrlo razvijena tehnologija pohrane energije koja je u širokoj upotrebi preko pedeset godina. Zrak se može komprimirati u razne vrste podzemnih šupljina. Najznačajnije vrste su rudnici (šupljine) nastali eksploatacijom podzemnih resursa soli, vodonosne ili stjenovite formacije, rudarske špilje i kamenolomi. Za geološko spremište mogu biti iskorištene postojeće šupljine ili se mogu stvoriti nove u slučaju da nema postojećih ili nisu dovoljnih kapaciteta pohrane. Prilikom odabira prikladnog spremišta u obzir se mora uzeti debljina stijenke, to jest zida šupljine, stabilnost šupljine prilikom promjene tlaka, dubina špilje u odnosu na površinu (uglavnom se uzima u rasponu između 100 i 200 metara dubine) i prisutnost mineralnih spojeva zbog rizika oksidacije.

Količina pohranjene energije unutar spremnika volumena V_1 , tlaka P_1 , pri temperaturi okoline, može se prikazati prema izrazu (2.2) [7]:

$$E = P_1 \cdot V_1 \cdot \left[\ln \left(\frac{P_1}{P_a} \right) - 1 + \frac{P_a}{P_1} \right] \quad (2.2)$$

gdje je:

P_1 tlak spremnika,

V_1 volumen spremnika,

P_a tlak okoline (atmosfera).

Pohrana komprimiranog zraka dodatno se može podijeliti na tri potkategorije (tehnologije ili generacije), a to su prva generacija, druga generacija i adijabatska pohrana komprimiranog zraka.

U prvoj generaciji pohrane komprimiranog zraka, tijekom faze punjenja atmosferski zrak se komprimira pomoću električnog stroja (motora) te se zatim hladi u izmjenjivaču topline i upumpava u podzemne šupljine. Na taj način, postiže se skladištenje energije. Nadalje, tijekom faze ekspanzije, skladišteni zrak se uzima iz podzemnih šupljina, potom se zagrijava u komori izgaranja (najčešće korištenjem prirodnog plina) i prosljeđuje se kroz mehanički stroj koji radi na principu plinske turbine, kojim se pogoni generator i vrši se proizvodnja električne energije. Prva generacija pohrane komprimiranog zraka implementirana je 1978. godine u Njemačkoj gdje nazivna snaga proizvodnje električne energije iz spremnika iznosila 300 MW. Efikasnost prve generacije spremnika iznosi u rasponu od 48 do 50%. Zbog korištenja fosilnih goriva u procesu zagrijavanja plina, navedena generacija pohrane energije nije u potpunosti ekološki neutralna, radi čega nije poželjna za korištenje, ukoliko se želi postići cilj energetske tranzicije [1].

Druga generacija pohrane komprimiranog zraka djeluje na istom principu kao i prva generacija.

Međutim, kod druge generacije nastoji se povećati efikasnost sustava i smanjenje emisija stakleničkih plinova. Razlika naspram prijašnje generacije je korištenje novijih tehnologija i hibridnih sustava utemeljenih na unaprijeđenom dizajnu plinske turbine.

Očekivana efikasnost druge generacije spremnika iznosi približno 55% što je napredak naspram prošle generacije. Isto tako, nastoji se smanjiti investicijske troškove standardiziranjem opreme. Uz to, nastoji se iskoristiti energija nusprodukata izgaranja za zagrijavanje zraka prilikom povlačenja iz podzemnih spremnika, čime se smanjuju nepotrebni gubici energije. Druga generacija pohrane je trenutno još u procesu istraživanja, iako je prvi sustav skladištenja implementiran 1991. godine u Sjedinjenim Američkim Državama, gdje je pružio maksimalnu snagu pražnjenja od 110 MW tijekom perioda od 26 sati [1].

Treća generacija pohrane komprimiranog zraka je adijabatska pohrana komprimiranog zraka. Trenutno je najnovija tehnologija pohrane koja nije u upotrebi pa su zbog toga iznimno visoki investicijski troškovi. Tijekom procesa skladištenja, to jest procesa komprimiranja, koristi se skladištenje topline za povrat toplinske energije komprimiranja. Skladištena energija (toplina) se iskorištava za zagrijavanje izlaznog zraka iz spremnika. S druge strane, tijekom procesa ekspanzije, kao i kod ostalih generacija, komprimirani zrak pokreće turbinu koja mehaničkom vezom pokreće generator i tako proizvodi električnu energiju. Trećom generacijom se nastoji povećati efikasnost sustava na približno 70% i smanjenje emisija stakleničkih plinova, ostvareno nekorištenjem plina za zagrijavanje zraka u turbini [1].

Snage trenutnih CAES sustava iznose do 300 MW uz učinkovitost sustava do 85% (uz uvjet korištenja prirodnog plina i električne energije). Prednosti CAES sustava su dugi životni vijek (preko 30 godina), visoki kapaciteti pohrane energije i niski troškovi održavanja. Vrijeme pokretanja sustava je slično kao kod reverzibilnih hidroelektrana (desetak minuta iz hladnog starta i petnaestak sekundi iz stanja pripravnosti) zbog čega su prikladne za iste pomoćne usluge kao RHE (frekvencijska i naponska stabilnost, uravnoteženje sustava). Vrijeme pražnjenja iznosi od 1 do preko 24 sata. Stupanj samopražnjenja je izrazito nizak. Mana je vrlo visoka investicija u odnosu na kapacitet instalirane snage (1.000 – 2.000 €/kW) i uvjetovanost geoloških oblika za pohranu zraka. Cijena investicije u odnosu na kapacitet pohrane energije je niska i iznosi 50 do 150 €/kWh [5, 7].

Primjer pohrane komprimiranog zraka je projekt Huntorf u Njemačkoj koji je u pogonu od 1987. godine. CAES Huntorf je postrojenje maksimalne instalirane snage 321 MW i kapaciteta raspoložive energije 640 MWh [2].

Funkcije postrojenja su crni start, vremenski pomak električne energije, rezervni kapacitet napajanja električnom energijom (rotirajuća rezerva) i regulacija frekvencije [2].

2.3.3. Zamašnjaci

Zamašnjaci (eng. *flywheel*) su mehanički uređaji koji se zbog principa djelovanja mogu svrstati i pod kinetičke sustave. Zamašnjaci pohranjuju mehaničku, rotacijsku (odnosno kinetičku) energiju na temelju zamašne mase gdje je iznos pohranjene energije ovisan o kvadratu brzine rotacije (kutne brzine) i vremenu inercije, prema izrazu (2.3) [1]:

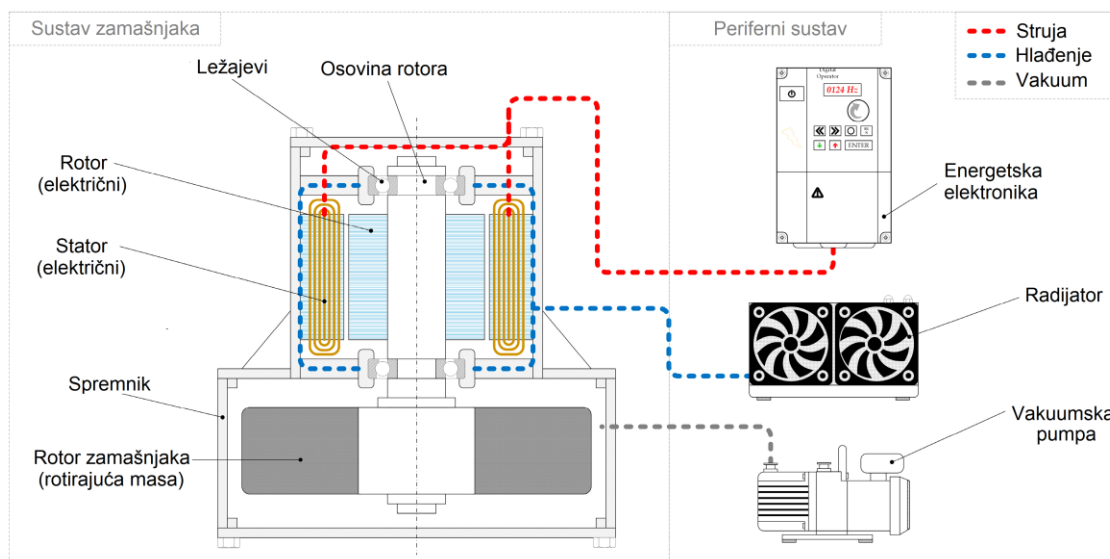
$$E = \frac{J\Omega^2}{2} \quad (2.3)$$

gdje je:

J vrijeme inercije,

Ω kutna brzina.

Povećanjem iznosa brzine rotacije, povećava se iznos pohranjene energije. Iz tog razloga, zamašnjaci (Slika 2.5.) se rotiraju na iznimno visokim brzinama koje mogu doseći preko 10.000 o/min. U slučaju da je brzina rotacije manja od 10.000 o/min, tada se zamašnjak svrstava u kategoriju sporih zamašnjaka, a ukoliko je brzina veća od 10.000 o/min tada se svrstava u kategoriju brzih zamašnjaka.



Slika 2.5. Shematski prikaz sustava zamašnjaka [10]

Slično reverzibilnim elektranama, zamašnjaci mogu raditi u generatorskom i motorskom režimu rada. Pri generatorskom načinu rada mehanička energija se pretvara u električnu te se potom injektira u mrežu, dok se u motorskom načinu rada električna energija pretvara u mehaničku, to jest električna energija se evakuira iz mreže. Prilikom ciklusa punjenja, kutna brzina zamašnjaka se povećava dok se u ciklusu pražnjenja kutna brzina smanjuje.

Nadalje, odziv na promjene u mreži je iznimno brz (vrijeme odziva približno 1 ms do nekoliko sekundi) zbog čega su zamašnjaci prikladni kao kratkotrajni spremnik energije pogodan za sklopne operacije, regulaciju frekvencije i ostale kratkotrajne pojave u mreži. Isto tako, zamašnjaci imaju mogućnost apsorpcije velikog raspona snaga tijekom visokog broja ciklusa. Izlazne snage zamašnjaka su u rasponu od 0,1 do 20 MW. Uz veliku masu, zamašnjaci najčešće zauzimaju i veliki volumen. Zbog velikih iznosa mase i volumena, prilikom rada se javljaju visoki iznosi trenja koji se ponajviše očituju na ležajevima. Da bi se trenje smanjilo, mogu se koristiti magnetski ležajevi (posebice kod većih kutnih brzina) te smještanje zamašnjaka unutar vakuuma. Korištenjem navedenih metoda, smanjuju se iznosi mase i volumena zamašnjaka ali se povećava cijena. Zbog jednostavnosti principa rada, zamašnjaci imaju visoki stupanj efikasnosti i vrlo visoku pouzdanost te ujedno i dugi radni vijek koji doseže preko 20 godina. S druge strane, mana je iznimno kratko vrijeme pohrane energije koje doseže 15 minuta (visok stupanj samopražnjenja). Mana zamašnjaka je visoka cijena investicije gledano u prema snazi (500 do 2.000 €/kW) ali i prema pohrani energije (2.000 do 8.000 €/kWh) [1, 5].

Zamašnjaci se najčešće integriraju kao pomoćni izvor energije u kombinaciji s drugim glavnim izvorom te služe za poboljšanje rada glavnog izvora. U prijenosnoj mreži mogu imati ulogu rotirajuće rezerve te za usluge naponske i frekvencijske stabilnosti. Također, mogu se integrirati s konvencionalnim elektranama na fosilna goriva s ulogom ostvarenja ugladenog rada rotirajućih generatora (isti princip kao zamašnjak na motorima s unutarnjim izgaranjem).

Primjer zamašnjaka s ulogom spremnika energije je postrojenje tvrtke Beacon Power u gradu Stephentown (New York, Sjedinjene Američke Države) koje je u pogonu od 2011. godine. Postrojenje se sastoji od 200 jedinica zamašnjaka u vakuumskim komorama, ukupne snage 20 MW (ukupni raspon 40 MW). Primarna uloga postrojenja je regulacija frekvencije gdje zamašnjaci godišnje provedu od 3.000 do 5.000 cjelovitih dubokih ciklusa pražnjenja [11].

2.4. Električni sustavi

Električni sustavi predstavljaju pohranu električne energije bez pretvorbe u druge oblike energije poput primjerice mehaničke, toplinske ili potencijalne. Odnosno, električna energija se pohranjuje u dva oblika pohrane, elektromagnetska i elektrostatska pohrana. Elektromagnetski oblik pohrane koristi pohranjenu električnu energiju u obliku magnetskog polja i glavni predstavnici tog oblika pohrane su ultrakondenzatori. S druge strane, elektrostatski oblik pohrane koristi električni (elektrostatski) potencijal za pohranu energije te su glavni predstavnici tog oblika pohrane supravodljivi magneti (SMES).

2.4.1. Ultrakondenzatori

Ultrakondenzatori (eng. *supercapacitors*) djeluju na principu nakupljanja električnog naboja na sučelju između elektroda (provodnika elektrona) i elektrolita (tekuća vodena ili organska, ionska otopina) gdje su elektrode uronjene u elektrolit, čime se stvara dvostruki sloj. Na taj način, pohrana energije se odvija elektrostatski i ne dolazi do reakcije oksidoredukcije koja je karakteristična kod klasičnih baterija. Odnosno, ultrakondenzatori ulogu spremnika energije postižu skladištenjem elektrostatske energije u električnom polju. Iznos pohranjene energije ovisan je o kapacitetu i kvadratu napona na krajevima (terminalima) kondenzatora, prema izrazu (2.4) [1]:

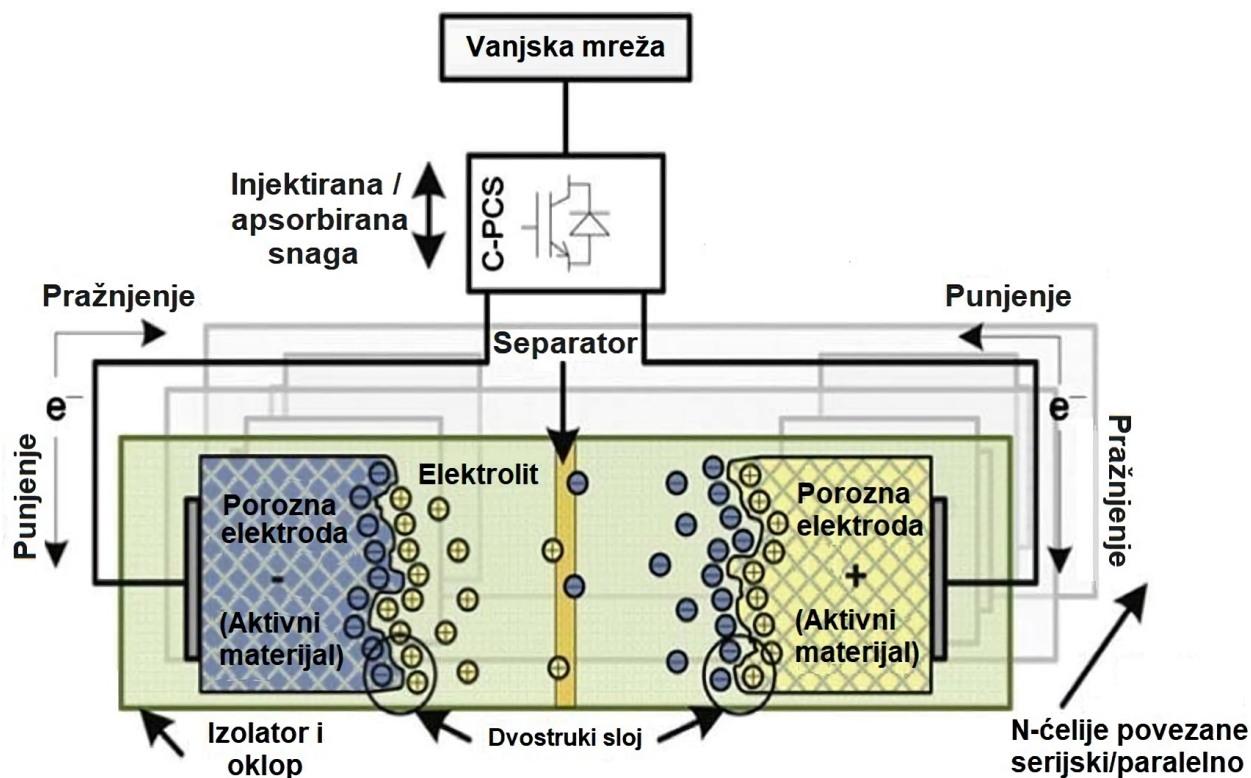
$$E = \frac{CV^2}{2} \quad (2.4)$$

gdje je:

C kapacitet,

V napon na krajevima (terminalima) ultrakondenzatora.

Ultrakondenzatori (Slika 2.6.) ili drugim nazivom superkondenzatori razvijeni su iz tehnologije klasičnih kondenzatora. Uglavnom se koriste za pohranu snage s obzirom na to da imaju mogućnost pohrane velike specifične snage naspram mase (približno 10 kW/kg) tijekom ciklusa pražnjenja i punjenja u rasponima od 500.000 do 1.000.000 ciklusa. Ciklusi se mogu odvijati iznimno brzo [1].



Slika 2.6. Shematski prikaz ultrakondenzatora [12]

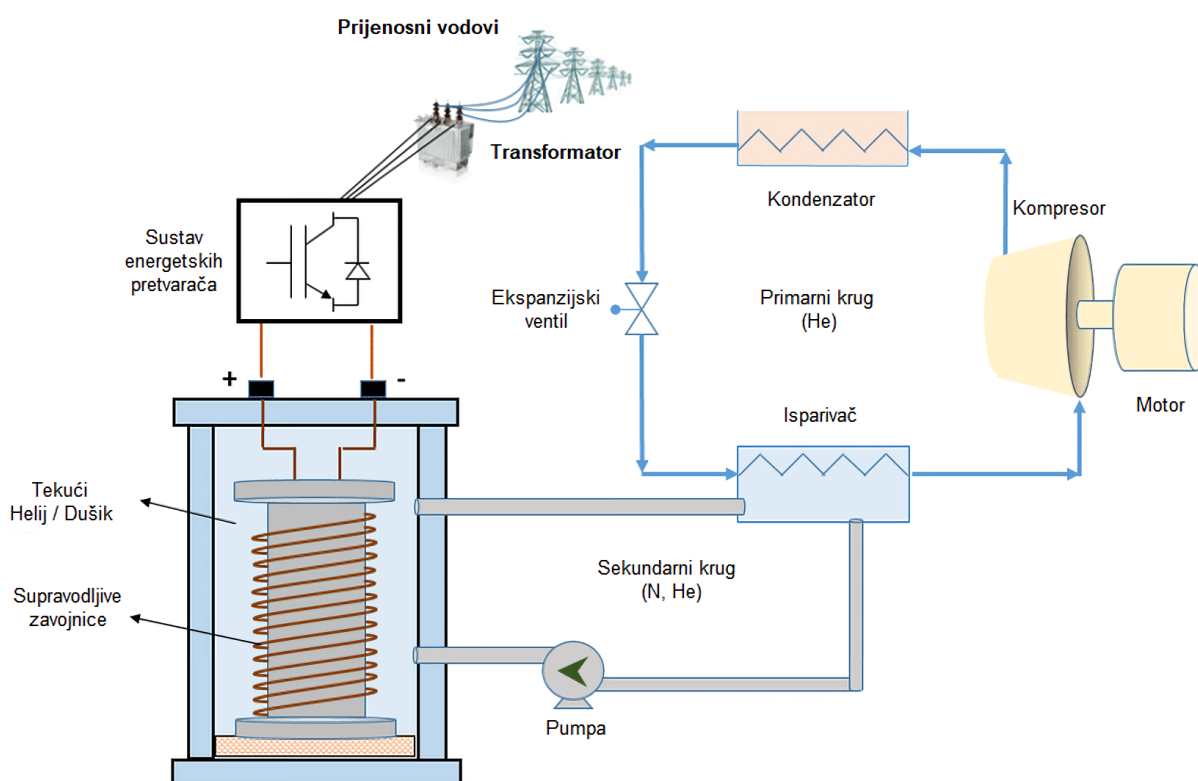
Vrijeme odziva ultrakondenzatora iznosi reda milisekundi. Visoki specifični kapacitet elementa postiže se visokom površinom koja se dobiva nanosom aktivnog ugljena na aluminijskoj foliji. Također na povećani specifični kapacitet je utjecajno uranjanje elektroda u elektrolit s otopljenim ionima. Izlazna struja ultrakondenzatora određena je iznosom ekvivalentnog serijskog otpora (eng. *Equivalent Series Resistance – ESR*) koji je primarno ovisan o temperaturi ultrakondenzatora. Međutim, zbog izrazito niskog ukupnog kapaciteta kondenzatorskih sustava pohrane, takvi sustavi koriste se pri uravnoteženju naglih i kratkotrajnih promjena u elektroenergetskom sustavu. Napon jednog elementa iznosi u rasponu od 2,7 do 2,85 V. Serijskim i paralelnim slaganjem elemenata, dobivaju se traženi iznosi napona i kapaciteta za primjenu u prijenosnoj mreži. Vrijeme pražnjenja iznosi od 1 ms do 1 min. Nazivni iznosi snaga dosežu do 0,3 MW. Nadziranje i upravljanje (balansiranje elemenata) grupe ultrakondenzatora tijekom ciklusa punjenja i pražnjenja vrši se pomoću uređaja energetske elektronike. Dodatna prednost ove tehnologije pohrane je dugi životni vijek i mali pogonski gubici. Nedostatak je povećani stupanj samopražnjenja. Cijena investicije prema snazi je niska i iznosom od 100 do 500 €/kW, dok je cijena prema kapacitetu pohrane energije visoka, iznosom od 10.000 do 20.000 €/kWh [1, 5].

Ultrakondenzatori dodatno se mogu podijeliti u tri potkategorije. Prvu potkategoriju čine dvoslojni kondenzatori (reverzibilno nakupljanje iona na površini porozne elektrode).

Drugu potkategoriju čine pseudokondenzatori (reverzibilna redoks reakcija s ionima elektrolita čiji ioni reagiraju s površinskim funkcionalnim dijelovima). Treću potkategoriju čine hibridni kondenzatori (kombinacija faradične elektrode baterijskog tipa i neofaradične električne dvoslojne elektrode kondenzatorskog tipa).

2.4.2. Supravodljivi magneti (SMES)

Supravodljivi magneti (eng. *Superconducting Magnetic Energy Storage - SMES*) djeluju na principu pohrane električne energije u obliku elektromagnetske energije (magnetskog polja). Supravodljiva zavojnica (Slika 2.7.) nalazi se u vakuumu i ohlađena je ispod kritične temperature te se u nju injektira istosmjerna struja. Hlađenjem supravodljive zavojnice ispod kritične točke, njezin otpor se smanjuje gotovo na nultu vrijednost. Iz tog razloga, injektirana struja kruži zavojnicom čak i nakon isključenja vanjskog izvora napajanja. Zbog geometrijskog oblika zavojnice, struja stvara magnetsko polje koje predstavlja pohranjenu energiju.



Slika 2.7. Shematski prikaz supravodljivog magneta (SMES) [13]

S obzirom da takva zavojnica ima praktički nulti iznos otpora, a time i nulti iznos gubitaka, električna struja neprestano kruži kroz zavojnicu čime je pohranjena već spomenuta elektromagnetska energija.

Iznos pohranjene energije ovisan je o induktivitetu zavojnice i kvadratu iznosa struje, prema izrazu (2.5) [1]:

$$E = \frac{Li^2}{2} \quad (2.5)$$

gdje je:

- L induktivitet zavojnice,
- i struja unutar zavojnice.

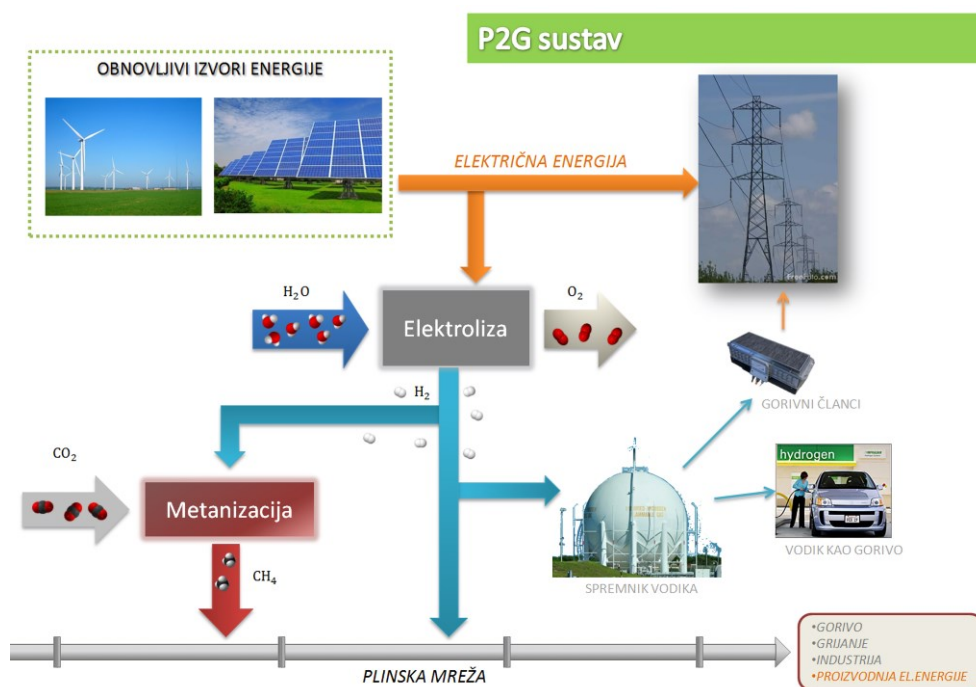
Prednosti supravodljivih magneta kao spremnika energije je vrlo kratak odziv (do nekoliko sekundi ili čak praktički trenutno, ovisno o konstrukciji), visoka efikasnost konverzije energije (do 97%) i dugi životni vijek. Nadalje, trenutni kapaciteti pohrane snage su u rasponu od 1 do 10 MW. Trenutno jedine mane navedenih spremnika su visoki investicijski troškovi (cijena supravodljivog materijala i kriogenih strojeva, nerazvijenost tehnologije), visok stupanj samopražnjenja (ukoliko se gleda utrošena energija za hlađenje putem kriogene tekućine, izuzev toga samopražnjenje je zanemarivo) i visoki troškovi pogona (utrošak energije za hlađenje supravodljive zavojnice) zbog čega navedeni tip spremnika trenutno nije u komercijalnoj uporabi. Cijena je visoka ukoliko se promatra u odnosu na kapacitet pohrane energije i iznosi preko 10.000 €/kW, a ukoliko se promatra prema snazi tada je cijena niska i iznosi približno 300 €/kWh [1, 5].

2.5. Kemijski sustavi

Kemijski sustavi predstavljaju tehnologije pohrane kemijskih tvari u obliku goriva (krutog, tekućeg ili plinovitog agregatnog stanja) koje sadrže određenu količinu kemijske energije, to jest unutarnje energije pohranjene u tvari na atomskoj razini (u kemijskim vezama atoma i molekula). Kemijskim reakcijama, pohranjena energija se pretvara u električnu energiju za obavljanje korisnog rada. Glavni predstavnik kemijskih sustava su tehnologije kemijske konverzije (P2G) s glavnom odlikom pohrane vodika i/ili metana.

2.5.1. Tehnologije kemijske konverzije (P2G) - pohrana vodika i metana

Tehnologije kemijske konverzije (eng. *Power-to-Gas – P2G*) ili P2G sustavi odnose se na uporabu vodika i/ili metana kao medija za pohranu energije (Slika 2.8.). U prvom slučaju koristi se isključivo vodik za pohranu energije, dok u drugom slučaju koristi se metan dobiven iz vodika kao medij za pohranu energije.



Slika 2.8. Dijagram procesa P2G sustava [14]

Pohrana vodika pohranjuje kemijski element vodik (H_2) u određenom agregatnom stanju (plinovitom, tekućem, krutom), u prikladnom spremniku.

Elementarni vodik dobiva se postupkom elektrolize deionizirane vode gdje se voda rastvara na plinovite oblike vodika i kisika prema izrazu (2.6) [15]:



gdje je:

H_2O molekula vode,

H_2 molekula vodika,

O_2 molekula kisika.

Uređaj za dobivanje vodika naziva se elektrolizator. S obzirom na to da elektrolizator nema idealnu učinkovitost, prilikom pretvorbe, određeni dio energije se izgubi u obliku topline, dio u ispravljaju i dio u pomoćnoj opremi (kompresor).

Zbog navedenih gubitaka, elektrolizator postiže stupanj učinkovitosti u rasponu od 56 do 73% gdje se efikasnost računa pomoću gornje ogrjevne moći plina (vodika). Dvije temeljne vrste elektrolizatora su elektrolizator s protonski propusnom membranom (eng. *Proton Exchange Membrane - PEM*) i alkalni elektrolizator. PEM elektrolizator ima veću učinkovitost naspram alkalnog [15].

Vodik se također može dobiti proizvodnjom iz rafinerijskih plinova i metana te izvlačenjem iz fosilnih goriva. Najzastupljeniji oblik je elektroliza zbog više učinkovitosti naspram navedenih i zbog ekološki prihvatljivih nusprodukata (voda) prilikom proizvodnje vodika.

Pohranjeni vodik može se dalje iskoristiti za dobivanje metana ili za proizvodnju električne energije. Korištenjem gorivne ćelije (eng. *fuel cell*) ili drugim nazivom gorivnog članka, vodik se direktno pretvara u električnu energiju. Da bi proces bio održiv, potrebno je osigurati vodik određene čistoće, odnosno vodik mora biti kemijski obrađen. Također, vodik se može direktno koristiti kao gorivo za pogon plinske elektrane ukoliko je sustav dizajniran za takav pogon.

Trenutno se ulaže u veliki razvoj spremnika i pogonskih strojeva na vodik. Međutim trenutni problemi vodika su visoka cijena zbog relativno nove tehnologije, sigurnosni problemi zbog zapaljivih i eksplozivnih svojstava vodika, ograničene snage spremnika, niska efikasnost dobivanja vodika, visoka uložena energija prilikom stlačivanja vodika (približno devet puta veća naspram metana). Značajan problem predstavlja pohrana vodika. Zbog iznimno malih molekula vodika, teško je konstruirati spremnik vodika (Slika 2.9.) koji neće imati određenu dozu propuštanja vodika, s obzirom na to da se zbog male veličine, molekule mogu provući kroz rastavljive spojeve spremnika.



Slika 2.9. Spremnik tekućeg vodika na lokaciji svemirski centar Kennedy, SAD [16]

Primjer pohrane vodika u energetskom sustavu je spremnik energije demonstriran na francuskom otoku Korzici, točnije u naselju Vignola. Spremnik energije je kapaciteta 1,75 MWh i snage 200 kW. Spremnik energije je predviđen za korištenje s fotonaponskom elektranom snage 560 kW [1].

U drugom slučaju, vodik se koristi za sintetiziranje prirodnog plina (proces metanizacije) gdje se dobiveni plin (metan) upušta u plinsku mrežu ili koristi za pogon plinske turbine (elektrane) gdje se proizvodi električna energija. U procesu metanizacije (Sabatierov proces), pri visokom tlaku i temperaturi, metan nastaje kao produkt spoja četiri molekule vodika s jednom molekulom ugljičnog dioksida, uz nusprodukt dvije molekule vodene pare, prema izrazu (2.7) [15]:



gdje je:

H_2 molekula vodika,

CO_2 molekula ugljičnog dioksida,

CH_4 molekula metana,

H_2O molekula vodene pare.

Pohrana vodika ili metana može se ostvariti u cjevovodu prirodnog plina ali je upitna zbog reakcije vodika s materijalima cjevovoda, kompresora i ostale plinske opreme. Potencijalno rješenje je pohrana smjese vodika (55%) i metana (45%) unutar podzemnih šupljima. Drugi oblici pohrane vodika su vezanjem vodika za metale i ukapljivanjem vodika pomoću hlađenja pod pritiskom.

Djelotvornost procesa pohranjivanja metana iznosi 42 do 58%. Povećanje djelotvornosti procesa može se postići integracijom P2G sustava u elektranu na bioplin. Nusprodukt topline iz procesa elektrolize može se iskoristiti u procesu fermentacije koji se odvaja u elektranama na bioplin. Isto tako, s obzirom elektrane na bioplin emitiraju ugljični dioksid (CO_2), on se može iskoristiti za dobivanje smjese metan-vodik u daljnjem procesu. Na taj način, povećava se iskoristivost P2G procesa i proizvodi se ekološki prihvatljiv vodik i električna energija.

Cijena investicije P2G sustava ovisno o tipu sustava, može iznositi 900 – 2.200 €/kW [3].

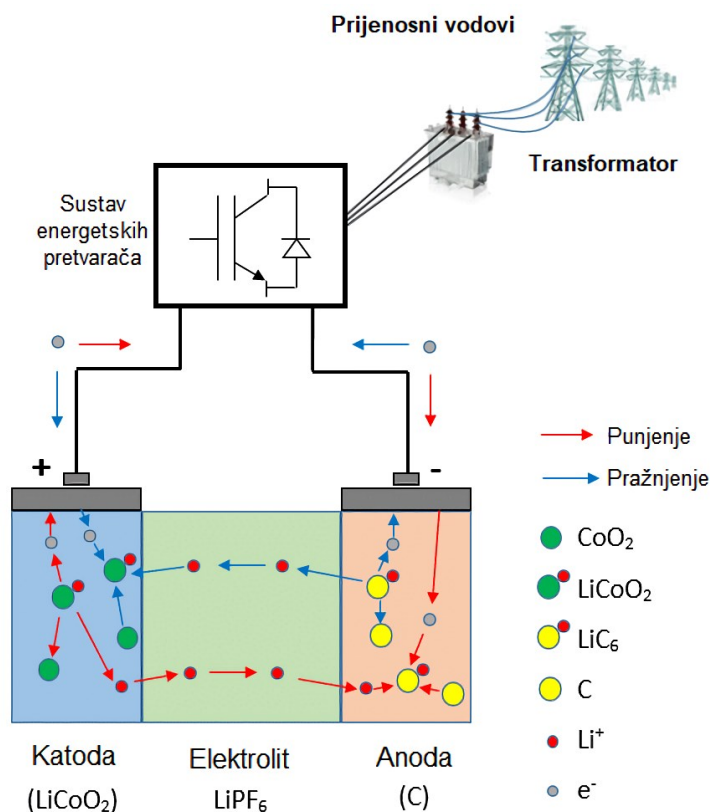
2.6. Elektrokemijski sustavi

Elektrokemijska pohrana energije je najučestaliji oblik pohrane energije u praktički svim područjima tehnologije. Električna energija kemijskim putem može biti pohranjena korištenjem baterijskih spremnika ili korištenjem protočnih baterija. Određeni spremnici energije poput punjivih baterija mogu biti višestruko puta punjeni i pražnjeni dok spremnici energije poput klasičnih, nepunjivih baterija (primjerice alkalnih) mogu biti napunjeni i ispražnjeni samo jednom (uz uvjet zadovoljenja sigurnosti i pouzdanosti baterije). S aspekta spremnika energije u elektroenergetskom sustavu, razmatraju se isključivo punjivi oblici spremnika energije.

2.6.1. Baterijski spremnici (baterije)

Baterije (Slika 2.10.) predstavljaju serijsko – paralelne kombinacije elektrokemijskih članaka (jedinica) koji djeluju na principu kemijskih reakcija odvijanih unutar baterije.

Baterijski članci su konstruirani od elektroda, elektrolita, separatora, oklopa i priključka. Unutar članka nalaze se dvije metalne elektrode (pozitivna – katoda i negativna – anoda) razdvojene elektrolitom, odnosno ionski provodnim medijem koji sadrži pozitivne ione (katione) i negativne ione (anione). Separator je najčešće napravljen od određenog oblika stakla, polimera ili polietilena i električki razdvaja pozitivnu i negativnu elektrodu. Reakcijama oksidacije na anodi i redukcije na katodi proizvodi se električna energija koja se manifestira u obliku napona (niske vrijednosti), to jest razlike potencijala na polovima baterije. Pojava napona je zapravo pojava elektromotorne sile koja pokreće elektrone u zatvorenom krugu. Odnosno, električna energija je dobivena pretvorbom iz kemijske energije pohranjene u bateriji.



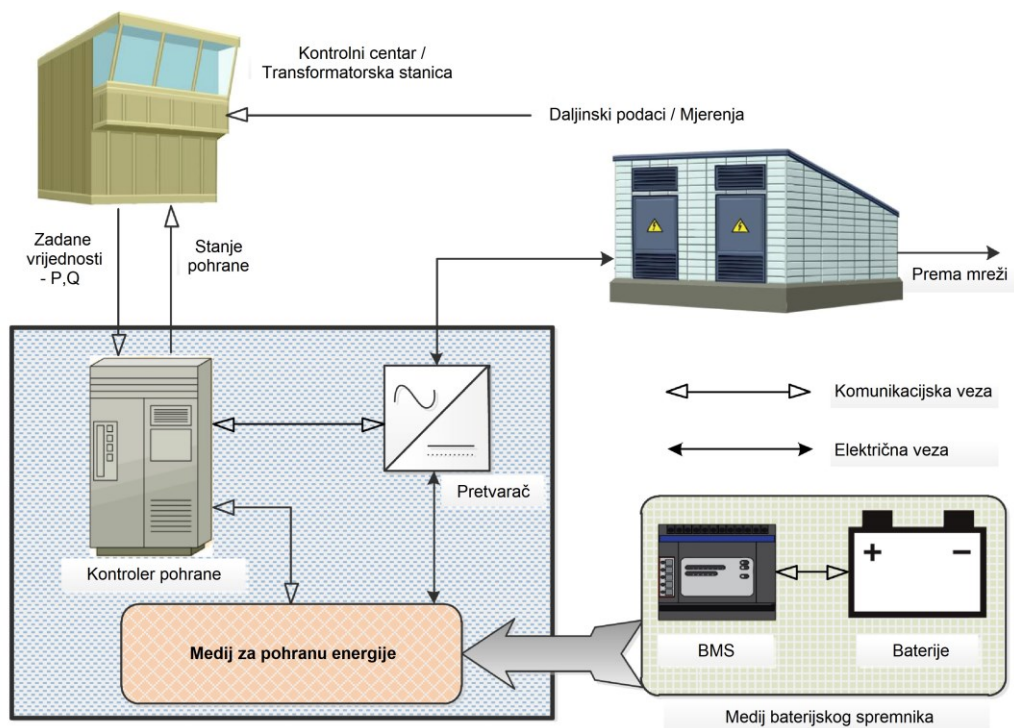
Slika 2.10. Shema Li-ion baterijskog spremnika [13]

Spajanjem vanjskog trošila na polove baterije, strujni krug se zatvara i protječe struja, to jest proces pražnjenja u kojem elektroni prelaze s anode preko vanjskog zatvorenog kruga na katodu. Iznos struje ograničen je unutarnjim otporom članka, odnosno baterije (serijski spoj otpora članaka). Nastoji se postići što manji unutarnji otpor zbog veće izlazne snage baterije, manjeg zagrijavanja baterije (manjih toplinskih gubitaka) i postizanja većeg stupnja učinkovitosti. Navedenim reakcijama, baterija se postepeno prazni i napon na polovima se snižava. Smanjenjem napona, smanjuje izlazna snaga baterije.

Oksidacijom i redukcijom svog aktivnog materijala, baterija gubi svu izlaznu snagu, to jest ispražnjena je u potpunosti. Punjenje baterija se odvija kemijskim reakcijama suprotnim naspram kemijskih reakcija pražnjenja. Procesi punjenja baterija razlikuju se ovisno o arhitekturi, vrsti elektroda i elektrolita baterije te samim kemijskim elementima korištenim u bateriji. Baterije koje nemaju sposobnost ponovnog punjenja nazivaju se primarne baterije dok baterije koje se mogu ponovno puniti nazivaju se sekundarne baterije.

Na tržištu se nalazi iznimno veliki broj različitih vrsta tehnologija baterija od kojih se ponajviše ističu baterije na bazi litija, nikla, kadmija i olova. Razvojem baterijskih tehnologija nastoje se postići veći kapaciteti, manje mase i volumeni te veća izlazna električna snaga baterija.

Baterijski spremnik energije ili BSE (Slika 2.11.) predstavlja sustav, odnosno skup elemenata, koji se sastoji od baterijskog sustava, sustava upravljanja baterijom (eng. *Battery Management System* – *BMS*), sustava pretvorbe energije (eng. *Power Conversion System* – *PCS*) i sustava upravljanja energijom (eng. *Energy Management System* – *EMS*) [17].



Slika 2.11. Baterijski spremnik energije (sustav) [17]

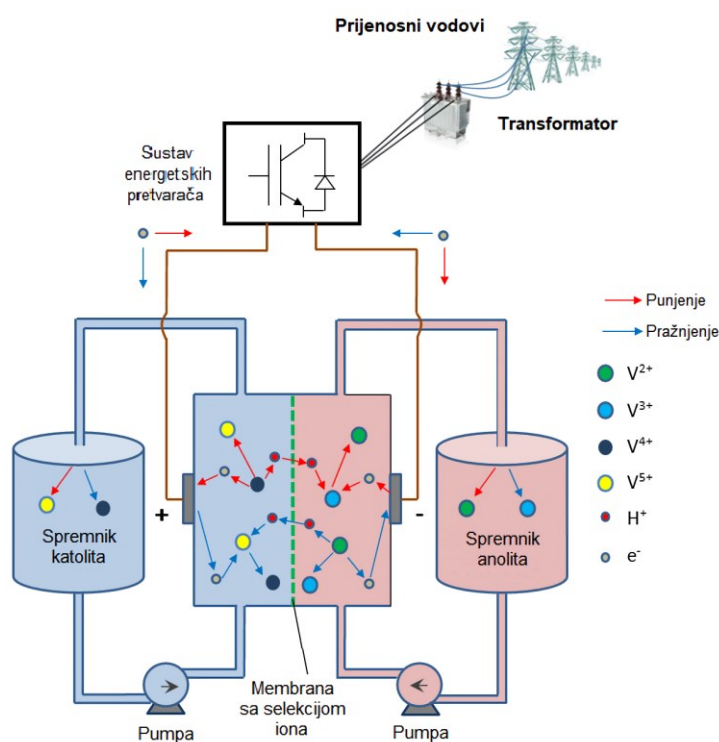
Baterijski sustav čine individualne baterije posložene u module koji su dalje posloženi u baterijske cjeline (često kontejnerske izvedbe). Zatim, sustav upravljanja energijom osigurava sigurnost baterijskog sustava nadziranjem različitih parametara poput temperature, stanja napunjenosti, temperature skupova ćelija i tako dalje. Sustav pretvorbe energije (PCS) sastoji se od dvosmjernih usmjerivača koji pretvaraju istosmjerni oblik električne energije u izmjenični prilikom ciklusa pražnjenja i izmjenični u istosmjerni prilikom ciklusa punjenja. Konačno, sustav upravljanja energijom (EMS) nadzire i upravlja tokovima energije u baterijskom spremniku energije. EMS ujedno koordinira i usklađuje međusobno ostale elemente u baterijskom spremniku te prikuplja, obrađuje i šalje podatke u nadležnu kontrolnu sobu ili centar. Osim navedenih osnovnih elemenata, baterijski spremnik energije najčešće sadrži i dodatne sigurnosne elemente poput automatskog sustava gašenja požara, detektore dimnih plinova, sustav upravljanja temperaturom prostora, ventilaciju te sustave grijanja i hlađenja baterijskog spremnika.

Prednosti baterijskih spremnika su brzi odziv, dugi životni vijek (u trajanju od približno 5 do 15 godina, visoka učinkovitost (70 do 90%) i mogućnost postizanja velikih kapaciteta pohrane električne energije i visokih izlaznih snaga. Istaknuti nedostatak su visoki investicijski troškovi u rasponu od 500 do 650 €/kW ili 175 do 200 €/kWh [1].

Primjer baterijskog spremnika je „Victorian Big Battery“ u blizini grada Geelong, u Australiji, koji je u pogonu od 2021. godine. Baterijski spremnik je snage 300 MW i kapaciteta električne energije od 450 MWh. Čine ga baterije od litij-ionskih članaka proizvedenih od tvrtke Tesla, točnije sustav sadrži 212 „Tesla Megapack“ baterijskih jedinica. Primarne usluge spremnika su sprječavanje zamračenja tijekom perioda nestabilnosti u mreži, pohrana električne energije iz OIE (vjetroelektrana) i injektiranje električne energije u mrežu tijekom perioda vršnih opterećenja [47].

2.6.2. Protočne baterije

Protočne baterije (eng. *flow batteries*) ili drugim nazivom cirkulacijske baterije (Slika 2.12.), razlikuju se od klasičnih elektrokemijskih baterija po tome da se prilikom elektrokemijskih reakcija, na elektrodama baterije ne stvaraju čvrsti spojevi. Na taj način, nema ograničenja kapaciteta pohrane baterije jer nema ograničenja na masu koja se stvara na elektrodama.



Slika 2.12. Shema protočne baterije [13]

Glavna karakteristika protočnih baterija je elektrolit u tekućem obliku (aktivni reaktant) koji cirkulira unutar baterijskog sustava i u kojemu se nalaze tekući kemijski spojevi odgovorni za pohranu energije. Elektrolit se pumpa između spremnika (spremnika pozitivnog elektrolita ili anolita i spremnika negativnog elektrolita ili katolita) i elektrokemijskog pretvarača. Elektrolitni spremnici se dimenzioniraju prema energiji, dok se elektrokemijski pretvarač dimenzionira prema snazi.

Protočne baterije postižu učinkovitost do 85% i dugi životni vijek u trajanju od 15 do 20 godina. Cijena u odnosu na kapacitet pohrane energije je drastično veća u odnosu na baterijske spremnike i iznosi u rasponu od 700 do 2.500 €/kWh [1].

Primjer spremnika energije u obliku protočnih baterija je baterijski sustav integriran u gradu Dalian, u Kini, priključen na mrežu u svibnju 2022. godine. Sustav čine vanadij redoks baterije snage 100 MW i kapaciteta pohrane 400 MWh. Primarne funkcije spremnika su pomicanje vršnog opterećenja, preuzimanje uloge pomoćnog napajanja za crni start i potencijalno omogućavanje dodatnih kapaciteta obnovljivih izvora energije [18].

2.7. Toplinski sustavi

Toplinski sustavi ili sustavi pohrane toplinske energije (eng. *Thermal Energy Storage – TES*) pohranjuju energiju u obliku topline ili hladnoće unutar materijala sposobnih za zadržavanje razine temperature u izoliranim uvjetima.

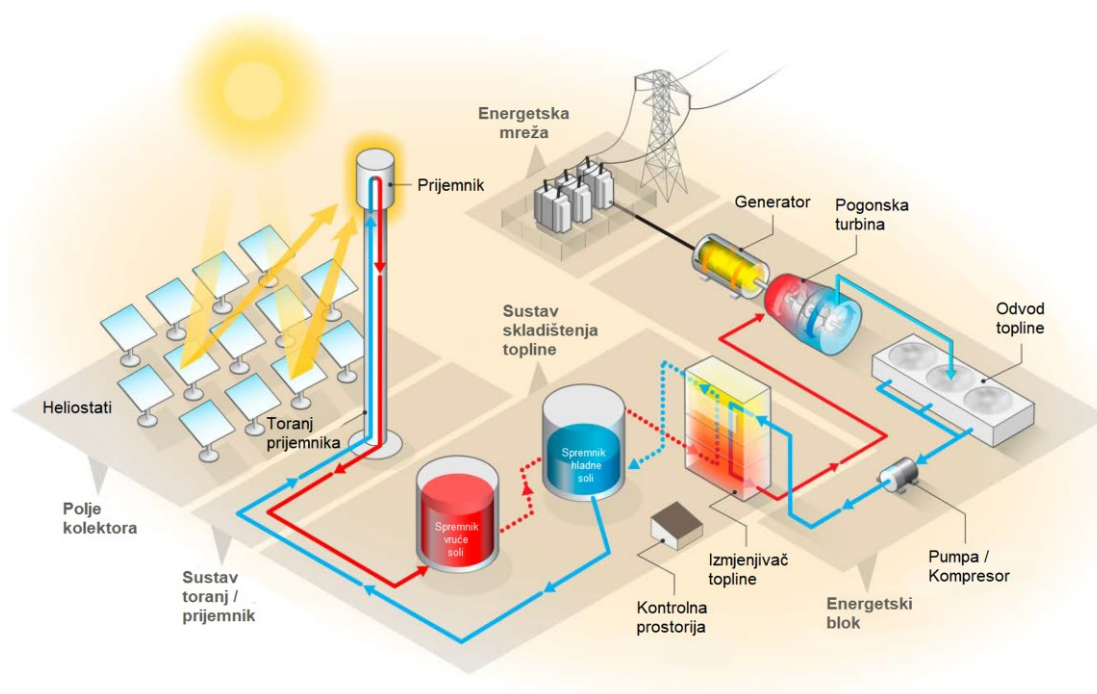
Toplinski sustavi predstavljaju spremnike energije koji pohranjuju toplinsku energiju na temperaturama u približnom rasponu od -40 °C do 400 °C. Zbog niske učinkovitosti toplinskih sustava pohrane, najčešće se integriraju u kombinaciji s drugim sustavima poput CAES-a, radi iskorištavanja otpadne topline. Prednosti sustava su pohrana velike količine energije čije vrijeme pohrane može iznositi do nekoliko dana [1, 5].

Toplinski sustavi kategoriziraju se u sustave aktivne pohrane i sustave pasivne pohrane. Sustavi aktivne pohrane djeluju procesom prijenosa topline putem prisilne konvekcije u materijal za skladištenje. Aktivni sustavi se dodatno dijele na izravne i neizravne sustave, gdje kod izravnih sustava fluid za prijenos topline služi kao medij za skladištenje, dok se kod neizravnih sustava koristi zasebni fluid kao medij za skladištenje. S druge strane, sustavi pasivne pohrane sadrže dva medija za pohranu te fluid za prijenos topline prolazi kroz medij pohrane samo u svrhu punjenja i pražnjenja čvrstog materijala.

Toplinski sustavi mogu se dodatno podijeliti u tri potkategorije odnosno pohrana osjetne topline, pohrana latentne topline i termokemijska pohrana.

2.7.1. Pohrana osjetne topline

Pohrana osjetne topline (eng. *sensitive-heat storage* ili eng. *sensible heat storage*) djeluje principom promjene temperature određenog materijala. Dovođenjem određene količine energije u materijal uzrokuje zagrijavanje materijala ili odvođenjem energije iz materijala uzrokuje se hlađenje materijala (Slika 2.13.).



Slika 2.13. Shema postrojenja pohrane osjetne topline (rastaljena sol) [19]

Vrsta materijala se odabire u ovisnosti o zahtjevima toplinskog kapaciteta, veličine prostora, gustoće materijala, toplinske provodnosti materijala, električne provodnosti (izolacije), kemijske stabilnosti i tako dalje. Tipične vrste materijala su krutine ili tekućine poput ulja, vode, kamena, granita i betona. Količina pohranjene topline (energije, [J]) u materijalu proporcionalna je masi materijala, razlici temperature i specifičnom toplinskom kapacitetu i računa se pomoću izraza (2.8) [20]:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (2.8)$$

gdje je:

- m masa materijala pohrane [kg],
- c_p specifični toplinski kapacitet materijala [J/(kgK)],
- ΔT promjena temperature [K].

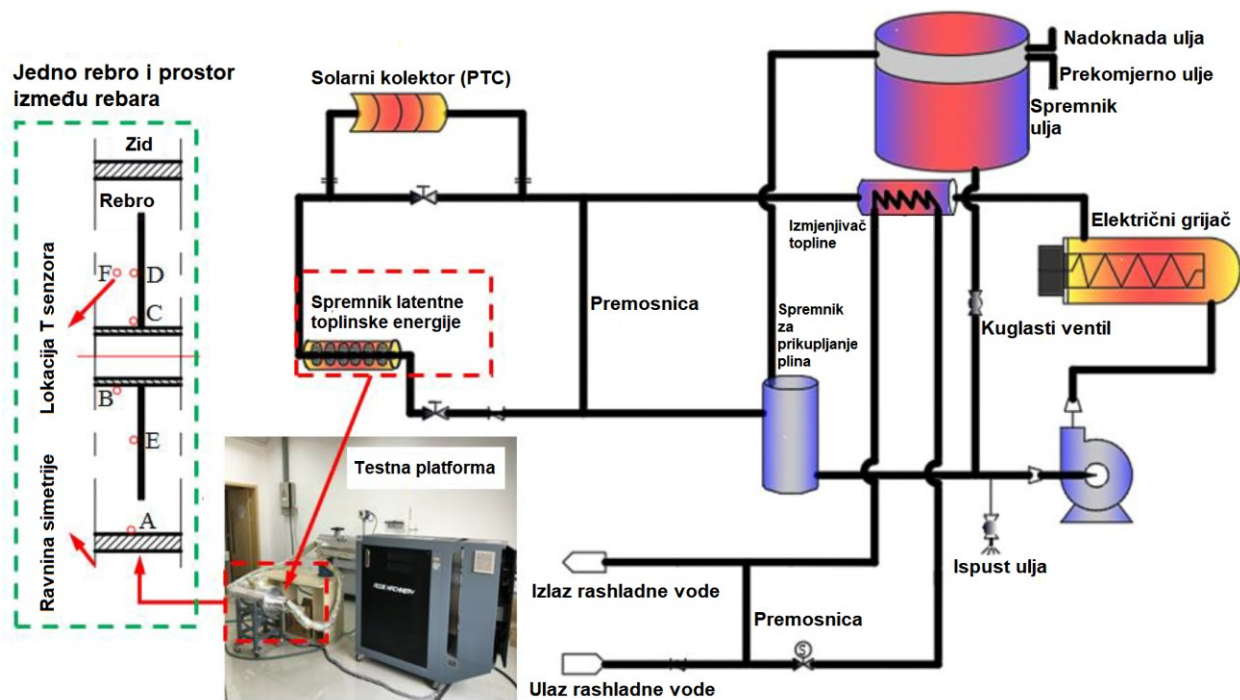
Kapacitet pohrane ograničen je gornjim i donjim temperaturnim granicama. Za transfer energije najčešće se koriste rastaljene soli u obliku tekućeg fluida koji služi za prijenos topline. Pretežito navedeni princip rada ne predstavlja stvarno skladište energije već predstavlja ispomoć pri varijabilnoj proizvodnji energije iz obnovljivih izvora energije poput vjetroelektrana ili solarnih elektrana. Najveću primjenu imaju s koncentracijskim solarnim elektranama (eng. *Concentrated Solar Power - CSP*). Za dugoročniju pohranu energije mogu se koristiti toplinske pumpe kojima se toplinska energija skladišti u materijalima s predviđenim gubicima i visokom efikasnošću.

Tijekom faze skladištenja, u visokotemperaturni spremnik se pomoću električnih strojeva komprimira tekući fluid visoke temperature. Nadalje, tijekom faze pražnjenja, tekući fluid se može iskoristiti za pogon turbogeneratora. Ukupna efikasnost ciklusa pohrane i pražnjenja iznosi približno 70% [20].

Primjer pohrane osjetne topline je solarna proizvodna jedinica Solana (eng. *The Solana generating station*) smještena u gradu Gila Bend (Arizona, SAD) koja je u pogonu od 2013. godine. Proizvodna jedinica se sastoji od koncentracijske solarne elektrane (CSP) u kombinaciji s termalnim spremnikom (12 spremnika rastaljene soli) kapaciteta pohrane preko 1.000 MWh. Kapacitet pohrane toplinske energije je 6 sati. Primarna uloga spremnika je ujednačenje proizvodnje elektrane, ponajviše injektiranjem električne energije u mrežu tijekom perioda noćnih sati [21].

2.7.2. Pohrana latentne topline

Pohrana latentne topline (eng. *latent-heat storage*) vrši se korištenjem faznog prijelaza materijala odnosno latentne tekuće-parne faze fluida gdje se postižu veće energetske gustoće (Slika 2.14.).



Slika 2.14. Shema eksperimentalne pohrane latentne topline [22]

Međutim, korištenjem navedenog fluida, problem predstavlja povećani zauzeti volumen parne faze. Iz tog razloga, preferirano rješenje je korištenje tekuće-krutog fluida, odnosno njegove latentne topline postignuta taljenjem i skrućivanjem materijala. Energija u obliku topline (konstantne temperature) se pohranjuje u materijal tijekom procesa taljenja dok se energija oduzima iz materijala prilikom očvršćivanja materijala. Istaknuti materijal za ovu primjenu je voda (u kombinaciji sa soli) dok su efikasniji korišteni materijali različiti kloridi, parafini, nitrati, hidroksidi i tako dalje. Korištenjem navedenog fluida postižu se manji kapaciteti pohrane ali uvelike veći naspram pohrane osjetne topline. Količina pohranjene topline (energije, [J]) u materijalu, računa se prema izrazu (2.9) [20]:

$$Q = m \cdot \Delta h \quad (2.9)$$

gdje je:

m masa materijala pohrane [kg],

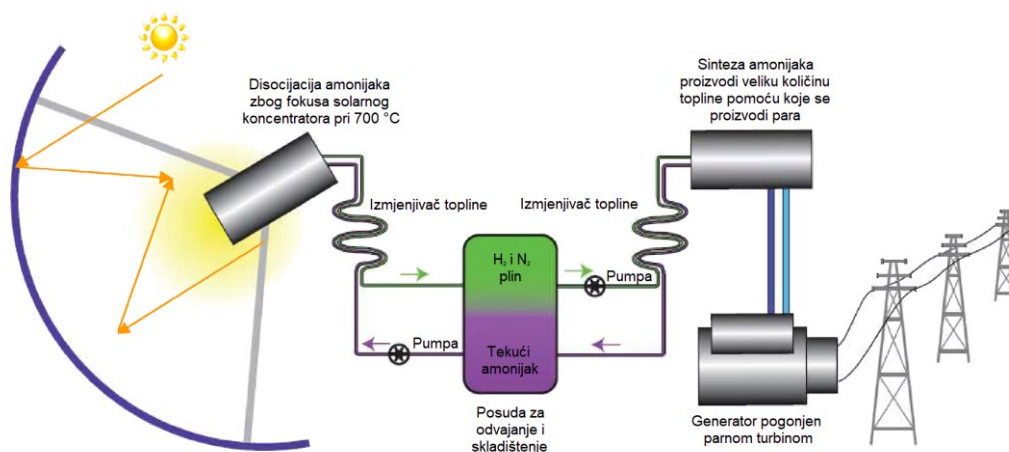
Δh entalpija fazne promjene [J/kg].

Kapacitet pohrane ograničen je gornjim i donjim temperaturnim granicama. Pohrana latentne topline, još uvijek je u eksperimentalnoj fazi i zahtijeva daljnja istraživanja prije implementacije u energetska mrežu.

Prema dosadašnjim istraživanjima, trenutno je moguće korištenje isključivo anorganskih soli pri temperaturama približnim 650 °C, uz upitnu stabilnost [1].

2.7.3. Termokemijska pohrana energije

Termokemijska pohrana energije (eng. *thermochemical energy storage*) je kombinacija kemijskih reakcija i sorpcijskih sustava (otvorenih ili zatvorenih sustava pohrane) koja djeluje na principu skladištenja velike količine energije u obliku produkata kemijskih reakcija koje se odvijaju na temperaturama iznad 400 °C (Slika 2.15.). Preciznije, pohrana energije odnosno pohrana topline unutar materijala postiže se tijekom procesa desorpcije, to jest uklanjanja adsorbiranih (vezanih) komponenata (plina ili tekućine) s unutarnje površine poroznog materijala. Produkti reakcija skladište se odvojeno. Pohranjena energija može se iskoristiti u obliku oslobođene topline, pomoću suprotnih reakcija, to jest adsorpcijom (vezanjem plinova ili tekućina na unutarnju površinu poroznog materijala). Prilikom odabira materijala bitni parametri su porast temperature, krivulje proboja, toplinski koeficijent učinkovitosti i gustoća energije u odnosu na volumen adsorbensa. Najčešći adsorbensi su silika gelovi i zeoliti. Tipične korištene reakcije su reakcije karbonizacije, hidratacije, razgradnje amonijaka, oksidacije metala i ciklusi sumpora. Navedena vrsta pohrane najčešće ima bolje karakteristike u odnosu na pohranu latentne i osjetne topline. Zbog odvojenog skladištenja produkata, termokemijska pohrana može služiti za dugotrajnu (sezonsku) pohranu energije. Nedostaci pohrane (kemijskih reakcija krutina-plin) su niska termodinamička učinkovitost osnovnog ciklusa i loš prijenos topline i mase u reaktivnom sloju. Kapacitet pohrane energije je ograničen temperaturama adsorpcije [20].



Slika 2.15. Termokemijska pohrana energije korištenjem amonijaka [23]

Potencijalna primjena termokemijske pohrane je u kombinaciji sa solarnim koncentradorima i parnom turbinom (Slika 2.15.). Solarnim koncentradorima fokusiranjem sunčevog zračenja u prijemnik/reaktor postižu se vrlo visoke temperature (približno 700 °C) na kojima se postiže reverzibilna disocijacija pumpanog (dovedenog) amonijaka u plinoviti dušik i vodik. Sintezom plinova dušika i vodika u reaktoru amonijaka proizvodi se velika količina topline (otpuštanje energije). Razvijenom toplinom se proizvodi para koja pokreće parnu turbinu na koju je mehanički vezan generator kojim se proizvodi električna energija i šalje u mrežu. Tekući amonijak pohranjuje se u posudi te se energija zapravo pohranjuje kao kemijska energija vodika. Izmjenjivači topline služe za prijenos topline od izlaznih toplijih produkata do ulaznih hladnijih reaktanata čime se spremnik i cjevovodi održavaju na približno ambijentalnoj temperaturi [23].

3. BATERIJSKI SPREMNICI ENERGIJE (BSE)

Baterijski spremnici energije (eng. *Battery Energy Storage System - BESS*) ili skraćeno BSE, predstavljaju elektrokemijsku pohranu energije. Ovisno o tehnologiji baterijskog spremnika, njihova uloga može biti različita. Tehnološkim razvojem i povećanom primjenom baterijskih sustava, nastaju nove tehnologije s rastućim kapacitetima i izlaznim snagama. U okviru poglavlja, promatraju se klasične baterije i protočne baterije (baterijski spremnici), to jest njihove glavne karakteristike, parametri, strukture i princip rada. Elementarni princip rada i struktura klasičnih i protočnih baterijskih sustava prikazana je u prethodnom poglavlju 2.6.

3.1. Osnovne značajke baterijskih spremnika

Odabir prikladnog baterijskog spremnika prilikom integracije unutar elektroenergetske mreže zahtijeva detaljnu tehničku analizu utjecaja spremnika na same pojave u mreži. Da bi se provela analiza, potrebno je znati osnovne značajke, to jest parametre koji karakteriziraju određene spremnike. Baterijski spremnici, to jest baterije karakterizirane su velikim brojem parametara od kojih su neki stalni, a neki ovisni o pogonskim uvjetima u kojima se baterija nalazi. Osnovni parametri baterijskih spremnika su nazivni napon, nazivna snaga, gustoća energije, vrijeme odziva, vrijeme trajanja, učinkovitost, samopražnjenje i cijena.

Nazivni napon predstavlja vrijednost napona na terminalima baterijskog spremnika te je ključan parametar koji se razmatra u ovisnosti o naponskoj razini prijenosne mreže na mjestu ugradnje. Nazivna snaga je najviša snaga baterijskog spremnika energije i ovisi o regulacijskim potrebama u mreži. Gustoća energije predstavlja količinu pohranjene energije u odnosu na masu ili volumen spremnika, promatrano pri maksimalnoj napunjenosti spremnika. Gustoća energije promatra se ukoliko je lokacija ugradnje prostorno ograničena ili se baterijski spremnik postavlja na određenu površinu (platformu) s maksimalnom nosivošću. Vrijeme odziva predstavlja vrijeme potrebno da sustav dosegne maksimalnu snagu pražnjenja od trenutka primitka upravljačkog signala. Vrijeme trajanja ili vrijeme pražnjenja predstavlja period u kojemu se spremnik u potpunosti isprazni. Učinkovitost (efikasnost) predstavlja omjer električne energije predane elektroenergetskoj mreži tijekom ciklusa pražnjenja i primljene električne energije tijekom ciklusa punjenja, izraženo u postotcima. Samopražnjenje predstavlja gubitak pohranjene energije tijekom mirovanja, bez utjecaja ciklusa punjenja i pražnjenja. Cijena nije tehnički parametar baterijskog spremnika, ali je ključna zbog određivanja isplativosti investicije ugradnje takvih spremnika.

Tablična metoda usporedbe nekoliko vrsta baterijskih tehnologija s prikazanim karakterističnim parametrima pojedinačnih tehnologija prikazana je u tablici 3.1 [6].

Cijena se najčešće promatra u odnosu na kapacitet pohrane energije i u odnosu na snagu. Kao dodatni parametri mogu se spomenuti dugotrajnost, predviđeni maksimalni broj ciklusa, nazivni napon članka, odnos vremena punjenja i vremena pražnjenja i radna temperatura.

Tablica 3.1. Usporedba parametara različitih baterijskih spremnika [6]

| --- | Olovne | Ni-Cd | Li-ion | NaS | ZEBRA | VRB | ZnBr |
|--------------------------------------|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------|---------------|
| TEHNIČKE ZNAČAJKE | | | | | | | |
| Dugotrajnost [god.] | ≤ 20 | ≤ 20+ | ≤ 10 | ≤ 15 | ≤ 15 | ≤ 20 | ≤ 10 |
| Broj ciklusa (DoD 80%) | 200 – 1.000 | 1.000 – 3.500 | 1.000 – 2.000 | 4.000 – 5.000 | 4.000 – 5.000 | > 12.000 | 2.000 – 3.000 |
| Gustoća energije [Wh/kg] | 15 - 40 | 15 - 40 | 70 - 250 | 100 - 120 | 100 - 120 | 50 | 75 - 85 |
| Nazivni napon članka [V] | 2 | 1,2 | 2,4 – 3,7 | 2 | 2,5 | 1,2 | 1,8 |
| Korisnost [%] | 70 - 82 | 60 - 70 | > 90 | 80 - 90 | 85 - 95 | 70 - 85 | 60 - 75 |
| Vrijeme punjenje / pražnjenje | 5 / 1 | 1 / 1 | 1 / 1 | 1 / 1 | 1 / 1 | 1 / 1 | 1 / 1 |
| Vrijeme odziva [ms] | < 1 | < 1 | < 1 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Samopražnjenje [%/dan] | 0,033 – 0,3 | 0,067 – 0,6 | ≤ 0,1 | 0 (nova) | 0 | malo | veliko |
| Radna temperatura [°C] | -10 - +40 | -40 - +50 | -20 - +60 | +310 - +350 | +310 - +350 | +20 - +40 | +20 - +50 |
| Pogodne za snage [MW] | ≤ 10 | ≤ 30 | ≤ 2 | ≤ 50 | ≤ 5 | ≤ 15 | ≤ 1 |
| Vrijeme pražnjenja [h] | do 5 | < 1 | ≤ 2 | 2 - 8 | 2 - 8 | 4 – 8+ | 2 – 4 |
| RASPON CIJENA | | | | | | | |
| Cijena baterije [€/kW] | 100 - 500 | 400 - 900 | 150 – 1.000 | 3.000 – 4.000 | 150 – 1.000 | 500 – 1.300 | 300 – 700 |
| Cijena baterije [€/kWh] | 100 - 200 | 450 – 1.100 | 700 – 1.300 | 400 - 600 | 550 - 750 | 100 - 400 | 450 - 550 |

Prilikom integracije baterijskih spremnika energije unutar mreže, dodatno je potrebno napraviti ekonomsku analizu isplativosti, odnosno proučiti potencijalne troškove koji se mogu pojaviti. Najčešći troškovi povezani s baterijskim spremnicima su investicijski troškovi, odnosno cijena baterije i pripadajućih elemenata (usmjerivača i ostalih energetske komponenti, sustava vođenja i nadzora, sigurnosnih sustava), troškovi gubitaka (punjenje, pražnjenje, samopražnjenje), troškovi upravljanja i nadzora, troškovi osiguranja smještajnog prostora baterije (postojeći ili novi objekt), troškovi održavanja, troškovi projektne pripreme, troškovi priključenja na mrežu, troškovi sigurnosti pogona, troškovi prilagodbe uvjetima na lokaciji ugradnje baterije i troškovi demontaže, dekomisije i reciklaže (problem opasnih kemijskih tvari poput primjerice litija).

Prilikom fizičke ugradnje baterijskog spremnika u obzir je potrebno uzeti utjecaj atmosferskih uvjeta i dimenzionirati pravilnu zaštitu te izvršiti provjeru utjecaja spremnika na podlogu na koju se postavlja (potrebno je izvršiti adekvatnu pripremu podloge). Isto tako, potrebno je osigurati adekvatan pristup bitnim elementima spremnika radi održavanja.

3.2. Usporedba tehnologija baterijskih spremnika

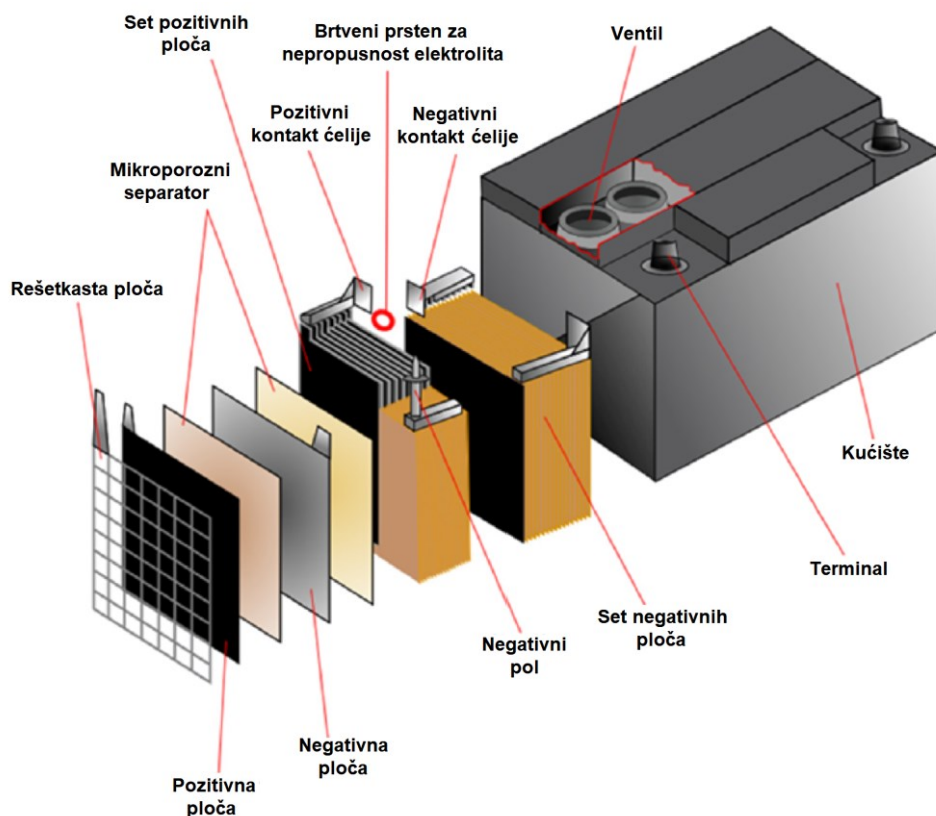
Pojedinačne tehnologije baterijskih spremnika karakterizirane su različitim parametrima, odnosno značajkama. Iz tog razloga, izbor traženih parametara spremnika zahtjeva tehničko-ekonomsku analizu uvjeta u elektroenergetskoj mreži kao i definiranje zahtijevanih funkcija koje spremnik mora obavljati. Prema traženim parametrima, odabire se optimalna tehnologija baterijskih spremnika.

Prema veličini spremnika, koju predstavlja snaga i pohranjena energija spremnika, spremnici se klasificiraju na velike centralizirane, distribuirane lokalne spremnike i mikro spremnike za kućanstva.

Za primjenu u prijenosnoj mreži, optimalni su veliki centralizirani spremnici zbog velike količine pohrane energije i visoke nazivne snage. Trenutno je nizak udio baterijskih spremnika u prijenosnoj mreži, prvenstveno zbog vrlo visokog udjela, zrelosti tehnologije i optimalnih karakteristika reverzibilnih elektrana.

3.2.1. Olovno-kiselinske baterije

Olovno-kiselinske baterije (eng. *lead-acid batteries*) ili skraćeno olovne baterije, najstariji su komercijalni baterijski spremnici energije (Slika 3.1.).



Slika 3.1. Elementi olovno-kiselinskog baterijskog spremnika [24]

Najrašireniju primjenu pronašli su u transportnom sektoru gdje se koriste kao spremnici energije za pogon električnih sustava na prijevoznim vozilima. Istaknuta odlika olovnih baterija je visoka pouzdanost i niska cijena zbog čega imaju raznoliku primjenu. Iznimno su zrela tehnologija pohrane energije koja je prisutna preko gotovo dvjesto godina (izumio Gaston Planté 1858. godine).

Mane olovnih baterija su nizak kapacitet pohrane energije u odnosu na masu baterije (do 30 Wh/kg) i nizak broj maksimalnih ciklusa punjenja i pražnjenja (do 1.000 dubokih ciklusa). Isto tako, dubokim pražnjenjem olovnih baterija, radom na visokim temperaturama ili preniskim stanjem napunjenosti, olovne baterije se trajno oštećuju zbog pojave kristala olovnog sulfata na elektrodama, čime se trajno smanjuje kapacitet i izlazna snaga baterije.

Unutarnji otpor baterije je iznosom nizak i minimalan pri maksimalnoj napunjenosti. Zbog toga, olovne baterije postižu visoke izlazne snage (iznosi struja do deset puta veći od nazivnog kapaciteta). Pražnjenjem baterije, smanjuje se iznos izlazne struje. Nazivni napon članka je približno 2 V. Životni vijek je u prosjeku oko 6 godina ili 500 do 1.000 ciklusa. Stupanj samopražnjenja je približno 4 do 6% mjesečno [1, 7].

Olovne-kiselinske baterije dijele u pet osnovnih kategorija [7]:

Prvu kategorije čine pokretačke baterije (eng. *starter batteries*) koje su dizajnirane za neprekidnu napunjenost i pružanje vrlo visoke izlazne snage (struje) postignute u kratkom vremenskom razdoblju. Pokretačke baterije u najvećoj mjeri se koriste u kombinaciji s motorima s unutarnjim izgaranjem u svrhu napajanja elektropokretača visokim iznosom struje, napajanja sustava zapaljenja goriva i ostalih električnih sustava. Glavna odlika baterije je niska specifična cijena po kapacitetu pohrane, približno 0,2 €/Wh.

Drugu kategoriju čine pogonske baterije (eng. *drive batteries*) s ravnim pločama, koje se koriste kao izvor energije za pogon električnog motora u električnim vozilima poput viličara. Karakterizira ih veći kapacitet naspram pokretačkih baterija, a principom rada i strukturom su slični. Prednost pogonskih baterija je otpornost baterije pri radu s niskim stanjem napunjenosti. Isto tako, predviđene su za visok broj ciklusa punjenja i pražnjenja. Specifična cijena po kapacitetu energije je približno 0,5 €/Wh.

Treću kategoriju čine baterije s gel elektrolitom (eng. *gel electrolyte batteries*) ili kraćim nazivom gel baterije. Gel baterije koriste se u profesionalnoj opremi malih dimenzija poput radio komunikacije. Kapacitet pohrane pojedinih baterija je približno 100 Ah. Prednost Gel baterija je mogućnost rada u položajima gdje baterija nije uspravno orijentirana pri radu. Uz to, ne zahtijevaju nikakvo održavanje. Specifična cijena po kapacitetu energije je približno 0,6 €/Wh.

Četvrtku kategoriju čine AGM (eng. *Absorbent Glass Mat*) baterije čija je glavna karakteristika korištenje finih staklenih vlakana koja upijaju sumpornu kiselinu zbog čega je baterija otporna na izlivanje elektrolita. Prednosti AGM baterija su visoka izlazna snaga (visok iznos struje) zbog izrazito malog iznosa unutarnjeg otpora i dugi životni vijek. Nedostatak je ubrzano sušenje elektrolita i korodiranje pozitivne elektrode.

Petu kategoriju čine stacionarne baterije (eng. *stationary batteries*) s cjevastim pločama. Dizajn cjevastih ploča drži aktivni materijal na okupu te ga pritišće na sabirnu rešetku. Isto tako, dizajn je okarakteriziran strukturom u obliku okvira koji se sastoji od linije vertikalnih stupova povezanih na zajedničku sabirnu rešetku.

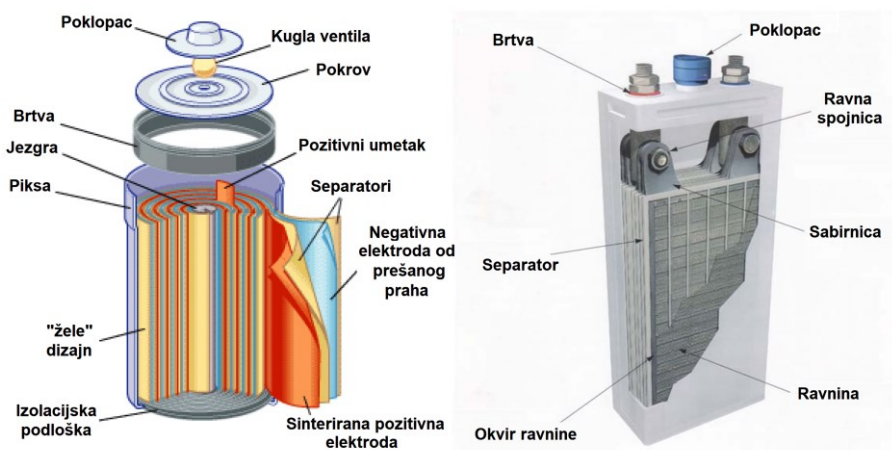
Iznad svakog stupa nalaze se mikro-porozne izolacijske cijevi u kojima se nalazi aktivna masa oksida olova. Spoj svih navedenih komponenti čini pozitivnu elektrodu (ploču).

Primjer primjene olovnih baterija u prijenosnoj, energetske mreži je baterijski spremnik snage 10 MW i kapaciteta 40 MWh implementiran u gradu Chino u američkoj saveznoj državi Kaliforniji. Efikasnost spremnika iznosi približno 70% (ovisno o opterećenju i krivulji pražnjenja) [1].

3.2.2. Baterije na bazi nikla (Ni-Cd, Ni-MH)

Baterije na bazi nikla u najvećoj mjeri predstavljaju dvije tehnologije pohrane, nikal-kadmij (Ni-Cd) i nikal-metal-hidrid (Ni-MH). Sličnosti dvije tehnologije su jednaki napon članaka od približno 1,2 V i dvostruko veća snaga u odnosu na masu, naspram olovno-kiselinskih baterija.

Nikal-kadmij baterija (eng. *nickel-cadmium battery*) je stariji tip tehnologije pohrane na bazi nikla (Slika 3.2.). U prošlosti navedeni tip baterije je našao široku primjenu na raznim područjima poput baterija za prijenosne elektroničke uređaje, baterija za električna radna vozila i baterija za prva električna vozila krajem 20. stoljeća.

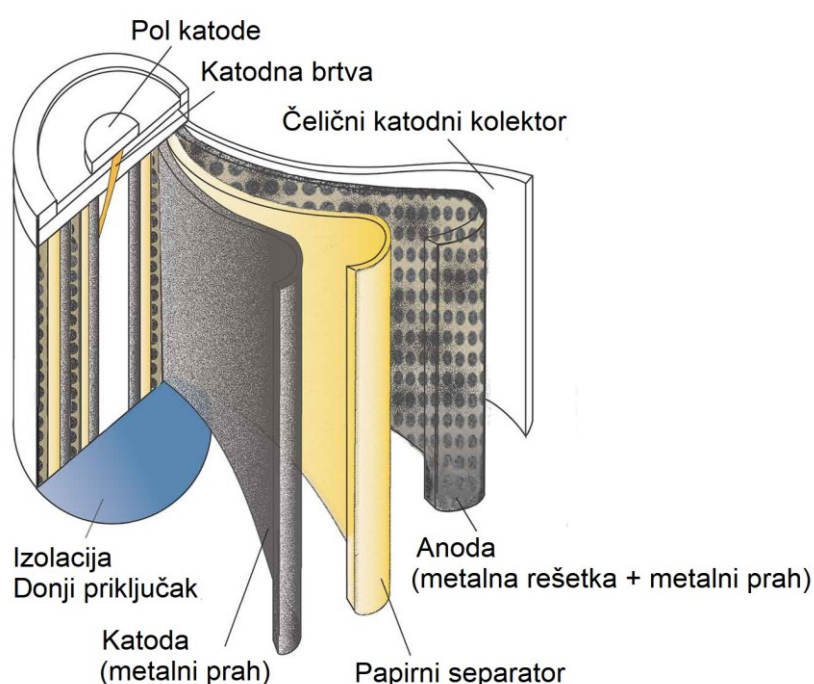


Slika 3.2. Presjek cilindrične (lijevo) i prizmatične (desno) Ni-Cd baterije [24]

Gustoća energije nikal-kadmij tehnologije prosječno iznosi 60 MWh/kg. Međutim zbog otrovnih svojstava kadmija, navedeni tip tehnologije pohrane se sve učestalije zabranjuje koristiti. Također, zbog visoke cijene tehnologije nisu doživjele veći tehnološki napredak i rasprostranjenost u energetici. Životni vijek je približno 10 godina ili 500 do 3.000 ciklusa, dok je stupanj samopražnjenja 5 do 20% mjesečno [1].

Primjer pohrane energije u elektroenergetskoj mreži korištenjem nikal-kadmij tehnologije je baterijski spremnik u saveznoj državi Aljaski, u SAD-u. Instalirani baterijski spremnik je u mogućnosti pružiti snagu od 40 MW u trajanju od 7 minuta, čime kapacitet iznosi 4,7 MWh i snagu od 27 MW u trajanju od 15 minuta, čime kapacitet iznosi 6,7 MWh [1].

Nikal-metal-hidrid baterija (eng. *nickel-metal hydride battery*) je noviji tip tehnologije pohrane koji nastoji zamijeniti starije nikal-kadmij (Ni-Cd) baterije. Prednost nikal-metal-hidrid (Ni-MH) baterija (Slika 3.3.) je izbjegavanje korištenja kadmija čime se eliminiraju otrovne supstance u sadržaju baterije.



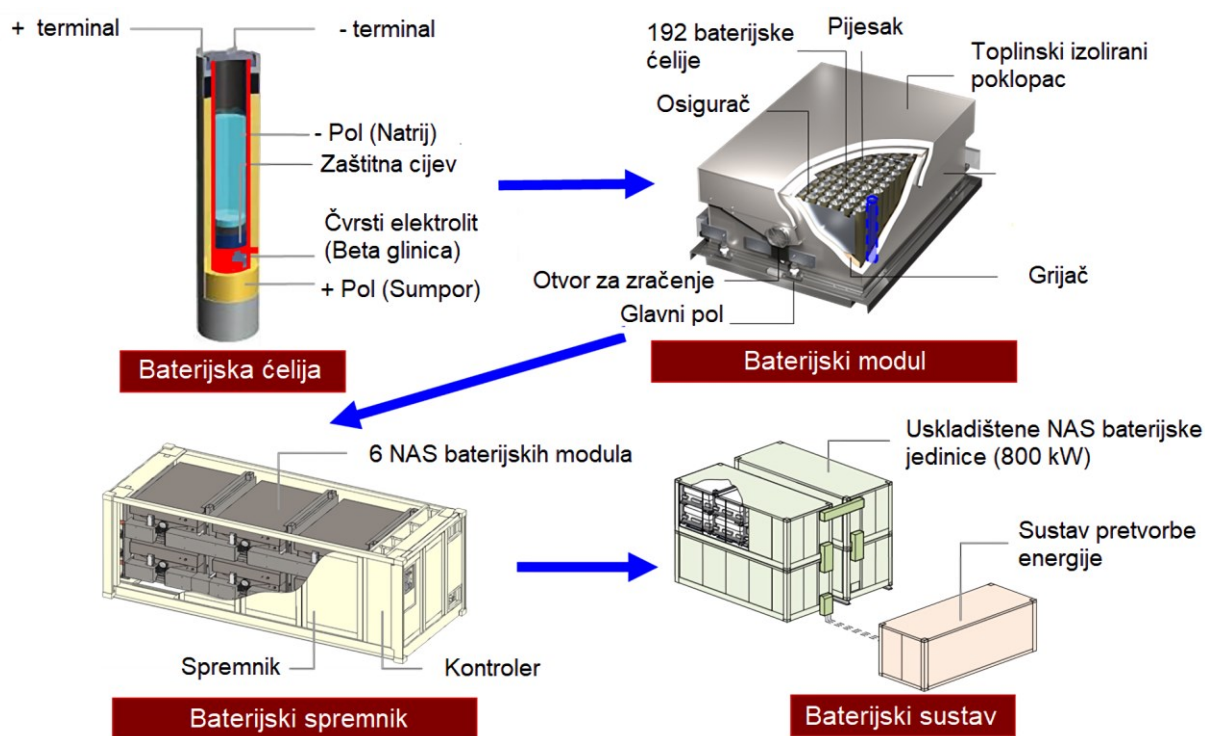
Slika 3.3. Presjek nikal-metal-hidrid (Ni-MH) baterije [25]

Gustoća energije je veća u odnosu na prijašnju Ni-Cd tehnologiju i iznosi približno 80 Wh/kg. Nazivni napon članka je 1,25 V. Prednosti su visoki iznosi struja pražnjenja i umanjen memorijski efekt naspram Ni-Cd tehnologije [1].

Nedostaci su nemogućnost rada na niskim temperaturama, nepreporučeno punjenje dok baterija nije u potpunosti ispražnjena, povećani stupanj samopražnjenja u iznosu od 15 do 25% mjesečno i kratak životni vijek (2 do 5 godina ili 300 do 600 ciklusa).

3.2.3. Natrij-sumpor baterije (NaS)

Natrij-sumpor baterije (eng. *sodium-sulfur batteries*) karakterizirane su korištenjem elektrolita napravljenog od keramike zbog dobre provodnosti iona, u tekućem agregatnom stanju zbog čega se održavaju baterije na temperaturama u rasponu od 290 do 350 °C. Zbog zapaljivih svojstava natrija, kućište natrij-sumpor baterije (Slika 3.4.) mora biti hermetički zatvoreno.



Slika 3.4. Shema NaS baterijskog spremnika (sustava) [26]

Kemijske reakcije odvijaju se na elektrodama napravljenim od tekućeg natrija (negativna elektroda) i sumpora (pozitivna elektroda). Prednost ove vrste baterija je visok broj ciklusa punjenja i pražnjenja (preko 4.000 ciklusa uz uvjet pražnjenja do 80% nazivnog kapaciteta) što omogućuje dugi životni vijek baterije do 15 godina [1].

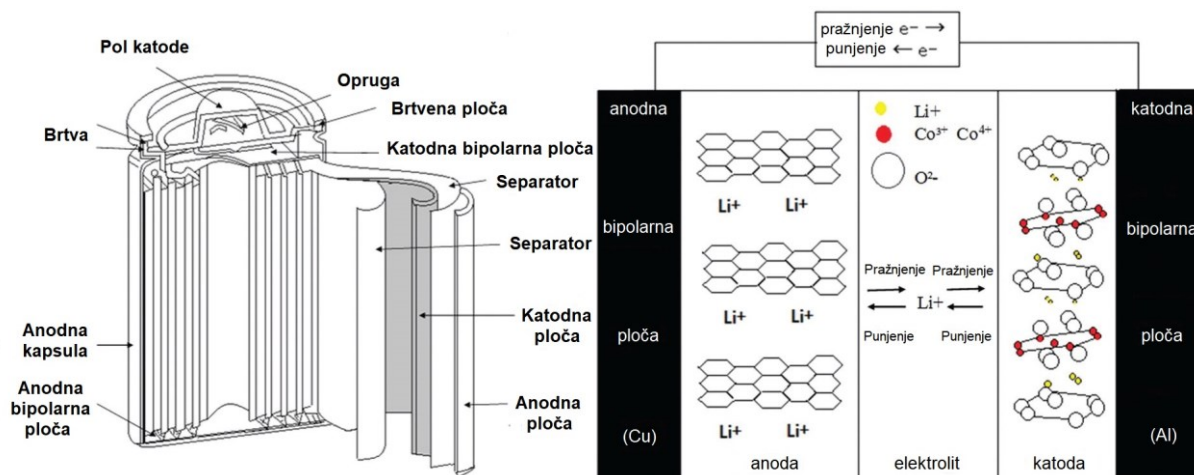
Prosječni parametri NaS baterijske tehnologije čine iznos gustoće energije od 117 kWh/t, učinkovitost ciklusa punjenja i pražnjenja preko 87% (učinkovitost cijelog sustava iznad 17%) [27].

Isto tako, zbog niske cijene materijala korištenim u bateriji, pogodne su za korištenje u velikim kapacitetima prikladnim za elektroenergetsku mrežu gdje se mogu aktivno koristiti i do nekoliko sati ovisno o opterećenju i namjeni. Natrij-sumpor baterije koriste se za pohranu velike količine energije, tipično kapaciteti baterija iznose nekoliko MWh (pri snagama nekoliko MW i vremenske konstante od nekoliko sati).

Primjer natrij-sumpor baterijskih spremnika u elektroenergetskoj mreži je baterijski sustav implementiran u Japanu, ukupnog kapaciteta 244,8 MWh. Konstruiran je od 17 baterijskih jedinica snage 2 MW (ukupno 34 MW). Baterijski sustav se koristi za pohranu energije proizvedene iz vjetroparka snage 51 MW. Postignuta efikasnost baterijskog spremnika iznosi 75% [1].

3.2.4. Litij-ionske baterije (Li-ion)

Litij-ionske baterije (eng. *lithium-ion batteries*) proizvode električnu energiju kruženjem pozitivnih iona litija s negativne, najčešće grafitne elektrode prema prijelaznom metalnom oksidu napravljenog od kobalta ili mangan dioksida (Slika 3.5.).



Slika 3.5. Presjek i princip rada Li-ion baterijskog članka (baterije) [28]

Litij-ionske baterije karakterizirane su visokom gustoćom energije, to jest količinom pohranjene energije u odnosu na masu baterije. Nadalje, imaju nizak stupanj samopražnjenja (približno 2% mjesečno) zbog čega su pogodne za dugotrajnu pohranu energije.

Iznos ciklusa punjenja i pražnjenja može doseći približno 4.000 ciklusa, ovisno o razini ispražnjenosti baterije. Mane litij-ionskih baterija su visoka cijena i problemi koji se javljaju tijekom odlaganja i recikliranja baterija. Prosječan životni vijek je 10 godina [1].

Litij-ionske baterije dodatno se mogu podijeliti u tri tehnologije [1].

Litij-ion (Li-ion) tehnologija karakterizirana je zadržavanjem litija u ionskom stanju. Razlog tomu je korištenje spoja za umetanje, pozitivnih elektroda napravljenih od kobalt dioksida i manganovog ili željezovog fosfata i negativnih elektroda najčešće napravljenih od grafita. Litij-ion tip tehnologije baterije odlikuje visokom gustoćom energije (do 150 Wh/kg), niskim vlastitim pražnjenjem, izbjegavanjem efekta memorije i ne zahtijevanjem održavanja. Mana tehnologije je nizak stupanj maksimalnog iznosa pražnjenja jer se povećanim pražnjenjem ubrzava proces starenja baterije. Nadalje, iduća mana je obavezno korištenje sigurnosnog sustava upravljanja baterijom (eng. *Battery Management System – BMS*) jer u protivnom postoji mogućnost pojave zapaljenja ili eksplozije baterije zbog nepravilnog rada baterije.

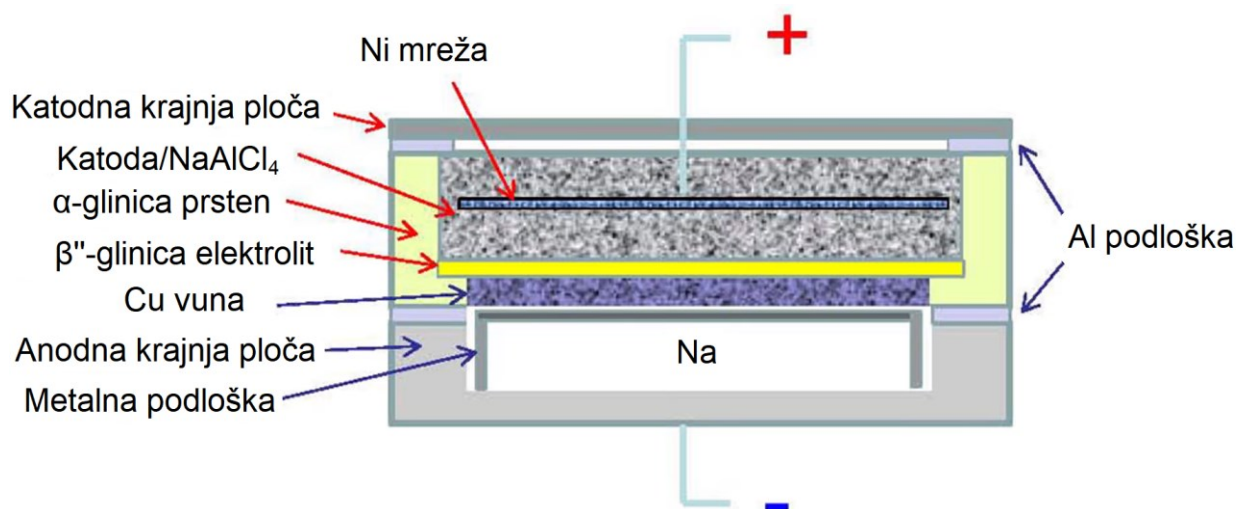
Litij-ion-polimer (Li-Po) tehnologija ili kraće litij-polimer se razlikuje naspram litij-ion tehnologije u korištenju polimernog gela kao elektrolita. Na taj način postiže se veća sigurnost baterije i manja masa. Nedostatak tehnologije je veća cijena naspram litij-ion.

Litij metal polimer tehnologija (LMP) je specifična korištenjem negativne elektrode konstruirane od metal litija. Odlikuje visokom sigurnosti baterije (nizak rizik od eksplozije zbog elektrolita i elektroda u krutom stanju) i nema efekta memorije. Gustoća energije iznosi približno do 110 Wh/kg. Mana je postizanje optimalnog rada tek pri visokim temperaturama (približno 85 °C).

3.2.5. Natrij-nikal-klorid ($Na - NiCl_2$)

Natrij-nikal-klorid baterije (eng. *sodium-nickel-chloride*) su visokotemperaturne baterije čija unutarnja radna temperatura se nalazi u rasponu od 270 do 350 °C da bi se postigao odgovarajući unutarnji otpor te se zbog toga moraju toplinski kontrolirati. (Slika 3.6.).

Prilikom punjenja sol (NaCl) i nikal (Ni) se pretvaraju u nikal-klorid ($NiCl_2$) i rastaljeni natrij (Na). Prilikom pražnjenja, reakcija je obrnuta. Zbog odvojenosti elektroda putem elektrolita od gustog keramičkog materijala, kroz elektrolit mogu prolaziti samo natrijevi ioni, dok elektroni ne mogu (električna izolacija anode i katode tijekom otvorenog vanjskog kruga). Zbog čega je reakcija prisutna samo prilikom pojave struje elektrona u vanjskom zatvorenom krugu iznosom jednake struji natrijevih iona.



Slika 3.6. Presjek natrij-nikal-klorid baterijske ćelije [29]

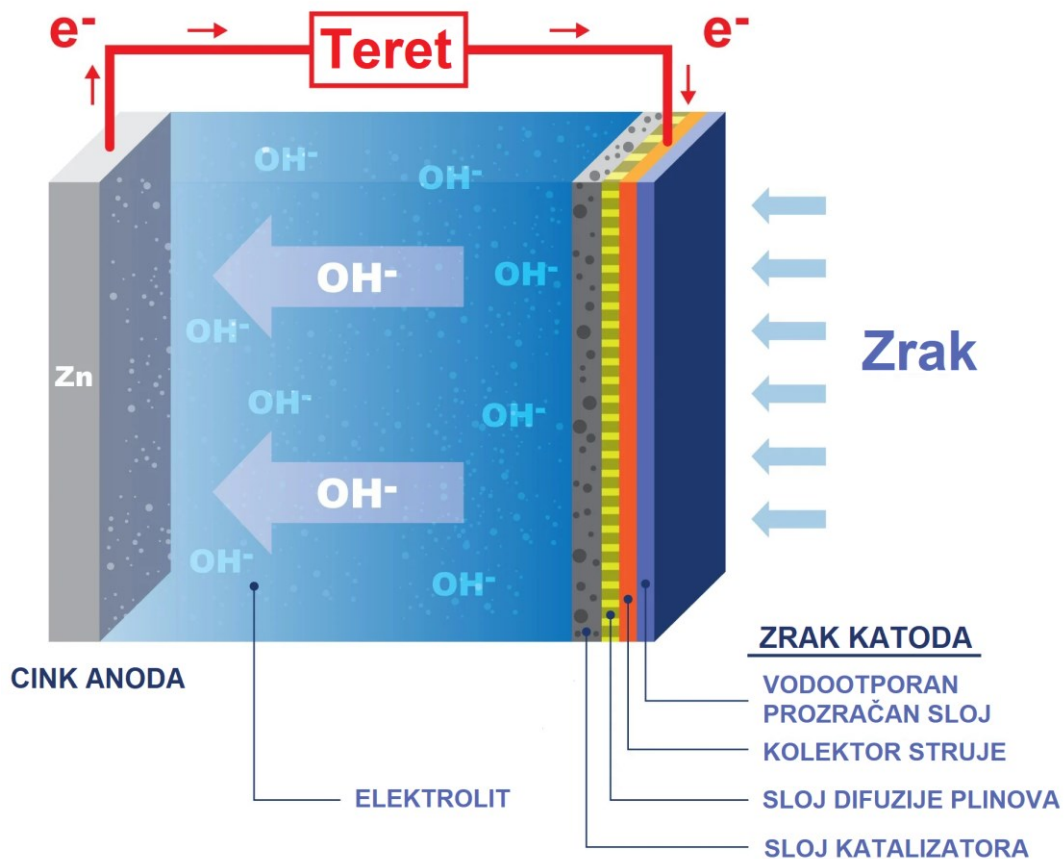
Ćelije se građom sastoje od metalnog kolektora struje, elektrolita, beta aluminijske cijevi, porozne M/MCl_2 katode i anode od tekućeg natrija. Navedeni elementi su hermetički zatvoreni u metalno kućište ćelije. Međusobnim povezivanjem ćelija dobivaju se moduli prosječnog kapaciteta od 20 kWh. Snage natrij-nikal-klorid baterijskih spremnika dosežu do 3 MW [27].

3.2.6. Cink-zrak baterije

Cink-zrak (eng. *zinc-air*) je elektrokemijska tehnologija pohrane energije koja spada pod širu skupinu metal-zrak (eng. *metal-air*) baterija (Slika 3.7.).

Naziv metal-zrak dobiven je zbog korištenja električni pozitivnog metala (cink, magnezij, aluminija, litij) u elektrokemijskoj vezi s kisikom iz zraka te se na taj način generira električni potencijal, to jest električna struja u zatvorenom električnom krugu. Zrak unutar baterije je usmjeren pomoću elektrode načinjene od cinka, te se kisik iz zraka ponaša kao elektroda, koja je elektrolitom odvojena od druge elektrode. Struja se proizvodi oksidacijom cinkove elektrode i otpuštanjem elektrona nakon proizvodnje hidroksilnih iona u tekućem elektrolitu, proizvedenih pomoću katalizatora nakon što se zračna elektroda isprazni. Punjenje baterije stvara obrnutu reakciju te se kisik otpušta u zračnoj elektrodi.

Prednosti su relativno visoka gustoća pohrane energije (do tri puta veća naspram Li-ion baterija) zbog korištenja samo jedne elektrode unutar baterije, nema štetnih ili eksplozivnih nusprodukata, cink-oksidi se može reciklirati u potpunosti i niska cijena korištenih materijala unutar baterije [27].

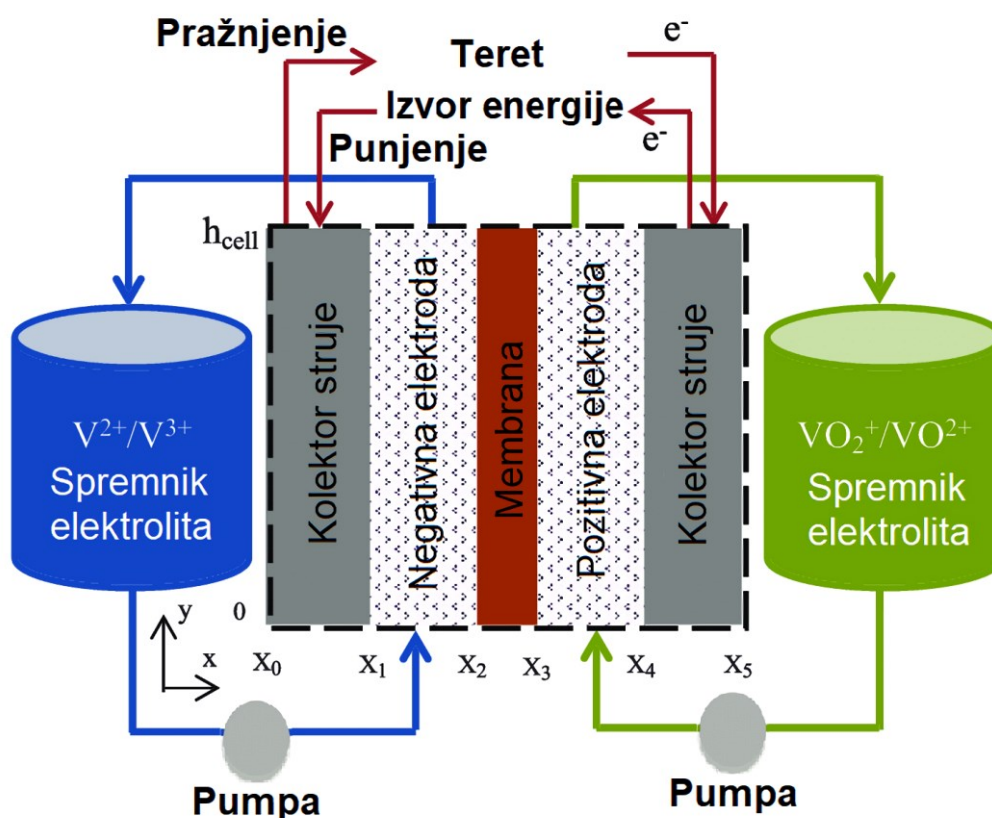


Slika 3.7. Shema cink-zrak baterijske ćelije [30]

Problemi kod ovog tipa baterija je prisutnost ugljičnog dioksida u zraku i njegov utjecaj na elektrolit i katodu, regulacija topline, stvaranje formacija cink dendrita, usporenje ili zaustavljanje reakcije oksidacije, veliki utjecaj stanja okolnog zraka (vlage i nečistoće u zraku) na performanse baterije, skupa proizvodnja elemenata baterije (zračna elektroda) i niska efikasnost sustava pohrane, manja od 50%. Trenutno je navedeni tip tehnologije tek u razvoju. Potencijalni raspon snaga je od 0,01 do 1 MW [27].

3.2.7. Vanadij redoks protočne baterije (VRB)

Vanadij redoks baterije (eng. *Vanadium Redox Batteries - VRB*) spadaju pod kategoriju protočnih baterija (opisanih u poglavlju 2.6.2.). Vanadij redoks baterije (Slika 3.8.) temelje se na redoks reakcijama različitih oblika iona vanadija, odnosno istovremenim zbivanjem reakcije oksidacije i redukcije.



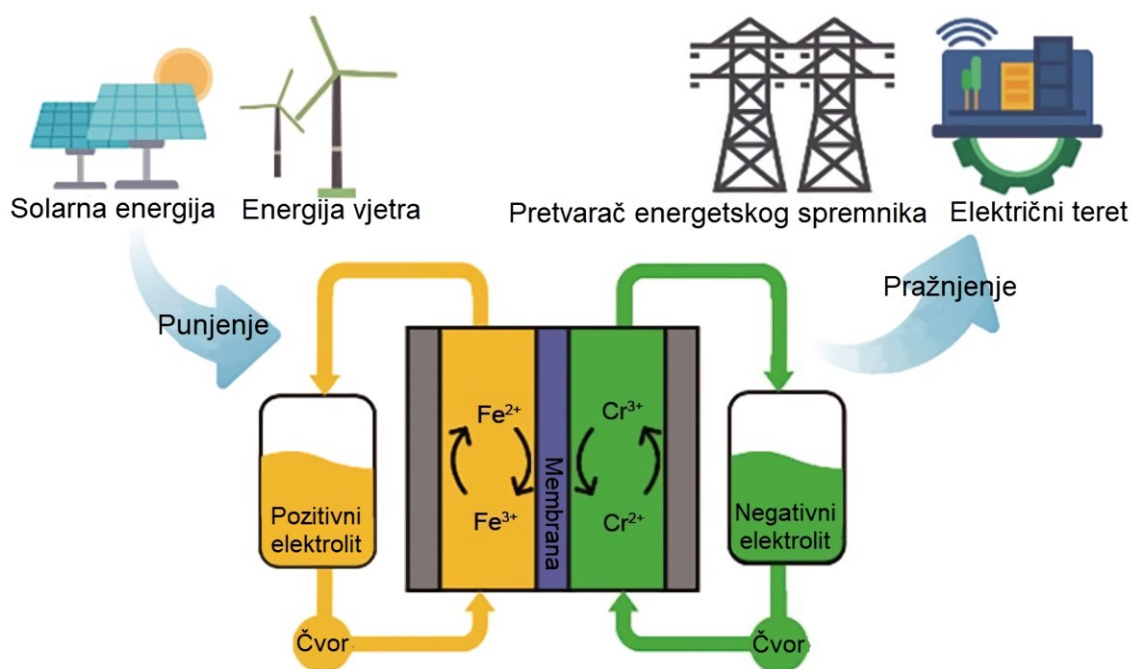
Slika 3.8. Shema vanadij redoks baterijske tehnologije [31]

Tijekom ciklusa punjenja, na pozitivnoj elektrodi, zbog otpuštanja elektrona, V^{4+} , ioni se pretvaraju u V^{5+} ione, dok se na negativnoj elektrodi, zbog prihvata elektrona, V^{3+} ioni pretvaraju u V^{2+} ione te se navedenim reakcijama pohranjuje električna energija u obliku kemijske energije. Prilikom ciklusa pražnjenja, redoslijed reakcija je obrnut te se kemijska energija pretvara u električnu energiju. Tijekom odvijanja reakcija, ioni vanadija nalaze se u kiselj vodenoj otopini (unutar elektrolita). Vanadij redoks baterije sadrže dva elektrolita. Međutim, prednost je da su oba elektrolita identična prilikom ispražnjenog stanja baterije. Pozitivni i negativni elektroliti napravljeni su od vanadija i sumporne kiseline te su pohranjeni u vanjskom spremniku i upumpavani prema potrebi, pomoću vanjskih pumpi, zbog čega navedena vrsta baterija može imati iznimno velik kapacitet pohrane energije. Polu-ćelije su odvojene membranom za izmjenu protona čime se omogućuje zatvaranje strujnog kruga i protok naboja iona. Nazivni naponi ćelija baterija bez opterećenja iznose 1,4 V. Iz tog razloga, ćelije se spajaju serijski u module da bi se dobio veći napon. Prednost ove vrste baterija je iznimno brzi odziv koji iznosi nekoliko milisekundi, ukoliko je reaktant već unutar grupe ćelija, zbog čega su ove baterije optimalan izbor za vrlo brze promjene unutar elektroenergetske mreže. Nadalje, iduća prednost je da baterije nemaju samopražnjenje jer se elektroliti nalaze u zasebnim spremnicima.

Samopražnjenje i parazitski gubici (gubitak energije u obliku topline) su mogući samo ako su elektroliti unutar grupa ćelija, ali iz tog razloga se grupe ćelija postavljaju na višoj razini u odnosu na spremnik pa se elektroliti gravitacijski vraćaju u spremnike tijekom perioda mirovanja. Isto tako, baterija nema problema s ciklusima dubokih pražnjenja te su baterije predviđene za 10.000 ciklusa punjenja i pražnjenja. Trenutna predviđanja životnog ciklusa ove vrste baterija su približno deset godina, ali to nije potvrđeno s obzirom na to da je nova tehnologija pohrane. Nedostatak ovih baterija je veliki volumen spremnika elektrolita ukoliko je baterija velikih kapaciteta (reda veličine MWh). Potencijalni raspon snaga je u rasponu od 0,3 do 3 MW. Trenutne razvojne primjene ovih spremnika energije su u integraciji obnovljivih izvora energije, regulaciji energije krajnjih potrošača i telekomunikacijskim primjenama. Rasponi snaga aktivnih spremnika energije su u rasponu od 50 do 1.000 kW. Dva primjera operativnih sustava su sustavi u SAD-u snage 600 kW i kapaciteta 3.600 kWh te sustavi u Japanu snage 1 MW i kapaciteta 5 MWh [27].

3.2.8. Željezo-krom protočne baterije (Fe-Cr)

Željezo-krom (eng. *iron-chromium*) baterije su podvrsta protočnih baterija. Prednost željezo-krom protočnih baterija (Slika 3.9.) je jednostavnost izrade i principa djelovanja te posljedično niska cijena izrade.

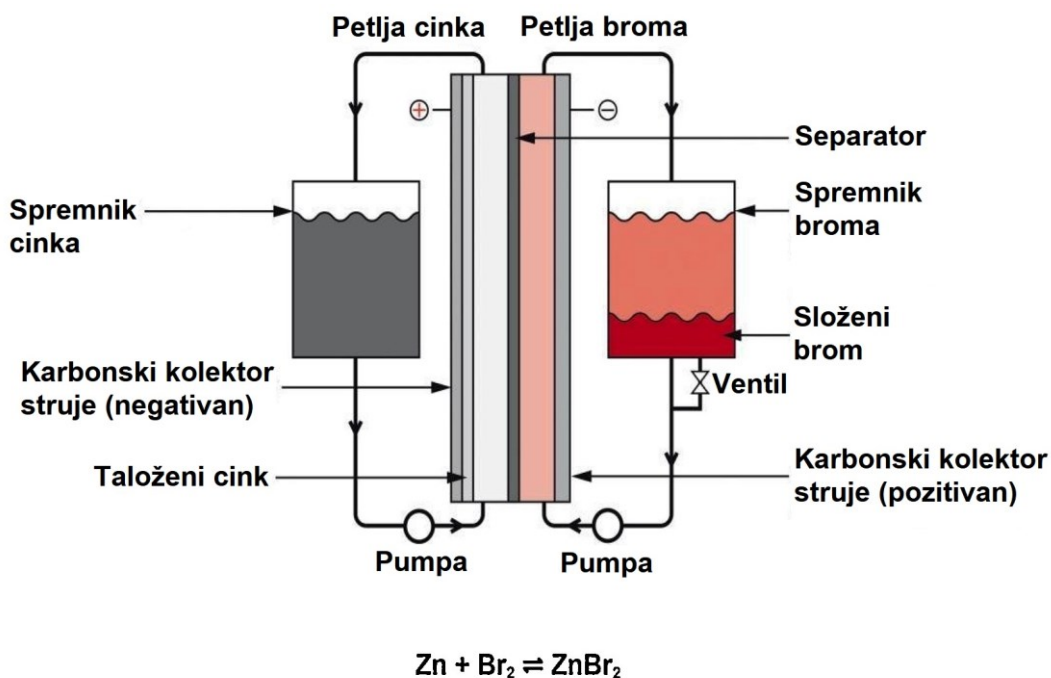


Slika 3.9. Shema željezo-krom baterijske tehnologije [32]

Za rad koriste otopljene (tekuće) reaktante zbog čega se električne pojave događaju samo u određenom, malom dijelu volumena baterije. Sve ćelije su hidraulički balansirane. Zbog otopljenih reaktanata, nema promjene u volumenu ćelija (baterije) prilikom rada (ciklusa punjenja i pražnjenja) što je prednost u odnosu na klasične baterijske spremnike. Željezo-krom protočne baterije su trenutno u fazi razvoja i istraživanja. Očekivana primjena je za regulaciju frekvencije u mreži ili uravnoteženje dnevne potražnje u mreži.

3.2.9. Cink-brom protočne baterije (ZnBr)

Cink-brom (eng. *zinc-bromine*) baterije su podvrsta protočnih baterija čija je glavna karakteristika promjena agregatnog stanja cinka tijekom rada, dok je brom konstantno otopljen u vodenom elektrolitu (Slika 3.10.).



Slika 3.10. Shema cink-brom baterijske tehnologije [33]

Tijekom ciklusa punjenja, cink je u krutom stanju, dok je tijekom ciklusa pražnjenja u tekućem agregatnom stanju. U ciklusu punjenja, elementarni cink se nanosi na negativnu elektrodu a elementarni brom je formiran na pozitivnoj elektrodi. Između elektroda se nalazi mikro-porozni separator koji propušta ione broma i cinka u suprotni tok cinka radi izjednačavanja naboja.

Dvije elektrode (pozitivna i negativna) i dva toka elektrolita (vodene otopine cink i broma, $ZnBr_2$) razdvojeni mikro-poroznim separatorom, čine jednu ćeliju baterije. Dva elektrolita sadrže jednaki broj iona cinka i broma ali različitu koncentraciju elementarnog broma prilikom ciklusa punjenja i pražnjenja što je postignuto spomenutim separatorom. Ćelije se spajaju serijski radi dobivanja većeg iznosa izlaznog napona baterije. Specifičnost ove baterije je korištenje bipolarnih elektroda načinjenih od karbonske plastike (zbog korozivnih svojstava broma) gdje elektroda s jedne strane (prethodne ćelije) ima ulogu anode, a s druge strane (iduće ćelije) ulogu katode. Samopražnjenje spremnika se umanjuje sprječavanjem prodiranja elementarnog broma u negativni elektrolit što se postiže u mikro-poroznoj membrani (separatoru) sa selekcijom iona. Međutim, zbog visoke cijene i male dugotrajnosti najčešće se uzima jeftinija varijanta neselektivne membrane. Odvajanje elementarnog broma s pozitivne elektrode i spremanje u zasebni spremnik postiže se cirkulacijom elektrolita. Dva elektrolita mogu cirkulirati u istom smjeru ili u suprotnim smjerovima (ovisno o dizajnu baterije). Ujedno, cirkulacijom se održava toplinska ravnoteža u bateriji. Nedostatak ove vrste baterije je korozivnost elementarnog broma što utječe na degradaciju elemenata baterije te toksičnost broma. Životni vijek ovisi o broju radnih sati, za razliku od klasičnih baterija koje ovise o broju ciklusa punjenja i pražnjenja [27].

4. PRIMJENA BSE U PRIJENOSNOJ MREŽI

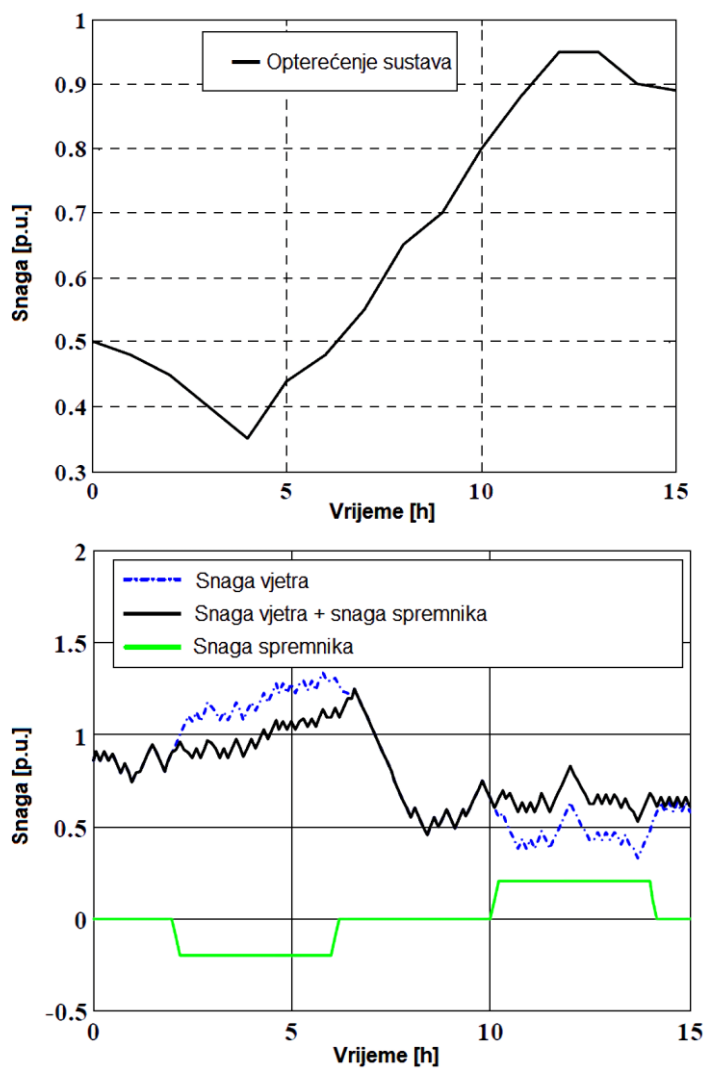
Energetskom tranzicijom prema zelenoj, ekološki prihvatljivoj električnoj energiji, energetski sustav se drastično mijenja. Korištenjem OIE poput vjetroelektrana i solarnih elektrana, proizvodnja električne energije postaje vremenski promjenjiva, nestabilna i ovisna o atmosferskim prilikama. Prolaskom vremena, energetski sustav postaje kompleksniji i sastoji se od mnogobrojnih uzročnika koji mogu narušiti stabilnost i sigurnost sustava kao što su povećani broj korisnika, povećane snage potrošnje, neujednačena potrošnja, povećani broj električnih vozila i povećani broj distribuiranih izvora s nestalnom proizvodnjom. Primjenom baterijskih spremnika energije (BSE) u prijenosnoj mreži i elektroenergetskom sustavu, ostvaruju se brojne prednosti, usluge i mogućnosti navedene u nastavku poglavlja, koje pridonose povećanju fleksibilnosti, pouzdanosti i sigurnosti prijenosne mreže i elektroenergetskog sustava.

4.1. Integracija s OIE i smanjenje emisija stakleničkih plinova

Integracijom obnovljivih izvora energije (OIE) poput solarnih elektrana i vjetroparkova posljedično se postiže smanjenje emisija stakleničkih plinova (ponajviše ugljičnog dioksida - CO_2). Na taj način, proizvodi se ekološki prihvatljiva električna energija i usporava se učinak globalnog zatopljenja. Veliki nedostatak obnovljivih izvora energije je neujednačena i nestalna proizvodnja električne energije, ponajviše zbog ovisnosti takvih izvora o atmosferskim uvjetima. Vjetroelektrane ovise o brzini vjetra koja mora biti unutar određenog raspona za kojeg je vjetroelektrana projektirana, a solarne elektrane ovise o količini sunčevog zračenja. Smanjenjem potrebnih uvjeta, smanjuje se snaga i količina proizvedene električne energije. Nadalje, drugi spomenuti problem je nestalna proizvodnja električne energije. Pod tim se ponajviše smatra potpuni prestanak proizvodnje električne energije. Kod solarnih elektrana to je period tijekom noćnih sati (ili tijekom vrlo oblačnih dana), a kod vjetroelektrana je period tijekom vremenski nepovoljnih prilika (bez prisutnosti vjetra). Promjenjiva i nestalna proizvodnja može predstavljati značajan problem pri vođenju elektroenergetskog sustava i može potencijalno ugroziti stabilnost i sigurnost sustava. Uz to, pogreška između predviđene i proizvedene količine energije predstavlja značajno manju zaradu ukoliko se energija prodaje na burzi (dan-unaprijed tržište).

Implementacijom tehnologija skladištenja energije (spremnika energije) navedeni problemi se mogu eliminirati ili barem umanjiti.

Električna energija proizvedena iz obnovljivih izvora može se pohraniti u baterijskim spremnicima energije (BSE) u periodima punjenja (suncana i/ili vjetrovita razdoblja) te se kasnije može iskoristiti injektiranjem energije u prienosnu mrežu u periodima pražnjenja BSE (tijekom noći i/ili periodima bez vjetra). Na taj način, obnovljivi izvori energije postaju konkurentni konvencionalnim elektranama na fosilna ili nuklearna goriva, po kriteriju konstantne proizvodnje električne energije. Isto tako, ukoliko proizvodnja električne energije varira u snazi, što je tipično za obnovljive izvore energije zbog promjenjivosti pogonskih uvjeta, spremnici energije mogu ujednačiti izlaznu snagu da bi se dobila konstantna izlazna krivulja snage u vremenu (Slika 4.1.). Ujedno prednost je ispunjenje predviđenog plana proizvodnje što je ključna stavka prilikom trgovanja na burzovnom tržištu za dan-unaprijed.



Slika 4.1. Ujednačavanje proizvodnje vjetroelektrane s potrošnjom pomoću spremnika [1]

Nadalje, emisije ugljičnog dioksida (CO_2) rastu s porastom opterećenja (proizvodnje elektrane). Porast je očit tijekom perioda vršnih opterećenja i prijelaznih stanja u mreži. Korištenjem baterijskih spremnika, električna energija se može uzimati iz spremnika tijekom navedenih perioda i tako smanjiti proizvodnju iz elektrana čime se posljedično smanjuje i količina emitiranih stakleničkih plinova. Isto tako, povećanjem efikasnosti prijenosnog sustava, odnosno smanjenjem gubitaka koji se pojavljuju u pogonu, smanjuje se i količina potrebne proizvedene električne energije čime se pak ponovno smanjuju emisije stakleničkih plinova. Uz emisije ugljičnog dioksida (CO_2), elektrane također manjim dijelom emitiraju metan (CH_4) te dušikov oksid (N_2O) i ostale plinove.

Dugoročnom strategijom Europske unije (EU) nastoji se dekarbonizirati energetska sustav unutar EU s ciljem smanjenja neto emisija stakleničkih plinova minimalno 55% (optimalno 80 do 90%) usporedno gledano na razine iz 1990. godine, čime se nastoji spriječiti porast srednje temperature Zemlje iznad 2 °C (optimalno iznad 1,5 °C). Iz tog razloga, spremnici energije predstavljaju potencijalnu primjenu u elektroenergetskom sustavu u cilju ostvarenja navedenih zahtjeva posebice s obzirom na to da energetska sektor (elektrane i toplane) predstavljaju 31% ukupnih emisija stakleničkih plinova. Konačno, krajnji cilj je postizanje neutralnosti neto emisije stakleničkih plinova do 2050. godine a da bi se to ostvarilo, udio obnovljivih izvora u energetskom sektora mora biti u rasponu od 69 do 86% (ovisno o ostalim faktorima). Zbog visoke integracije obnovljivih izvora energije (posebno vjetroelektrana) pretpostavlja se da će unutar osamnaest promatranih zemalja Europske unije ukupno biti potrebno integrirati 432 GW spremnika energije do 2050. godine gdje će većina biti sačinjena u obliku baterijskih spremnika (BSE), reverzibilnih hidroelektrana (PHES) i P2G tehnologije. Međutim, jedan dio spremnika energija pretpostavlja se da će biti ugrađen na razini distribucijske razine i razine krajnjih korisnika (distribuirana raspodjela spremnika manjih kapaciteta) [3].

4.2. Povećanje kvalitete električne energije

Promatrajući pojam kvalitete električne energije s aspekta potrošača tada se kvaliteta električne energije promatra preko karakteristika napona. Karakteristike napona koje se mogu analizirati su naponski propadi i prekidi, naponska kolebanja, harmonici i međuharmonici, prijelazni prenaponi, valovitost, tranzijentni prenaponi, promjene osnovne frekvencije mreže, naponska nesimetrija, prisutnost signalnih napona i prisutnost DC komponente u AC komponenti.

Analiza navedenih karakteristika s ciljem određivanja kvalitete električne energije određena je hrvatskom normom za kvalitetu napona na mjestu predaje potrošača u normalnim pogonskim uvjetima u niskonaponskim i sredjenaponskim mrežama (HRN EN 50160). Navedenom normom propisana su maksimalna odstupanja svih karakteristika napona za zadovoljavanje određene kvalitete električne energije (napona). Odstupanjem bilo koje od navedenih karakteristika dovodi do mogućnosti ugrožavanja pogonske sigurnosti, smanjenja životnog vijeka ili čak oštećenja mreže i trošila spojenih na istu mrežu.

Na kvalitetu napona (električne energije) u mreži u najvećoj mjeri utječu aktivni elementi (generatori vjetroelektrana i elektronički pretvarači u solarnim elektranama) koji se nalaze u mreži i trošila koja su priključena na mrežu (indirektno povezani preko distribucijske mreže).

S druge strane, promatrajući kvalitetu električne energije, mogu se primijeniti prije navedeni kriteriji ali se mogu primijeniti i kriteriji kvalitete opskrbe električne energije. Prema Pravilniku o uvjetima kvalitete opskrbe električnom energijom donesenog od Hrvatske energetske regulatorne agencije (HERA) na temelju članka 60. stavka 5. Zakona o tržištu električne energije (NN 111/2021) određeni su pokazatelji kvalitete opskrbe električnom energijom.

Opći pokazatelji pouzdanosti napajanja u prijenosnoj mreži su *ENS* i *AIT*. *ENS* predstavlja neisporučenu električnu energiju (eng. *Energy Not Supplied*), to jest procijenjeni iznos električne u MWh energije koji bi se isporučio u normalnom pogonu (bez dugotrajnog prekida napajanja) i određuje se prema izrazu (4.1) [34]:

$$ENS = \frac{1}{60} \sum_{i=1}^K P_i \cdot T_i \quad (4.1)$$

gdje je:

K ukupan broj dugotrajnih prekida napajanja,

P_i procijenjena snaga pri kojoj je došlo do dugotrajnog prekida napajanja na jedinici mreže [MW],

T_i trajanje i -tog dugotrajnog prekida napajanja [min].

AIT predstavlja prosječno trajanje dugotrajnih prekida napajanja (eng. *Average Interruption Time*) u minutama te je to opći pokazatelj trajanja dugotrajnih prekida napajanja u prijenosnoj mreži i određuje se prema izrazu (4.2) [34]:

$$AIT = \frac{ENS}{\left(\frac{Wg}{Tg}\right)} \cdot 60 \quad (4.2)$$

gdje je:

ENS neisporučena električna energija [MWh],

W_g konzum na prijenosu [MWh],

T_g ukupan broj sati u kalendarskoj godini [h].

Opći standard pouzdanosti napajanja u prijenosnoj mreži određuje iznos ENS-a od 700 MWh, dok AIT iznosi 17 min [34].

Integracijom baterijskih spremnika energije u prijenosnu mrežu potencijalno se može povećati kvaliteta (opskrbe) električne energije (eng. *power quality support*). S obzirom na to da svi baterijski spremnici moraju sadržavati dvosmjerne elektroničke pretvarače (usmjerivače, u funkciji izmjenjivača i ispravljачa), pomoću njih je moguće filtrirati smetnje koje utječu na valni oblik, poput filtriranja viših harmonika. Potencijalna primjena je integracija energetske spremnika s FACTS (eng. *Flexible Alternating Current Transmission System*) uređajima u cilju smanjenja harmonijskih signala. Isplativost ugradnje baterijskih spremnika u prijenosnu mrežu radi povećanja kvalitete električne energije iskorištava u glavnoj mjeri operator prijenosnog sustava jer pružanjem kvalitetne električne energije izbjegava plaćanje financijskih kompenzacija (novčanih naknada) ukoliko nije postignuta zajamčena kvaliteta opskrbe. Međutim, s obzirom da je upitan odnos iznosa ukupnih novčanih naknada i ukupne investicije ugradnje baterijskog spremnika isključivo u svrhu filtracije električne energije, upitna je i sama isplativost takvog pothvata.

4.3. Odgoda nadogradnje prijenosne mreže

Nadogradnja prijenosne mreže kojom se osigurava funkcionalnost, stabilnost i sigurnost pogona često predstavlja značajnu investiciju za operatora prijenosnog sustava. Nadogradnja se najčešće ostvaruje izgradnjom nove energetske infrastrukture (transformatorske ili rasklopne stanice, trase dalekovoda), novih energetske elemenata (transformatora, kabela, zaštitnih uređaja) i mjernih i/ili komunikacijskih sustava. Najčešći oblik nadogradnje prijenosne mreže je izgradnja novih trasa dalekovoda ili nadogradnja postojećih u cilju povećanja prijenosne moći, sprječavanja zagušenja, ostvarenja N-1 kriterija ili zbog općenitog povećanja sigurnosti i pouzdanosti prijenosa električne mreže.

Implementacijom baterijskih spremnika energije može se odgoditi nadogradnja postojeće mreže (eng. *deferral of investment*).

Primjer odgode je pojava zagušenja (preopterećenja vodova) u prijenosnoj mreži koja bi se klasičnim pristupom riješila dodavanjem dodatnih linija voda ili izgradnjom nove trase dalekovoda. Međutim, izgradnjom dodatnih prijenosnih vodova u područjima rijetkih visokih opterećenja javljaju se dodatni gubici s obzirom na to da podopterećeni vodovi induciraju reaktivnu snagu u mrežu čime se povećava iznos napona u mreži. Umjesto toga, optimalno rješenje je instalacija baterijskog spremnika energije na mjestu potrošnje tako da se smanji opterećenje vodova tijekom perioda visoke potrošnje. Prednost ugradnje baterijskog spremnika energije naspram izgradnje nove trase dalekovoda ili ugradnje voda je postizanje fleksibilnosti. U slučaju da u budućnosti prestane potreba za dodatnim kapacitetima energije, baterijski spremnik se može premjestiti na drugu lokaciju gdje se pojavljuju veća opterećenja. Isto tako, baterijski spremnik može imati višestruke uloge. Uz primjenu smanjenja opterećenja vodova također može služiti i kao pružatelj pomoćnih usluga koje su navedene u nastavku, može povećati kvalitetu električne energije, osigurati N-1 kriterij sigurnosti i olakšati implementaciju OIE. Osim toga, ugradnja baterijskog spremnika može se izvesti u kraćem vremenskom razdoblju naspram izgradnje dalekovoda čije vrijeme integracije može doseći i preko 10 godina ukoliko se radi o većem projektu. Također prilikom projektiranja nove trase dalekovoda postoji mogućnost pojave zapreka zbog neprohodnosti terena ili negativnog učinka na okoliš, floru ili faunu zbog čega bi projektiranje bilo spriječeno. Ugradnja baterijskih spremnika zbog svoje male veličine naspram dalekovoda nema takvih nedostataka. Treba napomenuti da je broj interkonekcija u mreži i vrijednost (ugradnje) spremnika energije obrnuto proporcionalna. Odnosno, što je veći broj interkonekcija u mreži (bolja povezanost mreže) to je manja vrijednost, odnosno isplativost ugradnje spremnika energije i obratno.

4.4. Osiguranje N-1 kriterija sigurnosti

N-1 kriterij sigurnosti je osnovni kriterij korišten pri pogonu i planiranju (razvoju) elektroenergetskog sustava (prijenosne mreže), koji je sukladan s hrvatskim i europskim tehničkim regulativama. N-1 kriterij sigurnosti definira da je elektroenergetski sustav siguran ukoliko ispad (neraspoloživost) bilo koje proizvodne jedinice ili elementa (transformatora, voda) ne narušava granične vrijednosti pogonskih veličina u mreži (frekvencije, napona, strujne (termičke) operativnosti elemenata). Uvažavanjem i analizom N-1 kriterija (eng. *contingency analysis*) ostvaruje se pouzdanost, stabilnost i sigurnost elektroenergetske mreže i opskrbe električnom energijom.

Odstupanje od navedenog kriterija moguće je samo tijekom radova na održavanju ili prepravki prijenosne mreže. U slučaju ne ispunjenja N-1 kriterija tijekom pogona, operater prijenosnog sustava mora korektivno djelovati i vratiti sustav u normalno pogonsko stanje.

Ugradnjom baterijskih spremnika energije u prijenosnu mrežu može se postići osiguranje N-1 kriterija sigurnosti tijekom šireg spektra pogonskih uvjeta. Primjer potencijalne primjene je tijekom pojave zagušenja u prijenosnoj mreži, odnosno pojava stanja u kojemu prijenosni sustav ne može zadovoljiti osnovne kriterije sigurnosti i opskrbe. Može se pojaviti kao zagušenje prekograničnih vodova ili zagušenje prijenosnog sustava unutar njegovih granica. Zagušenje prijenosne mreže javlja se prilikom pojave tokova snaga koji stvaraju preopterećenje elemenata (primjerice vodova i transformatora) te tako izravno ugrožava N-1 kriterij sigurnosti. Razlog tome je mogući ispad preopterećenog elementa kao mjera zaštite elementa, pogona ili ljudi. Na pojavu zagušenja posebno utječe povećana integracija obnovljivih izvora energije, posebno u područjima niže potrošnje i visoke proizvodnje iz OIE što pak utječe na visoke iznose tokova snaga u prijenosnoj mreži. Rješenje navedenog problema je ugradnja baterijskih spremnika na lokacije češćih pojava opterećenja elemenata (zagušenja). Injektiranjem električne energije iz spremnika u mrežu tijekom perioda povećanih opterećenja (tokova snaga), smanjuje se opterećenje elemenata mreže te se sprječava pojava zagušenja ili ispad određenog elementa, i u konačnici postiže se zadovoljavanje N-1 kriterija tijekom prijelaznog ili poremećenog pogonskog stanja. Tijekom perioda niskih opterećenja baterijski spremnik je u ciklusu punjenja, služi za ostale svrhe ili je u stanju pripravnosti.

Trenutno, zbog visokih investicijskih troškova ugradnje spremnika energije, implementacija spremnika energije u svrhu osiguranja N-1 kriterija sigurnosti može se ekonomski opravdati samo ukoliko se spremnik istovremeno koristi za pružanje dodatnih pomoćnih usluga u regulaciji sustava ili ukoliko je to jedino tehničko rješenje. Potencijalne isplativije mogućnosti ukoliko su izvedive su izgradnja novih prijenosnih vodova, povećanje prijenosne moći trenutnih vodova ugradnjom učinkovitih visoko temperaturnih vodiča, uporabom metode razdvajanja sabirnica ili pak ugradnjom autotransformatora s (uzdužnom, poprečnom ili kosom) regulacijom za usmjeravanje toka snage. Optimalno rješenje je kombinacija više opcija, primjerice ugradnja spremnika energije i uporaba metode razdvajanja sabirnica.

4.5. Minimizacija troškova rada sustava

Jedan od kriterija troškova rada sustava je učinkovitost (efikasnost) sustava. Učinkovitost sustava može se promatrati kao omjer dobivene (izlazne) i uložene (ulazne) energije. Povećanjem učinkovitosti sustava obrnuto proporcionalno se smanjuju troškovi rada sustava. Učinkovitost sustava povećava se smanjenjem pogonskih gubitaka. Značajni gubici koji se stvaraju prilikom pogonskih uvjeta u prijenosnoj mreži su Jouleovi gubici. Jouleovi gubici nastaju u svim elementima prijenosne mreže kroz koje protječe električna struja. Zbog postojanja električnog otpora u vodovima (vodičima) i ostalim elementima prijenosne mreže, prolaskom struje nastaju djelatni gubici prijenosa, odnosno toplinski (Jouleovi) gubici u obliku topline. Iznos Jouleove topline jednak je umnošku električnog otpora, kvadrata jakosti struje i proteklog vremena, prema izrazu (4.3) [35]:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (4.3)$$

gdje je:

Q Jouleova toplina,

I jakost struje,

R otpor voda,

t vrijeme.

Ugradnjom baterijskih spremnika u prijenosnu mrežu mogu se ograničiti vrijednosti struje kroz vodove prijenosne mreže i tako smanjiti toplinske gubitke te posljedično povećati učinkovitost sustava. Baterijski spremnici će ograničiti vrijednost struje u vodovima tako da će pružati električnu energiju u mrežu (ciklus pražnjenja) tijekom perioda visokih opterećenja (eng. *peak shaving*). Tijekom perioda niskih opterećenja baterijski spremnik će se puniti (ciklus punjenja), služiti u druge svrhe ili će se nalaziti u stanju mirovanja (pripravnosti).

Međutim, zbog trenutne ograničene razvijenosti tehnologija pohrane (baterija) i elektroničkih pretvarača, ušteda gubitaka u mreži kompenzira tek maksimalno 50% unutarnjih gubitaka sustava pohrane što znači da je trenutačna isplativost ugradnje baterijskih sustava iz ovog aspekta neisplativa [1].

Nadalje, potencijalna prednost spremnika energije je u kombinaciji s konvencionalnim elektranama.

S obzirom na to da proizvodnja električne energije elektrane ovisi o potrošnji (opterećenju) u mreži, vrijeme proizvodnje nije proizvoljno kao i troškovi proizvodnje (operativni troškovi).

Integracijom spremnika energije u postrojenje elektrane, vrijeme proizvodnje se može optimizirati tako da se smanje troškovi pogona (proizvodnje). Tijekom perioda nižih troškova povećava se proizvodnja energije i višak energije se pohranjuje u spremnik. S druge strane, tijekom perioda viših troškova proizvodnje, razina proizvodnje se smanjuje i energija se uzima iz spremnika i šalje u mrežu. Bitno je napomenuti da spremnik energije mora biti pravilno dimenzioniran prema kriteriju snage i kapaciteta pohrane energije da bi se iskoristio potpuni potencijal spremnika. Na taj način optimizira se proizvodnja s ekonomskog aspekta troškova rada sustava.

Osvrtanjem na poglavlje 4.1. može se uvidjeti porast emisija ugljičnog dioksida tijekom perioda visokih opterećenja. Direktivom 2003/87/EZ, uspostavljen je međunarodni sustav trgovanja emisijskim jedinicama stakleničkih plinova (eng. *EU Emissions Trading System – EU ETS*). Navedenim sustavom dodjeljuju se dozvole za količine emitiranih stakleničkih plinova postrojenja koje određuju maksimalnu količinu ispuštenih stakleničkih plinova u ovisnosti o količini kupljenih emisijskih jedinica. Prekoračenjem količine emitiranih emisija, operatori proizvodnih postrojenja dužni su platiti novčanu naknadu ovisno o prekoračenoj količini. Integracijom baterijskih spremnika i posljedičnim smanjenjem emisija ugljičnog dioksida, izbjegava se ili smanjuje količina prekoračenih emisija čime se smanjuju troškovi proizvodnje električne energije. Isto tako, smanjenjem proizvodnje tijekom perioda vršnog opterećenja, smanjuje se stres (dinamička opterećenja) na radne komponente čime se produžuje njihov životni vijek te se tako smanjuju troškovi održavanja. Smanjenjem troškova emisija i održavanja, smanjuje se specifična granična cijena proizvodnje električne energije (eng. *Levelized Cost of Electricity - LCOE*), to jest troškovi rada sustava.

Nadalje, minimizacija troškova rada sustava može se promatrati unutar vertikalno-integriranog poduzeća gdje je cilj minimizacija ukupnih operativnih troškova sustava (postizanje maksimalne socijalne dobrobiti) i unutar dereguliranog tržišta gdje je cilj postizanje maksimalnog profita [36].

Minimizacija ukupnih operativnih troškova sustava unutar vertikalno-integriranog poduzeća ostvaruje se minimizacijom ukupnih troškova proizvodnje preko izraza (4.4) i (4.5) [36]:

$$\text{Minimiziraj } \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I C_i(t) \quad (4.4)$$

Pri čemu je C_i funkcija cilja definirana kao suma fiksnog troška, varijabilnih troškova i troškova proizvodnje svih generatora, prema izrazu (4.5) [36]:

$$C_i(t) = f_i \cdot x_i(t) + \sum_{c=1}^C o_{i,c} \cdot g_{i,c}(t) + start_i \cdot y_i(t) \quad \forall c \in C, i \in I, t \in T \quad (4.5)$$

gdje je:

- t vrijeme,
- T vremenska razdoblja, indeksirano s t,
- i i-ti broj generatora,
- I broj jedinica toplinskih generatora, indeksirano s i,
- c c-ti segment krivulje,
- C segmenti krivulja troškova generatora, indeksirano s c,
- f_i fiksni trošak proizvodnje generatora i (€),
- $x_i(t)$ iznosi 1 ako generator i proizvodi u trenutku t, 0 inače,
- $o_{i,c}$ nagib segmenta c krivulje troškova generatora i (€/MW),
- $g_{i,c}(t)$ proizvodnja generatora i po bloku c (MW) u otpremnom satu t,
- $start_i$ trošak pokretanja generatora i u trenutku t (€),
- $y_i(t)$ iznosi 1 ako se generator i pokrene u trenutku t, 0 inače.

S druge strane postizanje maksimalnog profita unutar dereguliranog tržišta je prema funkciji cilja ovisnoj o dualnoj varijabli $\alpha_n(t)$. Navedena varijabla predstavlja lokacijske tržišne cijene u čvorovima u kojima se nalaze spremnici energije (ESS), u različitim satima. Maksimalna dobit ostvaruje se prodajom električne energije pri što višoj cijeni i kupnjom električne energije po što manjoj cijeni. Ciljna funkcija određena je izrazom (4.6) [36]:

$$\text{Maksimiziraj } \sum_{t=1}^T \sum_{b=1}^B \alpha_n(t) \cdot (p_b^{dis}(t) - p_b^{ch}(t)) \quad (4.6)$$

gdje je:

- b b-ta jedinica,
- B jedinice energetskeg sustava, indeksirano s b,
- $\alpha_n(t)$ kut napona na sabirnici n (rad) u otpremnom satu t,
- $p_b^{dis}(t)$ snaga pražnjenja prodana od strane ESS b (MW) u otpremnom satu t,
- $p_b^{ch}(t)$ snaga punjenja kupljena od strane ESS b (MW) u otpremnom satu t.

Prema rezultatima simulacije iz literature [36], pokazano je da se postižu pozitivni učinci ugradnje spremnika energije u oba slučaja, odnosno unutar vertikalno-integriranog poduzeća i unutar dereguliranog tržišta. Učinci spremnika energije su veći s povećanjem udjela obnovljivih izvora energije unutar elektroenergetske mreže. Međutim, zbog visokih investicijskih troškova i niskog povećanja profita ne opravdava se isplativost ugradnje spremnika energije [36].

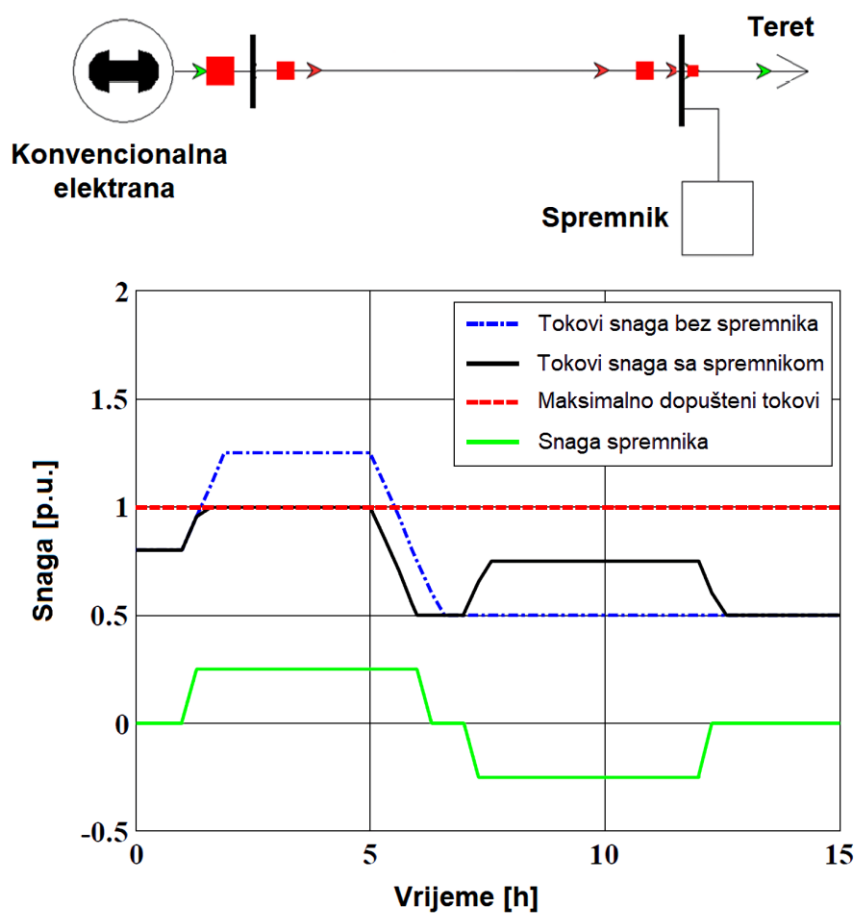
4.6. Primjena BSE kao pružatelja pomoćnih usluga OPS-u

Baterijski spremnici energije (BSE) potencijalno imaju veliki raspon primjena u elektroenergetskom sustavu, posebice prijenosnoj mreži. Zbog svoje prilagodljivosti, BSE mogu pružati veliki broj pomoćnih usluga operatoru prijenosnog sustava (OPS-u). Pomoćne usluge predstavljaju pojedinačne dobavljive usluge koje operator prijenosnog sustava dobavlja od pojedinačnih korisnika mreže s ciljem ostvarenja usluga elektroenergetskog sustava. Korisnici mreže pružaju usluge prema posebnim ugovorima ugovorenim s operatorom prijenosnog sustava. Pomoćne usluge prikazane u nastavku su uravnotežene elektroenergetskog sustava, upravljanje zagušenjima u mreži, frekvencijska stabilnost i regulacijska rezerva, naponska stabilnost, crni start i minimizacija troškova rada sustava. Za navedene pomoćne usluge, nužna je integracija spremnika energije sa sustavom automatske regulacije proizvodnje (eng. *Automatic Generation Control - AGC*) radi postizanja brzog, automatiziranog odziva spremnika prilikom promjena u mreži.

4.6.1. Upravljanje zagušenjima u mreži

Zagušenje unutar mreže nastaje ukoliko su jedan ili više elemenata (primjerice nadzemni vodovi, kablovi ili transformatori) na granici opterećenja (preopterećenje). Preopterećenje nadzemnih vodova ili kabela nastaje povišenjem iznosa struje iznad iznosa najveće dopuštene razine struje u vodiču čime je vod ili kabel maksimalno toplinski opterećen. U tom slučaju postoji mogućnost trajnog oštećenja vodiča i/ili izolacije ili pak pojave prevelikog provjesa (smanjenja minimalne visine voda) zbog prisutnosti povišene temperature uzrokovane Jouleovim gubicima. Radi sprječavanja oštećenja voda, u većini slučajeva aktivira se relejna zaštita (najčešće nadstrujna) čime se dionica izdvaja iz pogona, a tok snage se prebacuje na preostale dionice čime je moguća pojava domino efekta i postepeni ispad ostalih dionica (raspad sustava).

Baterijski spremnici energije mogu se implementirati u sustav radi izbjegavanja zagušenja u mreži. Mjesto instalacije BSE može se odabrati prema mjestu povećane potrošnje (opterećenja). Ukoliko se spremnik energije instalira na mjestu opterećenja (ili u blizini) tada se mjesto potrošnje napaja preko kratke dionice dalekovoda čime se izbjegava slanje energije na veće udaljenosti putem dalekovoda. Posljedično se izbjegava i pojava zagušenja u mreži jer je prijenosna mreža manje opterećena. Zbog ograničenog kapaciteta spremnika energije, injektiranje snage iz spremnika u mrežu je vremenski ograničeno (Slika 4.2.).

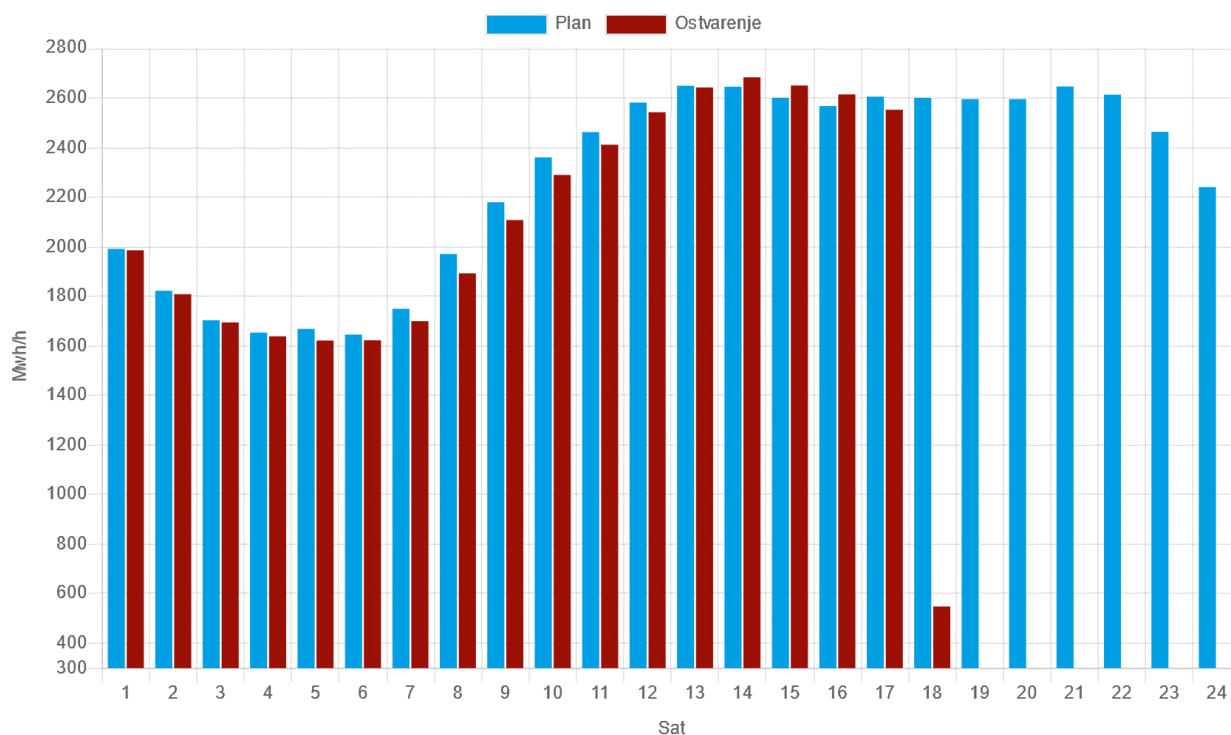


Slika 4.2. Upravljanje zagušenjima u mreži injektiranjem snage iz spremnika [1]

Iz tog razloga, snaga bi se injektirala praktički samo tijekom perioda zagušenja u mreži. U ostalim periodima, spremnici energije bi se punili, koristili u preostale svrhe ili bi ostali u pripravnom stanju. Prednost ugradnje spremnika na mjestu opterećenja je smanjenje Jouleovih gubitaka u mreži zbog kraćih relacija i manjih struja. Isto tako, dodatna prednost je odgađanje dodatnih ulaganja u prijenosnu mrežu. Točnije, odlaže se izgradnja novih linija (dionica) dalekovoda koje bi inače bilo potrebno izgraditi u cilju osiguranja sigurnosti i stabilnosti sustava.

4.6.2. Uravnoteženje elektroenergetskog sustava

Uravnoteženje elektroenergetskog sustava podrazumijeva održavanje jednakosti proizvodnje i potrošnje električne energije unutar sustava. Uravnoteženje sustava izvršava operator prijenosnog sustava te na taj način održava konstantnu frekvenciju i osigurava pogonsku sigurnost. Odnosno, ukoliko u sustavu postoji manjak ili višak električne energije, tada operator prijenosnog sustava (u slučaju Hrvatske HOPS) iskorištava energiju uravnoteženja kojom uravnotežuje sustav. S ciljem suzbijanja neuravnoteženja u sustavu, konstantno se predviđa krivulja opterećenja (potražnje električne energije) te da bi se proizvodnja mogla izjednačiti s potrošnjom. Dnevni dijagram opterećenja (Slika 4.3.) prikazuje potrošnju električne energije u satu (MWh/h) tijekom perioda od jednog dana (24 h). Najveće poteškoće u predviđanju predstavlja varijabilni dio opterećenja, koji može biti primjerice dnevni ili sezonski. Za dnevni su karakteristična vršna opterećenja u jutarnjim ili večernjim periodima, dok kod sezonskog je karakteristična povećana potrošnja u ljetnim mjesecima (zbog turističkog karaktera Hrvatske) i zimskim mjesecima (zbog povećane potrošnje povezane sa sustavima grijanja). Drugu poteškoću kod uravnoteženja sustava mogu predstavljati obnovljivi izvori energije koji mogu varirati u proizvedenoj snazi ovisno o vanjskim, atmosferskim uvjetima.



Slika 4.3. Dnevni dijagram opterećenja, HOPS [37]

Nadalje, u svrhu uravnoteženja sustava mogu se primijeniti baterijski spremnici energije. Baterijski spremnici energije konkretno se mogu iskoristiti u dva najčešća scenarija. U prvom scenariju u elektroenergetskom sustavu (prijenosnoj mreži) postoji višak električne energije. Višak energije mora se izdvojiti iz sustava da bi se osigurala pogonska sigurnost. Višak energije može se iskoristiti za punjenje (baterijskih) spremnika energije te se tako postižu dvije pogodnosti, skladištenje energije za buduću uporabu i izdvajanje viška energije iz elektroenergetskog sustava. U drugom scenariju postoji manjak energije u sustavu. Da bi se nadomjestio manjak (zadovoljila potražnja) može se iskoristiti energija pohranjena u spremnicima energije te na taj način uravnotežiti sustav. Korištenjem spremnika energije također se izbjegava i kupnja električne energije od susjednih država čime se smanjuju troškovi i oslobađaju kapaciteti vodova sa susjednim državama. Ukoliko se radi o privatnim spremnicima energije, vlasnici spremnika (koji su ujedno sudionici na tržištu električne energije) mogu ih iskoristiti za vremensko izdvajanje. Odnosno, kupnju električne energije pri nižoj cijeni i kasnije prodaju električnu energiju pri višoj cijeni, čime se povećava njihov profit i smanjuje vrijeme povrata investicije.

4.6.3. Frekvencijska stabilnost i regulacijska rezerva

Frekvencijska stabilnost odnosi se na konstantno održavanje vrijednosti frekvencije unutar određenog raspona. U Hrvatskoj nazivna frekvencija iznosi 50 Hz. Prema Mrežnim pravilima prijenosnog sustava, donesenim od strane Hrvatskog operatora prijenosnog sustava (HOPS) uz prethodnu suglasnost Hrvatske energetske regulatorne agencije (HERA) i prema Uredbi komisije EU 2017/1485 od 2. kolovoza 2017. o uspostavljanju smjernica za pogon elektroenergetskog sustava, određena su osnovna pravila o vrijednosti frekvencije u prijenosnom sustavu.

Prema članku 53. Mrežnih pravila prijenosnog sustava slijedi [38]:

- Nazivna vrijednost frekvencije iznosi 50,00 Hz unutar hrvatskog elektroenergetskog sustava.
- Maksimalno odstupanje frekvencije ne smije izaći izvan opsega od ± 200 mHz od zadane vrijednosti, u interkonekcijskom radu, u privremenom stacionarnom stanju.
- Davanjem naloga operatora prijenosnog sustava ili operatora koordinacijskog centra tijekom razdoblja korekcije sinkronog vremena, frekvencija se podešava na zadanih 49,99 Hz ili 50,01 Hz.
- Frekvencija apsolutno nikada ne smije odstupati izvan opsega od ± 800 mHz od nazivne vrijednosti.

- Podfrekvencijsko rasterećenje aktivira se ukoliko je iznos frekvencije niži od 49,20 Hz i postiže se isključenjem reverzibilnih elektrana koje evakuiraju energiju iz mreže. U slučaju da je frekvencija iznosom niža od 49,00 Hz, isključuju se krajnji kupci u skladu s tablicom iz članka 46. Mrežnih pravila prijenosnog sustava.
- Djelovanjem primarne regulacije korigiraju se odstupanja iznosa frekvencije izvan opsega od ± 20 mHz od zadane vrijednosti.
- Prilikom pogona u interkonekciji, operator prijenosnog sustava mora uvažavati zahtjeve ENTSO-E-a u odnosu na održavanje frekvencije. Prilikom poremećaja, operatoru prijenosnog sustava dobrovoljno pomažu ostala regulacijska područja interkonekcije koristeći vlastite kapacitete primarne regulacije, s ciljem održavanja frekvencije.

Odstupanje od nazivne frekvencije nastaje prilikom odstupanja proizvodnje od potrošnje električne energije. Ukoliko je snaga proizvodnje električne energije veća od snage potrošnje električne energije tada frekvencija raste i obratno. Povezanost frekvencije i snage proizvodnje je u brzini rotacije sinkronih strojeva (generatora). Smanjenjem opterećenja raste brzina generatora te posljedično raste i frekvencija generiranog napona. Za regulaciju frekvencije mogu se koristiti baterijski spremnici energije. Ukoliko je proizvodnja električne energije manja od potrošnje (povećana inercija), smanjuje se frekvencija. U tom slučaju, energiju za podmirenje potrošnje se može uzimati iz spremnika energije te tako podmiriti svu potrošnju i održati konstantnu vrijednost frekvencije. Isto tako, ukoliko je trenutačna potrošnja manja od proizvodnje, višak proizvedene električne energije se može pohraniti u spremnicima energije, čime je osigurana stabilnost sustava i frekvencije.

Regulacijska rezerva sastoji se od primarne, sekundarne i tercijarne regulacijske rezerve (regulacije proizvodnih jedinica). Primarna regulacijska rezerva koristi se prvenstveno za regulaciju frekvencije te se aktivira unutar nekoliko sekundi i obuhvaća automatsko djelovanje turbinskih regulatora brzine vrtnje, to jest regulatora frekvencije čime ostvaruje promjenu snage proizvodnje proizvodne jedinice. Primarna regulacija pokreće se pri odstupanju frekvencije od zadane ili nazivne vrijednosti. Prema Mrežnim pravilima prijenosnog sustava, sve veće proizvodne jedinice moraju biti osposobljene za izvršavanje primarne regulacije frekvencije. Nadalje, sekundarna regulacija zamjenjuje primarnu, to jest preuzima djelovanje da bi se oslobodila primarna regulacija za buduću uporabu. Aktivira se u periodu od nekoliko minuta (maksimalno 15 minuta) s ciljem održavanja frekvencije i razine planirane snage razmjene. Isto tako, služi za održavanje frekvencije izoliranog pogona regulacijskog područja i/ili dijela elektroenergetskog sustava.

Kod sekundarne regulacije, regulatorom regulacijskog područja djeluje se automatski na sustav regulacije brzine vrtnje proizvodnih jedinica i grupne regulatore djelatne snage proizvodnog postrojenja. Konačno, tercijarna regulacija zamjenjuje sekundarnu s ciljem oslobodjenja sekundarne regulacije te se aktivira u periodu od nekoliko minuta (brza) ili unutar jednog sata (spora) od zaprimanja zahtjeva. Tercijarna regulacija je regulacija djelatne snage koju ručno ili automatski aktivira operator prijenosnog sustava za planirani rad proizvodnih jedinica u tercijarnoj regulaciji. Tercijarna regulacija koristi se za postizanje sigurnosti sustava i uravnoteženje sustava.

Baterijski spremnici energije mogu se koristiti kao sekundarna i tercijarna regulacijska rezerva te potencijalno za primarnu rezervu. Sekundarnom regulacijom automatski mogu se popraviti odstupanja od zadanih ili nazivnih vrijednosti u graničnim područjima sa susjednim elektroenergetskim sustavima. Tercijarnu regulaciju može aktivirati operator prema potrebama sustava. Za regulacijsku rezervu zahtijevani su spremnici energije s brzim odzivom, primjerice baterijski spremnici energije ili reverzibilne hidroelektrane.

4.6.4. Naponska stabilnost

Analogno frekvencijskoj stabilnosti, naponsku stabilnost predstavlja konstantno održavanje vrijednosti napona (eng. *voltage control*) unutar određenog raspona za određenu naponsku razinu (pri normalnom pogonu te poslije poremećaja). To se konkretno odnosi na razine napona u pogonskim čvorovima mreže. Rasponi dozvoljenih napona određeni su Mrežnim pravilima prijenosnog sustava koji definiraju propisane granice za pojedine naponske razine. Definirane razine nazivnih napona prijenosne mreže su 110 kV, 220 kV i 400 kV.

U narednoj tablici (Tablica 4.1.) prema članku 62. Mrežnih pravila prijenosnog sustava slijede iduće granice dozvoljenih napona za prijenosnu mrežu [38].

Tablica 4.1. Propisane naponske granice [38]

| Nazivni napon | Normalni pogonski uvjeti | | Poremećeni pogonski uvjeti | |
|---------------|--------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|
| | Postotne granice [%] | Granice napona [kV] | Postotne granice [%] | Granice napona [kV] |
| 110 kV | - 10% + 5% | 360 – 420 | ± 15% | 340 – 460 |
| 220 kV | ± 10% | 198 - 242 | ± 15% | 187 - 253 |
| 400 kV | ± 10% | 99 - 121 | ± 15% | 94 - 127 |

Regulacija napona, odnosno očuvanje naponske stabilnosti vrši se upravljanjem tokovima jalove snage (eng. *reactive power compensation*) zbog induktivnog karaktera prijenosnih i distribucijskih vodova. Točnije izvodi se adaptacija promjenama potrošnje ili proizvodnje jalove snage prilikom rada unutar pogonskih uvjeta.

Pad napona (naspram linijskog napona) u mreži zbog induktivnog karaktera vodova, u većoj mjeri određen je tokom jalove snage (manjkom), prema izrazu (4.7) [1]:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{RP + XQ}{U^2} \quad (4.7)$$

gdje je:

- R otpor voda,
- X reaktancija voda,
- P radna snaga,
- Q jalova snaga.

Promjene uvjeta u mreži najčešće su uzorkovane od strane korisnika mreže (promjene opterećenja), promjenama mrežne topologije ili pak zbog nepredviđenih događaja poput ispada elemenata iz mreže (vodova, transformatora i slično). Klasična regulacija napona postiže se potrošnjom jalove energije na proizvodnim jedinicama, prigušnicama ili kondenzatorima za kompenzaciju. Lokalna regulacija napona (niže razine) u čvorištima u ograničenoj mjeri postiže se i promjenom regulacijske preklopke na transformatoru čime se mijenja prijenosni omjer dok se transformator nalazi pod opterećenjem.

Naponsku stabilnost ne mogu direktno regulirati baterije (elementi baterijskog spremnika energije u kojemu je energija pohranjena) nego se napon regulira pomoću elektroničkih pretvarača (usmjerivača) koji su integrirani u baterijske spremnike energije i koji imaju sposobnost upravljanja jalovom snagom. Nedostatak tog pristupa je uvjet pravilnog dimenzioniranja elektroničkih pretvarača za predviđene jalove snage što može predstavljati veliku investiciju prilikom implementacije. Za potrebe regulacije naponske stabilnosti potrebni su spremnici s brzim odzivom. Za regulaciju naponske stabilnosti veću primjenu imaju drugi oblici spremnika energije koji u sebi imaju integrirane električne strojeve, to jest generatore. Na istom principu kao kod elektrana, generatori spremnika energije imaju sposobnost generacije i apsorpcije jalove snage te tako mogu održavati naponsku stabilnost. Primjeri takvih spremnika energije su reverzibilne hidroelektrane (PHES), pohrana komprimiranog zraka (CAES) i zamašnjaci.

4.6.5. Crni start

Crni start (eng. *black start*) ili drugim nazivom beznaponski start, predstavlja samostalno pokretanje proizvodne jedinice (elektrane) i sinkronizaciju na mrežu bez potrebe vanjskog izvora energije. Proizvodna jedinica se pokreće iz (izvanpogonskog) stanja mirovanja te prilikom pokretanja nije priključena na mrežni napon (beznaponsko stanje). Da bi se proizvodna jedinica priključila na mrežu, mora postići spremnost za sinkronizaciju. Nakon uspješnog priključenja na mrežu, proizvodna jedinica preuzima opterećenje. Crni start se odvija nakon raspada dijelova elektroenergetskog sustava ili pak raspada cijelog sustava. Crnim startom postiže se napajanje korisnika mreže nakon raspada.

Baterijski spremnici energije mogu se primijeniti za ponovnu uspostavu elektroenergetskog sustava (ili dijela), to jest prilikom crnog starta proizvodnih jedinica kao rezerva djelatne snage. Baterijski spremnici energije mogu preuzeti dio opterećenja na sebe te tako olakšati i ubrzati ponovnu uspostavu sustava. Sinkronizacijom proizvodnih jedinica i preuzimanjem opterećenja, spremnici energije prestaju s ciklusom pražnjenja te prelaze u ciklus punjenja čime stvaraju rezervu električne energije za naknadne potrebe.

Uvjeti koje spremnici energije moraju zadovoljavati da bi sudjelovali u obnovi elektroenergetske mreže su sljedeći [1]:

- Mogućnost upravljanja prijelaznom pojavom nastalom uključivanjem blokova opterećenja. Spremnik energije mora biti u mogućnosti pružiti razinu snage s minimalno 5 do 10% neto kontinuirane snage na zahtjev u fazama.
- Mogućnost stabilizacije odvojene mreže neovisno o razini snage opterećenja. Spremnik energije mora imati sposobnost rada u velikom rasponu snage, posebice na niskim razinama snage i održavanja pogona na tim razinama.
- Mogućnost očuvanja ravnoteže proizvodnje i potrošnje dok pri tome ostaje unutar prihvatljivog frekvencijskog raspona. Sustav mora biti u stanju, pri zahtjevu operatora prijenosnog sustava, pružiti referentnu frekvenciju odvojenoj mreži dok god ima pristup odgovarajućim rezervama snage.
- Mogućnost održavanja stabilnog pogona bez kontinuiranih naponskih i frekvencijskih oscilacija. Sustav mora sadržavati odgovarajuće regulatore brzine i napona.
- Mogućnost upravljanja prenaponima uzrokovanim ponovnim spajanjem s bilo kojim drugim dijelom mreže koji je pod naponom.

- Mogućnost tolerancije do 12 inverzija snage bez oštećenja tijekom operacija spajanja između regionalnih dovoda.

Dodatna prednost spremnika energije je njihovo korištenje u otočnom radu. Točnije, spremnici energije mogu se koristiti ukoliko je dio mreže odvojen (izoliran) od ostatka mreže. U tom slučaju, spremnici energije mogu služiti kao primarni izvor energije (ukoliko je opterećenje unutar granica snage spremnika i ukoliko je dovoljno veliki kapacitet spremnika), u kombinaciji s pripadajućim obnovljivim izvorima energije poput solarnih elektrana ili pak samo za obnovu razine napona. Prilikom navedenog načina rada bitno je imati aktivne sve razine zaštite (primjerice aktivni zaštitni releji) da bi se očuvala sigurnost pogona. Ovaj princip primjene spremnika energije ponajveću primjenu nalazi nakon velikih oluja i havarija gdje može pružiti izvor energije za osnovne potrebe stanovništva.

5. SIMULACIJA PRIKLJUČENJA BSE NA PRIJENOSNU MREŽU

Primjena spremnika energije u prijenosnoj mreži može se praktično pokazati korištenjem računalne simulacije. U ovom slučaju prikazana je primjena baterijskog spremnika energije (BSE) na simulacijskom modelu elektroenergetskog podsustava Istre (Hrvatska). Simulacijom je izvedeno nekoliko scenarija pomoću kojih su prikazane potencijalne prednosti primjene BSE u prijenosnoj mreži. Povećanjem sigurnosti sustava, pouzdanosti opskrbe (osiguranjem normalnog pogonskog stanja) i osiguravanjem fleksibilnosti, integracija BSE u prijenosnoj mreži može se smatrati opravdanom te su iz tog razloga provedeni tipični scenariji koji mogu ugroziti navedene zahtjeve. Bitno je napomenuti da se navedeni zahtjevi mogu zadovoljiti i primjenom drugih oblika spremnika energije poput primjerice reverzibilnih hidroelektrana, ali zahtijeva zasebno proučavanje, zbog različitih karakteristika samog sustava pohrane (vrijeme odziva, kapacitet pohrane, maksimalna izlazna snaga i tako dalje).

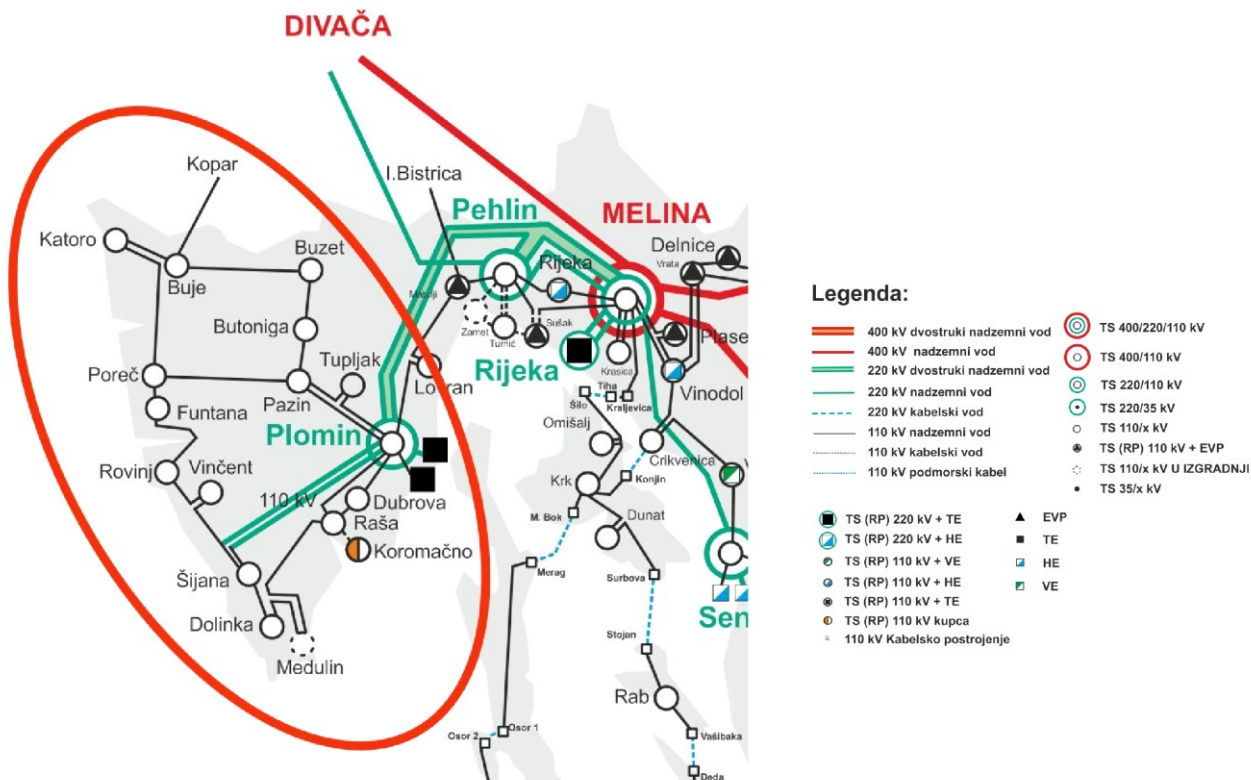
Računalna statička simulacija izvedena je korištenjem programskog paketa NEPLAN. NEPLAN je razvijen od strane švicarske tvrtke BCP Busarello + Cott + Partner AG te je među vodećim programskim alatima za analizu elektroenergetskih mreža. Program pruža mogućnosti i alate za analizu, simulacije, planiranje i optimizaciju prijenosnih, distribucijskih mreža i pametnih mreža (eng. *Smart grid*) te sustava proizvodnje, industrijskih sustava i sustava obnovljivih izvora energije. Analiza odnosno simulacija izvodi se dobivanjem proračuna tokova snaga u svakom čvorištu mreže koje računalni program obrađuje iterativnim rješavanjem sustava nelinearnih jednadžbi.

Istaknuta literatura prilikom izvođenja simulacije je simulacija prezentirana u literaturi [39], gdje je također obrađena tematika istarskog podsustava i implementacije spremnika energije. Autori u navedenoj literaturi simulaciju su proveli unutar računalnog programa PSS®E (eng. *Power Transmission System Planning Software*) razvijenog od strane njemačke tvrtke Siemens. U literaturi je korišten sličan model podsustava, te su provedeni slični ili drukčiji potencijalni scenariji unutar podsustava u kojima se autori posebno osvrću na optimiziranje kapaciteta pohrane spremnika energije s ciljem da se operatoru prijenosnog sustava omogući pravovremeno upravljanje podsustavom radi sprečavanja prekida opskrbe istarskog podsustava i općenito hrvatskom elektroenergetskom sustavu. Također, bitna razlika naspram modela u navedenoj literaturi je da u ovom radu nije uključena proizvodna jedinica TE Plomin 1 jer trenutno nije aktivna, dok je u literaturi jedinica uključena (i aktivna) tijekom simulacije što utječe na rezultate simulacije.

5.1. Analiza prijenosne mreže i BSE

Promatrani elektroenergetski podsustav Istre, označen crvenom elipsom (Slika 5.1.), sastoji se od prijenosne mreže nazivnog napona 110 kV i 220 kV. Visoki napon u prijenosnoj mreži spušta se na razinu srednjeg napona distribucijske mreže pomoću transformatorskih stranica (TS 110/x kV) razmještenim prema područjima potrošnje električne energije. U simulaciji, zanemarene su transformatorske stanice TS Medulin (u izgradnji) i TS Koromačno (transformatorska stanica tvrtke Holcim (Hrvatska) d.o.o., Proizvodnja cementa Koromačno).

Elektroenergetski podsustav Istre specifičan je zbog svoga geografskog položaja i oblika radi čega posljedično ima lošu povezanost s okolnim područjima, to jest ima visok stupanj izoliranosti. Iz tog razloga, pojavljuju se izazovi pri osiguranju sigurnosti sustava i pouzdanosti opskrbe električnom energijom. Isto tako, zbog turističkog karaktera područja, pojavljuju se velike fluktuacije u potrošnji električne energije (opterećenju), posebice ukoliko se promatra razdoblje unutar jedne godine. Pojavljuju se sezonska opterećenja, to jest velike razlike između potrošnje unutar ljetnih i zimskih mjeseci.



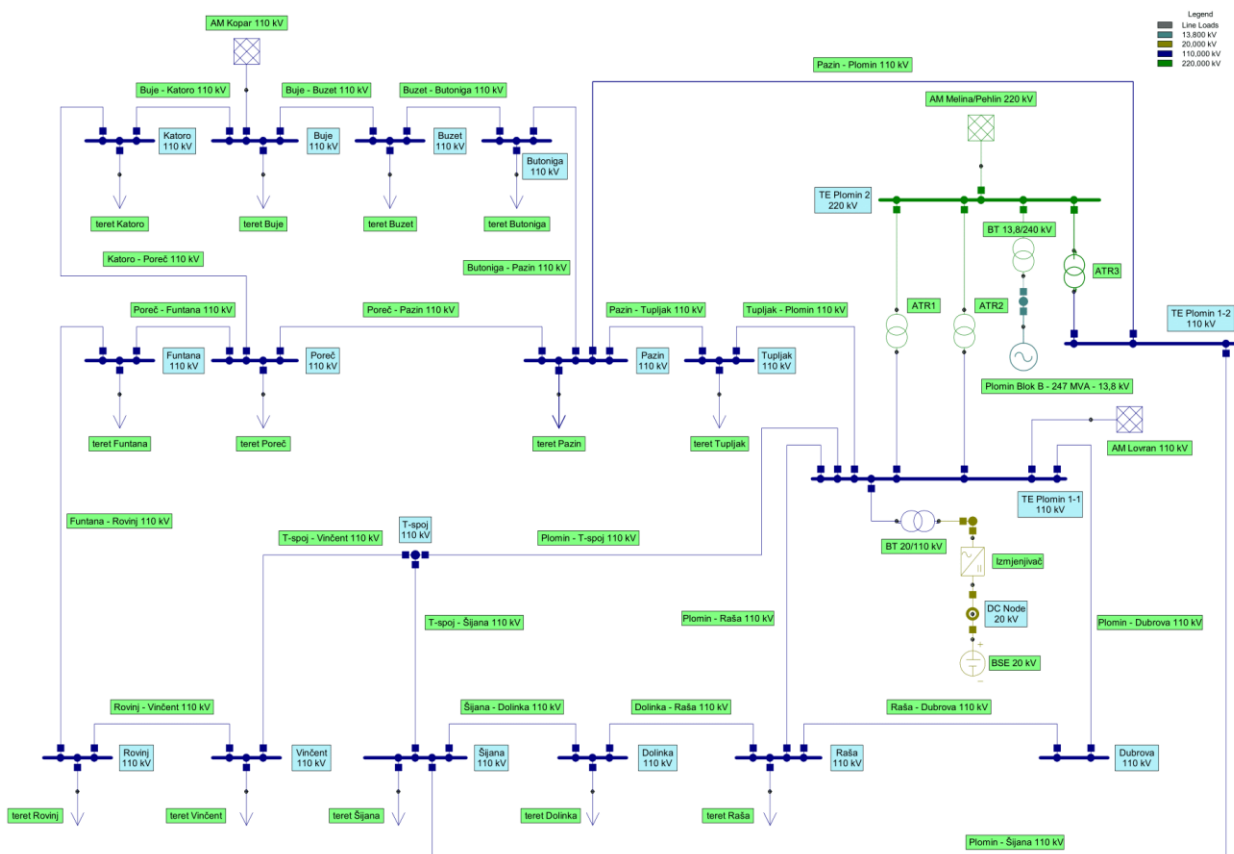
Slika 5.1. Elektroenergetski podsustav Istre [40]

Nadalje, elektroenergetski podsustav Istre povezan je interkonekcijom s graničnom državom Slovenijom putem 110 kV nadzemnog voda (maksimalnog kapaciteta prijenosa 70 MVA) koji povezuje TS 110/x kV Buje i TS 110/x kV Kopar. Povezanost podsustava s ostatkom elektroenergetskog sustava Hrvatske ostvaren je putem 220 kV dvostrukog nadzemnog voda na relaciji TS 220/110 kV Plomin i TS 220/110 Pehlin koji je pak povezan s TS 400/220/110 kV Melina čime se ostvaruje povezanost sa 110 kV, 220 kV i 400 kV prijenosnom mrežom Hrvatske. Navedeni 220 kV vod je vod kojim se opskrbljuje velika većina potrošnje (injektiranje snage u podsustav) u istarskom podsustavu, ali i kojim se odvodi višak električne energije iz proizvodnje TE Plomin (evakuacija snage) tijekom perioda niske potrošnje unutar podsustava. Isto tako, povezanost s ostatkom sustava Hrvatske ostvarena je i preko 110 kV nadzemnog voda (maksimalnog kapaciteta prijenosa 90 MVA) koji povezuje TS 220/110 kV Plomin i TS 110/x Lovran koji se krajnje spaja na TS 220/110 kV Pehlin.

Jedino proizvodno postrojenje (elektrana) unutar podsustava je termoelektrana TE Plomin. TE Plomin je kondenzacijska termoelektrana na (kameni) ugljen. Sastoji od dvije proizvodne jedinice Blok A (TE Plomin 1 - 125 MW) i Blok B (TE Plomin 2 - 210 MW). Međutim zbog požara (ali i isteka roka važenja Rješenja o objedinjenim uvjetima zaštite okoliša) proizvodne jedinice TE Plomin 1, navedena jedinica je ugašena. Trenutno jedina aktivna proizvodna jedinica je TE Plomin 2 (Blok B).

Nazivna snaga proizvodnje termoelektrane TE Plomin iznosi 247 MVA (uvažavajući samo TE Plomin 2), faktora snage ($\cos\phi$) od 0,85 i nazivnog napona 13,8 kV koji se putem blok transformatora (BT 13,8/240 kV) podiže na 220 kV razinu, na sabirnici TE Plomin 2 te se preko rasklopnog postrojenja povezuje na ostatak 220 kV mreže.

Elektroenergetska mreža modelirana u programskom paketu NEPLAN, prema prethodnom opisu, prikazana je na slici 5.2. U modeliranoj mreži, mjesta povezivanja elektroenergetskog podsustava Istre s ostatkom hrvatskog sustava i slovenskog sustava, nadomještene su korištenjem elemenata aktivnih mreža (eng. *Network Feeder*). Nadalje, transformatorske stanice TS 110/x prikazane su pomoću čvorišta (eng. *Node*) na koje su priključeni tereti koji korespondiraju s opterećenjem pripadajućeg područja. Prijenosna mreža je karakterizirana nazivnim naponom iznosa 110 kV te se unutar mreže pojavljuje samo jedno čvorište s nazivnim naponom 220 kV, to jest čvorište TE Plomin 2. Povezanost dviju naponskih razina ostvarena je unutar čvorišta Plomin pomoću tri mrežna trofazna regulacijska autotransformatora 220/115 kV ATR, nazivnih snaga 150 MVA.



Slika 5.2. Modelirani elektroenergetski podsustav Istre u NEPLAN-u

Dvostruki nadzemni vod označen zelenom bojom na slici 5.1 je tipski 220 kV vod, ali je trenutno pod 110 kV naponskom razinom jer trenutno nije dovršena izgradnja infrastrukture za prelazak na 220 kV naponsku razinu, to jest nije izgrađena TS 220/110 Vodnjan. Iz tog razloga, u NEPLAN-u je taj vod modeliran kao jednostruke dionice nazivnog napona 110 kV, odnosno dionice: DV 110 kV Plomin – T-spoj, DV 110 kV T-spoj – Šijana, DV 110 kV T-spoj - Vinčent i DV 110 kV Plomin – Šijana.

Modelirani baterijski spremnik je nazivnog napona 20 kV i izlazne snage 30 MW. U simulacijskom modelu (Slika 5.2.) baterijski spremnik se sastoji od samih baterija (eng. *DC Battery*), izmjenjivača (eng. *PWM*) i čvorišta (eng. *DC Node*) koje povezuje dva navedena elementa. Izmjenjivač je konfiguriran prema specifikacijama baterijskog spremnika (20 kV, 30 MVA). Baterijski spremnik (sustav pohrane) povezan je na sabirnicu 110 kV TE Plomin 1-1 preko blok transformatora BT 20/110 kV. Navedena sabirnica predstavlja optimalno mjesto integracije BSE zbog odlične povezanosti s ostalim 110 kV čvorištima kao i s 220 kV mrežom te ostvaruje mogućnost evakuacije proizvedene energije iz elektrane u slučaju prekida povezanosti s ostatkom mreže. Isto tako, BSE može optimizirati proizvodnju iz TE Plomin pružanjem usluga opisanih u poglavlju 4.5.

Nadalje, rezultati simulacije nisu određeni specifičnom vrstom baterijskog spremnika, ali kao referentna tehnologija smatra se Li-ion tehnologija koja je opisana u poglavlju 3.2.4, čije su specifične karakteristike brz odziv na promjene u mreži, visoka gustoća energije i snage, relativno dugi životni vijek, visoka efikasnost i niski operativni troškovi.

5.2. Simulacijski scenariji

Korištenjem programskog paketa NEPLAN razmatralo se nekoliko scenarija koji se mogu pojaviti u prijenosnoj mreži, odnosno elektroenergetskom podsustavu Istre. Obrađeni scenariji su scenarij normalnog pogonskog stanja, scenarij minimalnog opterećenja elektroenergetskog podsustava uz ispad TE Plomin i scenarij maksimalnog opterećenja elektroenergetskog podsustava uz ispad TE Plomin. Unutar svakog scenarija, opterećenja u čvorištima ne ovise o dobu dana, mjeseca ili godine nego su konstantna, ali i iznosom skalirana, ovisno o zadanom stupnju opterećenja (minimalno, prosječno i maksimalno). Tijekom provođenja simulacija, 220 kV dvostruki nadzemni vod Plomin – Melina/Pehlin (nadmješten aktivnom mrežom AM Melina/Pehlin 220 kV) je isključen (osim pri simulaciji normalnog pogonskog stanja) s obzirom na to da navedeni vod kao i pripadni autotransformatori zadovoljavaju kapacitete prijenosa za potrebe injektiranja i evakuacije snage podsustava. Provedbom navedenih simulacija prikazuje se potencijalna primjena baterijskog spremnika kao kratkoročne zamjene pri ispadu navedenog 220 kV voda. Odvajanje elemenata ili dijelova mreže u simulaciji vrši se isključenjem prekidača određenog elementa.

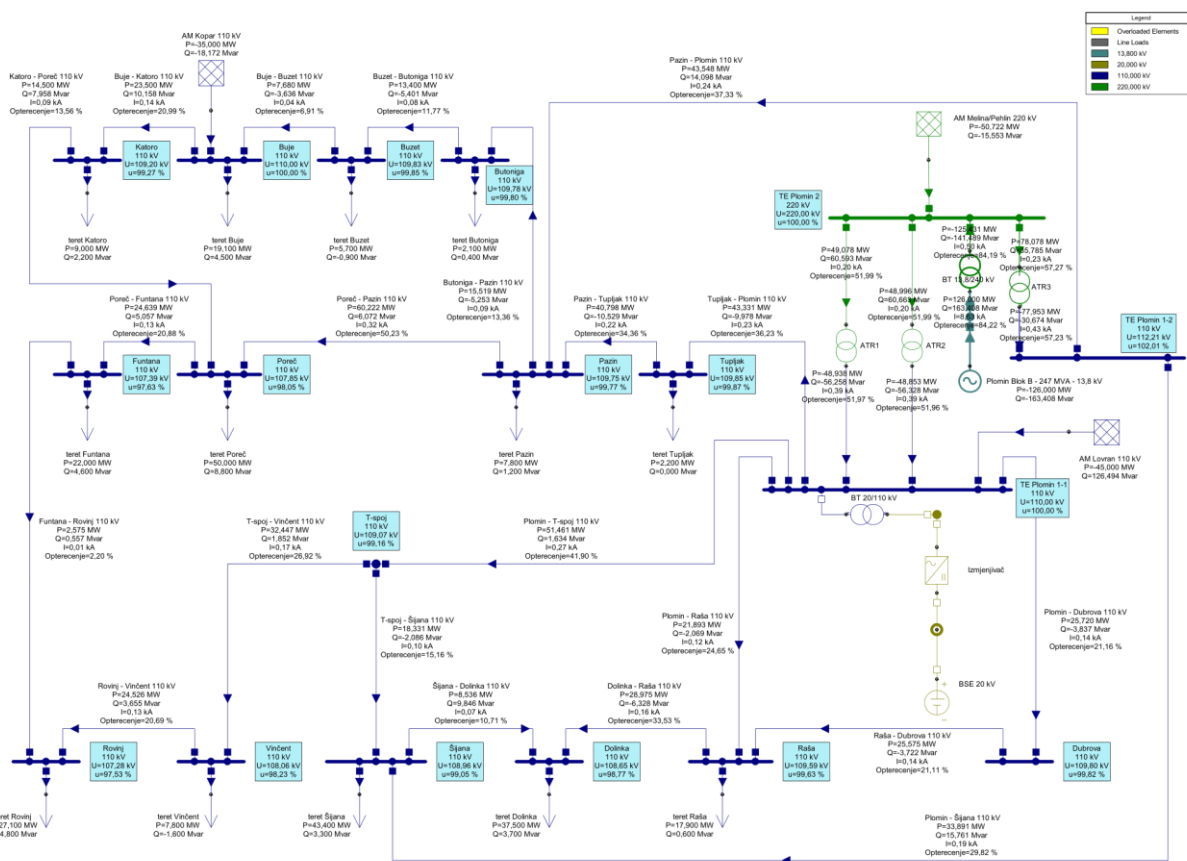
5.2.1. Normalno pogonsko stanje

Normalno pogonsko stanje je stanje elektroenergetskog sustava u kojemu je osigurana adekvatna razina sigurnosti, sva potrošnja je podmirena i sva algebarska ograničenja tipa jednakosti i nejednadžbi su zadovoljena. Na slici 5.3. prikazano je normalno pogonsko stanje istarskog podsustava koje se uzima kao referentno stanje prilikom izvođenja ostalih simulacija. U ovom scenariju oba 110 kV voda, kao i 220 kV vod su priključeni i aktivni. Opterećenje podsustava je prosječno za istarski podsustav i iznosi 251,6 MW. Proizvodnja u termoelektrani TE Plomin iznosi 126 MW što je tehnički minimum. Apsolutna razlika proizvodnje i potrošnje iznosi 125,6 MW te ju je potrebno injektirati (dobaviti) iz okolnih sustava. Oba 110 kV voda rade na polovici prijenosne snage 35 MW (AM Kopar) i 45 MW (AM Kopar).

Ostatak potrebne snage zadovoljen je preko 220 kV voda i iznosi 50,722 MW. Suma snaga proizvodnje TE Plomin, dva 110 kV i jednog dvostrukog 220 kV iznosi više od same potrošnje zbog pojave gubitaka unutar samog podsustava koji iznose 5,122 MW.

U normalnom pogonskom stanju nije došlo do preopterećenje na bilo kojem elementu te su elementi opterećeni s približno 50% maksimalne snage (uz izuzetak blok transformatora BT 13,8/240 kV koji je opterećen malo iznad 80%). Najveće odstupanje napona u čvorištima iznosi -2,47% (čvorište Rovinj), odnosno iznosi 107,28 kV što je unutar prihvatljivih $\pm 10\%$.

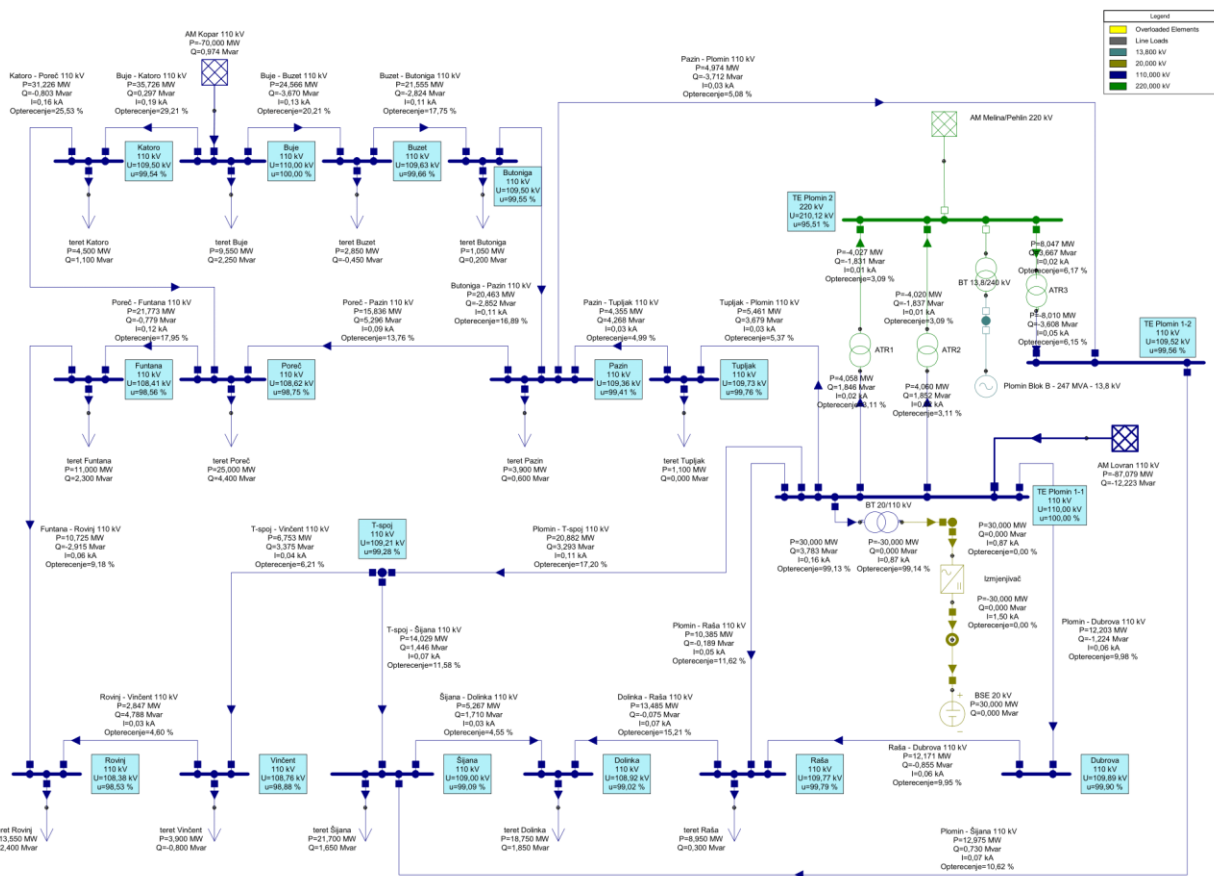
U normalnom pogonskom stanju nema značajnih prednosti s priključenom BSE s obzirom na to da nema značajno opterećenih elemenata sustava. Ostale potencijalne prednosti BSE tijekom normalnog pogona prikazane su u prethodnim poglavljima.



Slika 5.3. Stanje podsustava tijekom normalnog pogonskog stanja

5.2.2. Minimalno opterećenje istarskog podsustava uz ispad TE Plomin

Minimalno opterećenje podsustava je scenarij u kojemu potrošnja, odnosno opterećenje iznosi 50% iznosa prosječne potrošnje (opterećenja), to jest ukupno opterećenje podsustava iznosi 125,8 MW. S obzirom, da su 220 kV vod i proizvodna jedinica TE Plomin isključeni, sva potrošnja mora biti zadovoljena preko dva 110 kV voda (AM Kopar 110 kV i AM Lovran 110 kV). Navedeni scenarij prikazan je na slici 5.4.



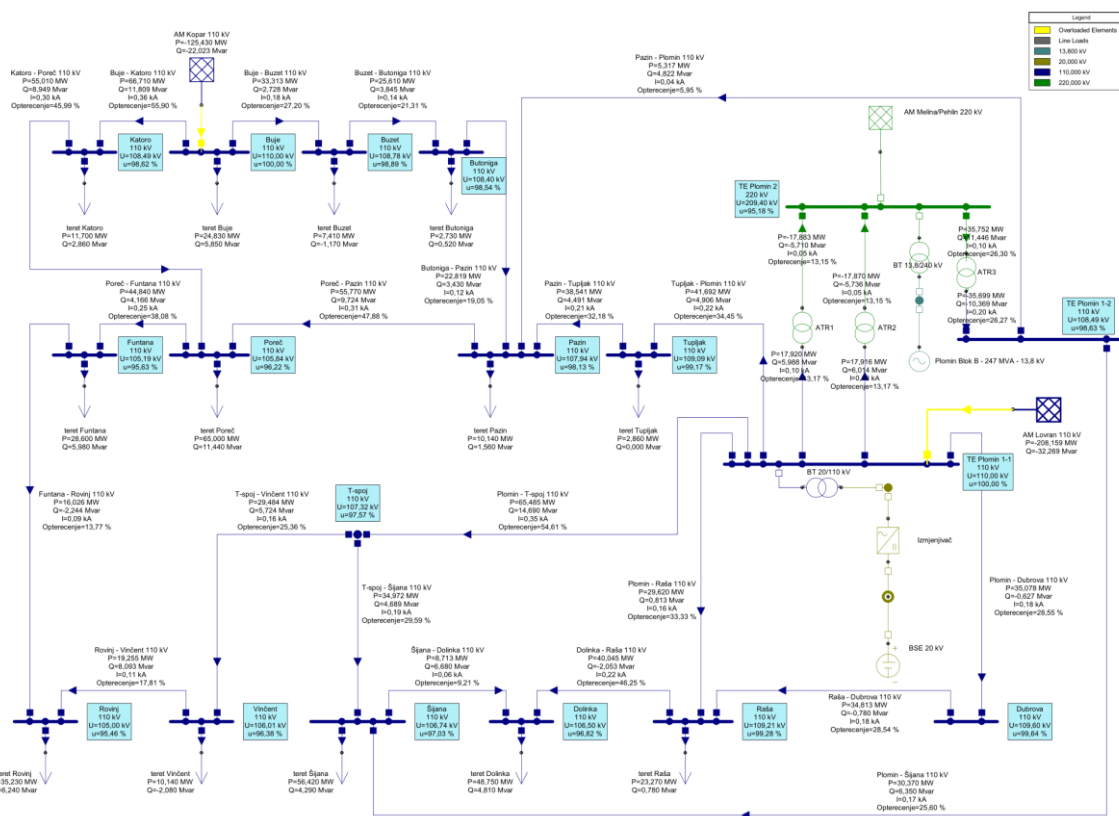
Slika 5.4. Scenarij minimalnog opterećenja i ispada TE Plomin, s BSE 30 MW

Tijekom scenarija minimalnog opterećenja, sva potrošnja unutar podsustava može se zadovoljiti pomoću dva 110 kV voda. Vod DV 110 kV Buje – Kopar (AM Kopar 110 kV) opterećen je sa 68% maksimalne snage prijenosa, odnosno 47,603 MW naspram maksimalnih 70 MVA. Vod DV 110 kV Plomin – Lovran (AM Lovran) opterećen je s 88% maksimalne snage prijenosa, odnosno, 79,200 MW naspram nazivnih 90 MVA. U trenutnom scenariju, nema potrebe za injektiranjem snage iz BSE jer je sva potrošnja zadovoljena.

U ovom slučaju BSE može biti u ciklusu punjenja ili služiti u svrhe opisane u poglavlju 4.5. Međutim, ukoliko se BSE puni maksimalnom snagom od 30 MW, tada je prisutno maksimalno opterećenje oba 110 kV voda (iznosa 70 MW za prvi i iznosa 87 MW za drugi) što predstavlja sigurnosni rizik za podsustav. Poželjno je punjenje vršiti smanjenom snagom (ispod 50% maksimalne snage). U slučaju uključenog 220 kV voda, nema ograničenja na maksimalnu snagu punjenja (30 MW). Prilikom punjenja BSE maksimalnom snagom, napon u čvorovima podsustava ostaje unutar prihvatljivih granica. Najveće odstupanje napona u čvorištima iznosi 4,49% (čvorište TE Plomin 2), odnosno iznosi 209,46 kV, što je unutar prihvatljivih $\pm 10\%$. Isto tako, svi vodovi i transformatori unutar sustava su opterećeni ispod 50%.

5.2.3. Maksimalno opterećenje istarskog podsustava uz ispad TE Plomin

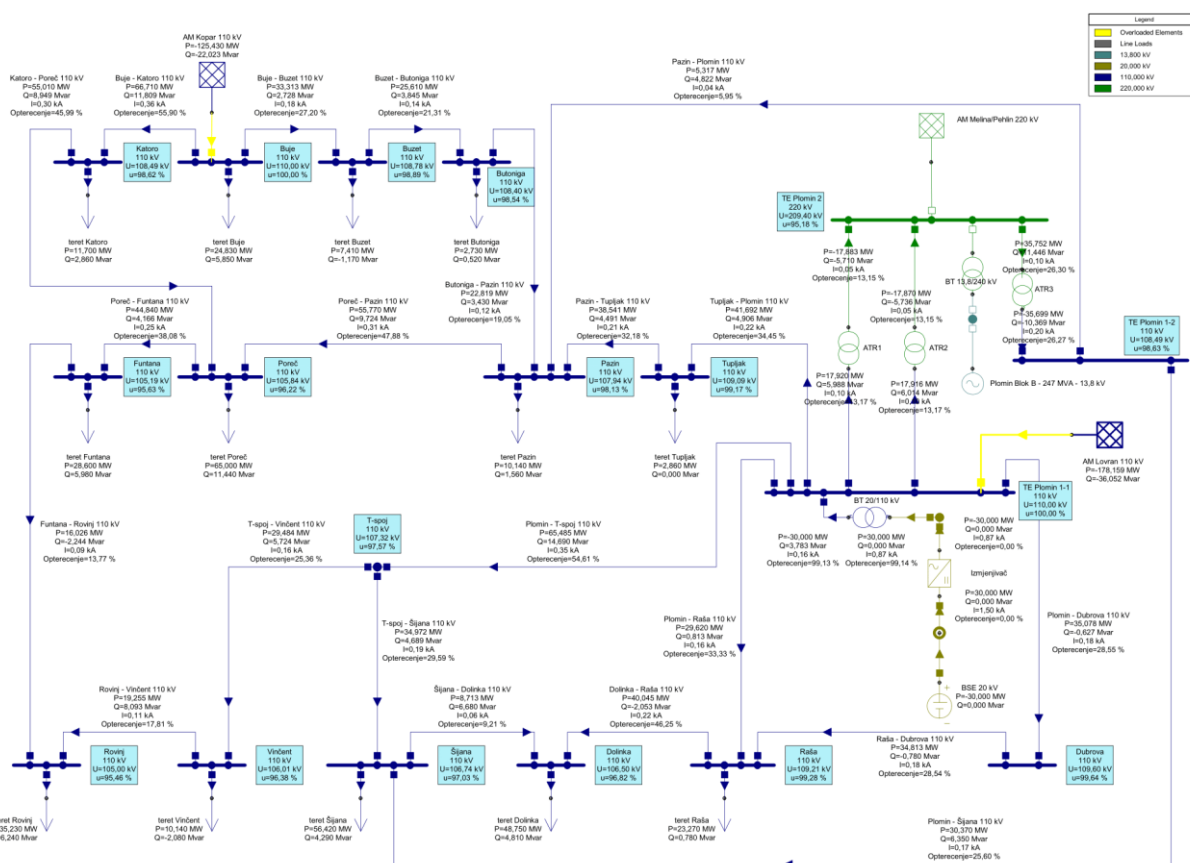
Maksimalno opterećenje podsustava predstavlja scenarij u kojemu opterećenje iznosi 130% iznosa prosječne potrošnje. Odnosno, ukupna potrošnja (opterećenje) iznosi 327,08 MW. 220 kV vod i proizvodna jedinica TE Plomin su isključeni, te se sva potrošnja mora zadovoljiti preko dva 110 kV voda. Navedeni scenarij prikazan je na slici 5.5.



Slika 5.5. Scenarij maksimalnog opterećenja i ispada TE Plomin, bez BSE

Na slici 5.5. može s uvidjeti da su neki 110 kV vodovi preopterećeni (predstavljani kao AM Kopar i AM Lovran). Vod DV 110 kV Buje – Kopar opterećen je snagom od 123,430 MW, što iznosi 176% od nazivne snage (70 MVA). Zatim DV 110 kV Plomin – Lovran, opterećen je snagom od 208,159 MW, što predstavlja opterećenje od 231% nazivne snage (90 MVA). Navedeni scenarij rezultira ispadom (isključenjem) oba 110 kV voda zbog pojave preopterećenja što posljedično dovodi do prekida opskrbe električnom energijom unutar istarskog podsustava, odnosno dovodi do prekida opskrbe napajanja.

Na slici 5.6. prikazana je provedena simulacija identičnog opterećenja, ali uz integrirani baterijski spremnik energije snage 30 MW. Integracijom BSE, oba 110 kV voda i dalje su preopterećena, ali manjim iznosom. Iako je preopterećenje manje, i dalje bi se dogodio ispad oba voda što pak dovodi do lokalnog raspada sustava. Time je ustanovljeno da BSE snage 30 MW nije dovoljan za pokriće takve vrste opterećenja istarskog podsustava.

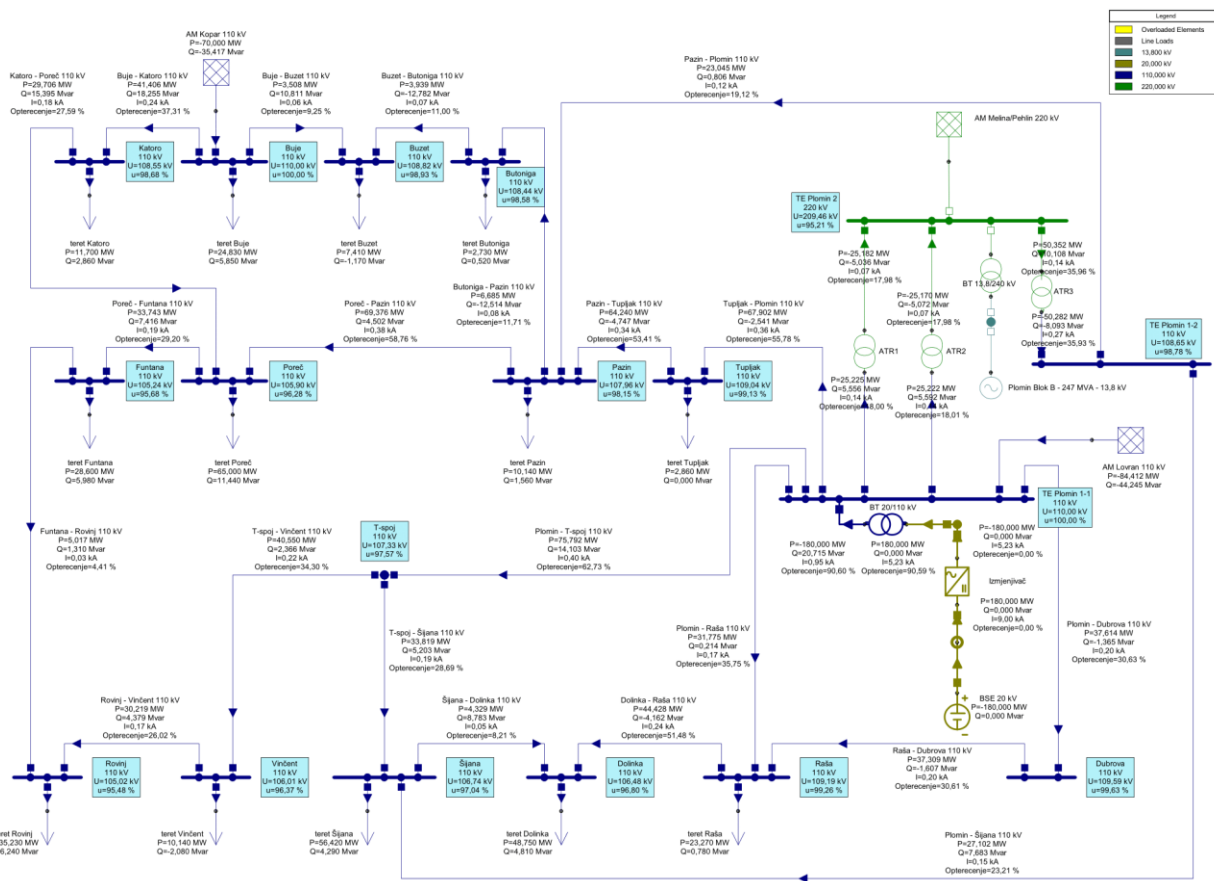


Slika 5.6. Scenarij maksimalnog opterećenja i ispada TE Plomin, s BSE 30 MW

Za pokrivanje maksimalnog opterećenja, uz ispad TE Plomin, u sustav je potrebno integrirati BSE dovoljnog kapaciteta snage. U simulaciji (Slika 5.7.), integriran je BSE izlazne snage 180 MW.

Na taj način, oba 110 kV voda nalaze se u graničnim (maksimalnim) vrijednostima kapaciteta prijenosa čime je izbjegnuto preopterećenje vodova, a time i pojava lokalnog raspada sustava. Integracijom BSE, operator prijenosnog sustava ima određeni vremenski period (ovisan o kapacitetu pohrane BSE) za provedbu korektivnih mjera i dovođenje sustava u normalno pogonsko stanje. Najveće odstupanje napona u čvorištima iznosi -4,79% (čvorište TE Plomin 2), odnosno iznosi 209,46 kV, što je unutar prihvatljivih $\pm 10\%$. Isto tako, najveće opterećenje dalekovoda iznosi 62,73% (DV 110 kV Plomin – T-spoj), a transformatora 18,01% (zanemarujući BT 20/110 kV) što je unutar pogonskih granica.

U slučaju dugotrajnog maksimalnog opterećenja, integracija BSE nije adekvatna s obzirom na iznimno veliku investiciju, zbog visokog zahtijevanog kapaciteta pohrane energije. Također, u slučaju ispada jednog 110 kV voda, lokalni raspad sustava je neizbježan.



Slika 5.7. Scenarij maksimalnog opterećenja i ispada TE Plomin, s BSE 180 MW

5.3. Prednosti priključenja BSE

Po provedenoj analizi opisanih simulacijskih scenarija, mogu se uvidjeti određene prednosti, odnosno dobrobiti priključenja BSE unutar istarskog podsustava (prijenosne mreže). Glavna prednost je osiguranje dovoljnog kapaciteta snage prilikom perioda maksimalnih, to jest vršnih opterećenja koja mogu narušiti sigurnost podsustava te u najgorem slučaju dovesti do prekida opskrbe (eng. *black-out*). Zbog ograničenog kapaciteta samih sustava pohrane, uzimanje snage iz BSE je vremenski ograničeno te je zbog toga potrebno pravovremeno poduzeti korektivne protumjere. Vrijeme reakcije treba biti unutar 30 minuta u slučaju kapaciteta izlazne snage od 30 MW. U slučaju, minimalnog opterećenja, istarski podsustav može pokriti opterećenje putem dva 110 kV voda te prilikom minimalnog opterećenja, ali i prilikom normalnog pogona baterija može biti u ciklusu punjenja ili vršiti neku od funkcija opisanih u poglavlju 4.5. Opravdanost ugradnje BSE može se postići ukoliko je izgradnja novog dalekovoda otežana zbog primjerice geografskog reljefa terena, prolaska dionice preko zaštićenih površina poput nacionalnih parkova ili pak zbog imovinsko pravnih (odnosa) problema uzrokovanih privatnim zemljištima na dionicama nadzemnog voda. U tom slučaju, ugradnja BSE predstavlja brže i jednostavnije rješenje. Ujedno, prednost tog pristupa je mogućnost prebacivanja BSE na drugu lokaciju unutar elektroenergetskog sustava ukoliko BSE izgubi svrhu na trenutnoj lokaciji i ukoliko se za to ukaže potreba.

6. ZAKLJUČAK

Energetskom tranzicijom prema ekološki prihvatljivoj električnoj energiji nastoji se integrirati rastući broj obnovljivih izvora energije. Utjecajem promjenjive i nestabilne proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije, elektroenergetski sustav podložan je nestabilnosti i nepredvidivosti pogonskih uvjeta rada. Optimalno rješenje navedene problematike predstavlja integracija spremnika energije u prijenosnoj mreži sustava. Spremnici energije razlikuju se prema karakteristikama, strukturi, vrsti pohranjene energije i principu rada. U radu su raspravljene tehnologije skladištenja energije, odnosno različiti sustavi pohrane. Prikazani sustavi pohrane su mehanički sustavi, električni sustavi, kemijski sustavi, elektrokemijski sustavi i toplinski sustavi. Mehanički sustavi su najzrelija i najjednostavnija tehnologija pohrane i postižu velike kapacitete pohrane energije. Istaknuti predstavnici mehaničkih sustava su reverzibilne hidroelektrane (trenutno najraširenija vrsta spremnika energije), pohrana komprimiranog zraka i zamašnjaci. Električne sustave karakterizira iznimno kratko vrijeme odziva i primjena kod naglih promjena u mreži a predstavnici su ultrakondenzatori i supravodljivi magneti. Kemijske sustave predstavljaju tehnologije kemijske konverzije, odnosno P2G sustav u kojemu se nastoji pohraniti energija u obliku skladištenja vodika i/ili metana korištenjem prikladnih spremnika ili postojeće nacionalne plinske infrastrukture za praktički neograničeni kapacitet pohrane energije. Elektrokemijski sustavi predstavljaju pohranu energije korištenjem klasičnih (elektrokemijskih) baterijskih spremnika (baterija) ili pomoću novijih protočnih baterija, s ciljem ostvarenja visoke efikasnosti pohrane, malih fizičkih dimenzija spremnika te visoke razine kontrole i upravljanja. Toplinske sustave karakterizira pohrana energije u obliku topline, gdje se energija može pohraniti u obliku osjetne ili latentne topline te termokemijskom pohranom energije.

Nadalje, u radu je napravljen poseban osvrt na baterijske spremnike energije (BSE). Baterijski spremnici energije dijele se prema kemijskoj strukturi i principu rada baterijskog članka dok je osnovna podjela baterijskih sustava na klasične (elektrokemijske) baterije i protočne baterije. Predstavnici klasičnih baterijskih spremnika su olovno-kiselinske, natrij-sumpor, litij-ionske, natrij-nikal-klorid i cink zrak baterije te baterije na bazi nikla. Trenutno najveći stupanj razvoja i primjene zauzimaju litij-ionske baterije zbog visoke gustoće energije, velikih iznosa struja pražnjenja, niskog stupnja samopražnjenja i malih troškova održavanja. Predstavnici protočnih baterija su vanadij redoks, željezo-krom i cink-brom protočne baterije. Trenutno najveću primjenu imaju vanadij redoks protočne baterije dok su ostale vrste uglavnom u fazi razvoja ili je tek započeta njihova komercijalizacija.

Nakon osvrta na pojedinačne tehnologije baterijskih spremnika, prikazana je primjena BSE u prijenosnoj mreži. Odnosno prikazane su potencijalne usluge, mogućnosti i prednosti koje se postižu ugradnjom spremnika u prijenosnoj mreži. Prvenstveno, postiže se ubrzanje integracije obnovljivih izvora energije (OIE) zbog uravnoteženja promjenjive i nestalne proizvodnje iz OIE, a time se posljedično postiže smanjenje emisija stakleničkih plinova. Nadalje, injektiranjem snage iz spremnika u mrežu tijekom perioda visokih opterećenja sprječavaju se pojave zagušenja u mreži. Osim toga, korištenjem uređaja energetske elektronike u sklopu baterijskih sustava, vrši se filtracija viših harmonika napona. Kombinacijom filtracije, sprječavanja zagušenja i ujednačenja proizvodnje iz OIE, povećava se kvaliteta električne energije. Nadalje, dodatna prednost sprječavanja zagušenja i potencijalnih ispada elemenata mreže je postizanje ili poboljšanje osiguranja N-1 kriterija sigurnosti. Povrh toga, integracijom BSE u sklopu konvencionalnih elektrana i OIE te smanjenjem iznosa tokova snaga kroz mrežu, minimiziraju se troškovi rada sustava. Uz sve to, integrirani BSE u prijenosnoj mreži ima mogućnost pružanja pomoćnih usluga operatoru sustava. Odnosno, može se spriječiti već spomenuta zagušenja i osigurati uravnoteženje elektroenergetskog sustava te se može osigurati naponska stabilnost (upravljanjem tokova jalove snage preko usmjerivača), frekvencijska stabilnost (sekundarnom i tercijarnom rezervom, potencijalno i primarnom) i crni start (pružanjem rezerve djelatne snage).

Na kraju, simulacijom priključenja baterijskog spremnika energije na modelu prijenosne mreže (podsustava) Istre tijekom tipičnih scenarija koji se potencijalno mogu pojaviti u mreži, prikazana je mogućnost napajanja istarskog podsustava pomoću baterijskog spremnika i dva 110 kV voda. Time je ustanovljeno moguće rješenje ugradnje BSE naspram izgradnje novih ili nadogradnje postojećih trasa vodova.

Zaključno, ubrzanim razvojem spremnika nastaje rastući broj novih tehnologija pohrane energije. Velika pozornost pridaje se baterijskim spremnicima energije te je očekivana njihova šira primjena u elektroenergetskim sustavima. Primjenom baterijskih spremnika u prijenosnoj mreži postiže se veliki broj korisnih usluga kojima se olakšava vođenje elektroenergetskog sustava i ubrzava se primjena obnovljivih izvora energije. Končano, simulacijom je prikazana primjena baterijskog spremnika energije s mogućnosti sprječavanja prekida opskrbe istarskog podsustava u slučaju poremećenog stanja.

7. LITERATURA

- [1] Robyns, B.; i dr.: “Energy Storage in Electric Power Grids“, Wiley-ISTE, 2015.
- [2] Ofak, Z.; i dr.: “Spremnici energije u kontekstu povećane potrebe za izvorima fleksibilnosti u elektroenergetskom sustavu“, 13. simpozij o sustavu vođenja EES-a HRO CIGRE, Vol. 1-23, 2018.
- [3] Jafari, M.; Botterud, A.; Sakti, A.: “Decarbonizing power systems: A critical review of the role of energy storage“, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 158, 2022.
- [4] Jacob, A.S.; i dr.: “Study on Pricing Mechanism for Energy Generated by Pumped Hydro Energy Storage (PHES) in India“, s Interneta, https://www.researchgate.net/publication/357900492_Study_on_Pricing_Mechanism_for_Energy_Generated_by_Pumped_Hydro_Energy_Storage_PHEs_in_India, 21. svibnja 2022.
- [5] Luburić, Z.; i dr.: “Uloga spremnika energije u elektroenergetskom sustavu“, 12. simpozij o sustavu vođenja EES-a HRO CIGRE, 2016.
- [6] Đurić, I.; Škare, J.; Marijanić, T.: “Baterijski spremnici električne energije u distribucijskoj mreži“, 6. (12.) savjetovanje HO CIRED, Vol. S05–17, 2018.
- [7] Rufer, A.: “Energy Storage: Systems and Components“, CRC Press, 2017.
- [8] HEP Proizvodnja: “RHE Velebit“, s Interneta, <https://www.hep.hr/proizvodnja/hidroelektrane-1528/pp-he-jug/rhe-velebit/1546>, 28. svibnja 2022.
- [9] Wang, B.; Bauer, S.: “Compressed air energy storage in porous formations: a feasibility and deliverability study“, Petroleum Geoscience, Vol. 23, pp. 306-314, 2017.
- [10] Buchroithner, A.; i dr.: “Design and Experimental Evaluation of a Low-Cost Test Rig for Flywheel Energy Storage Burst Containment Investigation“, Applied Sciences, Vol. 8(12), 2622, 2018.
- [11] Beacon Power: “Operating Plants – Stephentown, New York“, s Interneta, <https://beaconpower.com/stephentown-new-york/>, 03. lipnja 2022.
- [12] Azad, M. L.; Khursheed, A.; Kumar, V.: “Mitigating power oscillations in wind power plants using ESS“, s Interneta, https://www.researchgate.net/publication/282926755_Mitigating_power_oscillations_in_wind_power_plants_using_ESS, 05. lipnja 2022.
- [13] Nikolaidis, P.; Poullikkas, A.: “A comparative review of electrical energy storage systems for better sustainability“, Journal of power technologies, Vol, 97(3), pp. 220-245, 2017.

- [14] Horvat, I.; i dr.: “Power to Gas sustav (P2G)“, s Interneta, https://hr.wikipedia.org/wiki/Power_to_Gas_sustav_%28P2G%29, 06. lipnja 2022.
- [15] Komarnicki, P.; Lombardi, P.; Styczynski, Z.: “Electric Energy Storage Systems: Flexibility Options for Smart Grids”, Springer, 2017.
- [16] FSEC®: “Liquid Hydrogen Storage“, s Interneta, <https://energyresearch.ucf.edu/research/hydrogen/liquid-hydrogen-storage/>, 14. lipnja 2022.
- [17] Das, C. K.; i dr.: “Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality“ Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 91, pp. 1205-1230, 2018.
- [18] Colthorpe, A.: “First phase of 800 MWh world biggest flow battery commissioned in China”, s Interneta, <https://www.energy-storage.news/first-phase-of-800mwh-world-biggest-flow-battery-commissioned-in-china/>, 17. lipnja 2022.
- [19] Mehos, M.; i dr.: “Concentrating solar power Gen3 demonstration roadmap“, s Interneta, https://www.researchgate.net/publication/331993959_Concentrating_Solar_Power_Gen3_Demonstration_Roadmap, 18. lipnja 2022.
- [20] Cabeza, L. F.; i dr.: “Introduction to thermal energy storage systems“, Advances in Thermal Energy Storage Systems, Woodhead Publishing, pp. 1-33, 2021.
- [21] Carmen: “Solana Solar Generating Plant – Molten Salt Thermal Storage System, US”, s Interneta, <https://www.power-technology.com/marketdata/solana-solar-generating-plant-molten-salt-thermal-storage-system-us/>, 23. lipnja 2022.
- [22] Bie, Y.; i dr.: “Effect of phase transition temperature and thermal conductivity on the performance of Latent Heat Storage System“, Applied Thermal Engineering, Vol. 135, pp. 218-227, 2018.
- [23] Dunn, R.; Lovegrove, K.; Burgess, G.: “A Review of Ammonia-Based Thermochemical Energy Storage for Concentrating Solar Power”, Proceedings of the IEEE, Vol. 100(2), pp. 391-400, 2011.
- [24] Zobaa, A. F.: “Energy Storage - Technologies and Applications”, IntechOpen, 2013.
- [25] Lin, S. L.; i dr.: “Characterization of spent nickel–metal hydride batteries and a preliminary economic evaluation of the recovery processes”, Journal of the Air & Waste Management Association, Vol. 66(3), pp. 296-306, 2016.

- [26] UNIDO: “Maximize Battery Life with Long-Duration Energy Storage”, s Interneta, http://www.unido.or.jp/en/technology_db/4394/, 26. lipnja 2022.
- [27] Akhil, A. A.; i dr.: “DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA”, Sandia National Laboratories, 2013.
- [28] Joo, S. H.; i dr. “Development of recycling technology to recover valuable metals from lithium primary and ion batteries“, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 229(1), pp. 212-220, 2015.
- [29] Quick, D.: “Flat batteries could improve performance and lower cost of energy storage”, s Interneta, <https://newatlas.com/planar-battery/16633/>, 04. srpnja 2022.
- [30] Spector, J.: “How Zinc-Air Batteries Are Taking On the Long-Duration Storage Market”, s Interneta, <https://www.greentechmedia.com/squared/storage-plus/zinc-air-batteries-are-taking-on-long-duration-energy-storage-lithium-ion>, 12. srpnja 2022.
- [31] Lu, M.; i dr.: “An optimal electrolyte addition strategy for improving performance of a vanadium redox flow battery“, International Journal of Energy Research, Vol. 44(4), pp. 2604-2616, 2020.
- [32] Fang, M.; i dr.: “Research progress of iron-chromium flow batteries technology“, Energy Storage Science and Technology, Vol. 11(5), pp. 1358-1367, 2022.
- [33] 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.
- [34] HERA: “Uvjeti kvalitete opskrbe električnom energijom“, s Interneta, https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2017_04_37_795.html, 24. srpnja 2022.
- [35] Mmarre; i dr.: “Jouleova toplina“, s Interneta, https://hr.wikipedia.org/wiki/Jouleova_toplina, 29. srpnja 2022.
- [36] Luburić, Z.; Pandžić, H.; Plavšić, T.: “Assessment of Energy Storage Operation in Vertically Integrated Utility and Electricity Market”, Energies, Vol. 10(5), 683, 2017.
- [37] HOPS: “Dnevni dijagram opterećenja“, s Interneta, https://www.hops.hr/dijagram_opterecenja-dnevni, 13. kolovoza 2022.
- [38] HOPS: “Mrežna pravila prijenosnog sustava“, s Interneta, https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2017_07_67_1585.html, 24. kolovoza 2022.
- [39] Luburić, Z.; i dr.: “Role of energy storage in ensuring transmission system adequacy and security”, Energy, Vol. 156, pp. 229-239, 2018.

- [40] HOPS: “Shema EES-a“, s Interneta, <https://www.hops.hr/shema-ees-a>, 25. kolovoza 2022.
- [41] HEP Proizvodnja: “Samostalno pokretanja elektrana (crni start)“, s Interneta <https://www.hep.hr/proizvodnja/proizvodi-i-usluge/pomocne-usluge-ees/samostalno-pokretanje-elektrana-crni-start/1724>, 28. kolovoza 2022.
- [42] Klaić, Z.; Nikolovski, S.: “Kvaliteta električne energije: mjerenja prema normi EN 50160“, 6. savjetovanje HRO CIGRE, Vol. C4-14, 2003.
- [43] HEP Proizvodnja: “Održavanje frekvencije“, s Interneta, <https://www.hep.hr/proizvodnja/proizvodi-i-usluge/pomocne-usluge-ees/odrzavanje-frekvencije/1722>, 28. kolovoza 2022.
- [44] Zbunjak, Z.; i dr.: “Integracija sustava baterijskog spremnika energije u elektroenergetski sustav za osiguranje N-1 kriterija sigurnosti“, 13. savjetovanje HRO CIGRE, Vol. C2-08, 2017.
- [45] Mohamed, F.; i dr.: “Development of Energy Storage Systems for Power Network Reliability: A Review“, *Energies*, Vol. 11(9), 2278, 2018.
- [46] Plavšić, T.; Franković, D.: Predavanja s kolegija Vođenje elektroenergetskog sustava, 2021/2022.
- [47] Batelić, J.: “Prilog povećanju pouzdanosti sustava mlinova TE Plomin 2“, doktorska disertacija, Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci, 2019.
- [48] Colthorpe, A.: “Victorian Big Battery: Australia’s biggest battery storage system at 450 MWh, is online“, s Interneta, <https://www.energy-storage.news/victorian-big-battery-australias-biggest-battery-storage-system-at-450mwh-is-online/>, 28. kolovoza 2022.

8. POPIS OZNAKA I KRATICA

| | |
|-------|--|
| AGC | Sustav automatske regulacije proizvodnje (eng. <i>Automatic Generation Control</i>) |
| AIT | Prosječno trajanje dugotrajnih prekida napajanja (eng. <i>Average Interruption Time</i>) |
| BMS | Sustav upravljanja baterijom (eng. <i>Battery Management System</i>) |
| BSE | Baterijski spremnik energije |
| CAES | Pohrana komprimiranog zraka (eng. <i>Compressed Air Energy Storage</i>) |
| CSP | Koncentrirana solarna energija (eng. <i>Concentrated Solar Power</i>) |
| DoD | Dubina pražnjenja (eng. <i>Depth of Discharge</i>) |
| EMS | Sustav upravljanja energijom (eng. <i>Energy Management System</i>) |
| ENS | Neisporučena električna energija (eng. <i>Energy Not Supplied</i>) |
| ESR | Ekvivalentni serijski otpor (eng. <i>Equivalent Series Resistance</i>) |
| ESS | Spremnik energije (eng. <i>Energy Storage System</i>) |
| ETS | Sustav trgovanja emisijama (eng. <i>Emissions Trading System</i>) |
| FACTS | Fleksibilni izmjenični prijenosni sustav (eng. <i>Flexible Alternating Current Transmission System</i>) |
| HERA | Hrvatska energetska regulatorna agencija |
| HOPS | Hrvatski operator prijenosnog sustava |
| LCOE | Specifična granična cijena proizvodnje električne energije (eng. <i>Levelized Cost of Electricity</i>) |
| OIE | Obnovljivi izvori energije |
| OPS | Operator prijenosnog sustava |
| P2G | Tehnologije kemijske konverzije (eng. <i>Power-to-Gas</i>) |
| PCS | Sustav pretvorbe energije (eng. <i>Power Conversion System</i>) |
| PEM | Protonski propusna membrana (eng. <i>Proton Exchange Membrane</i>) |
| PHES | Reverzibilna hidroelektrana (eng. <i>Pumped Hydro Energy Storage</i>) |
| RHE | Reverzibilna hidroelektrana |
| SMES | Supravodljivi magneti (eng. <i>Superconducting Magnetic Energy Storage</i>) |
| SoE | Stanje energije (eng. <i>State of Energy</i>) |
| TES | Pohrana toplinske energije (eng. <i>Thermal Energy Storage</i>) |
| VESS | Virtualni spremnik energije (eng. <i>Virtual energy storage system</i>) |
| VRB | Vanadij redoks baterija (eng. <i>Vanadium Redox Battery</i>) |

9. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

Rastući udio integriranih obnovljivih izvora energije unutar elektroenergetskog sustava uzrokuje pojavu nestabilnosti i neuravnoteženja zbog promjenjive i nestalne proizvodnje iz obnovljivih izvora energije. Potencijalno rješenje navedene problematike predstavlja primjena spremnika energije u prijenosnim mrežama što je ujedno tematika ovog rada. U radu su raspravljene temeljne tehnologije skladištenja energije odnosno sustavi skladištenja energije od kojih se ističu mehanički, električni, kemijski, elektrokemijski i toplinski sustavi. Nadalje, napravljen je osvrt u kojemu je napravljena usporedba relevantnih tehnologija baterijskih spremnika energije. Povrh toga, raspravljena je primjena baterijskih spremnika u prijenosnoj mreži. Odnosno prikazane su mogućnosti iskorištenja baterijskih spremnika energije za integraciju u sklopu obnovljivih izvora energije i posljedično smanjenje emisija stakleničkih plinova, za povećanje kvalitete električne energije, za odgodu nadogradnje prijenosne mreže, za osiguranje N-1 kriterija sigurnosti, za ostvarivanje minimalnih troškova rada sustava i za pružanje pomoćnih usluga operatoru prijenosnog sustava (upravljanje zagušenjima u mreži, uravnoteženje elektroenergetskog sustava, osiguranje frekvencijske stabilnosti i pružanje regulacijske rezerve, osiguranje naponske stabilnosti i pružanje crnog starta). Za kraj, prikazana je primjena baterijskog spremnika energije na simulacijskom modelu istarskog podsustava koja je rezultirala uspješnim sprječavanjem prekida opskrbe istarskog podsustava tijekom perioda poremećenog pogonskog stanja.

Ključne riječi: spremnici energije, baterijski spremnici energije, tehnologije skladištenja energije, obnovljivi izvori energije, emisije stakleničkih plinova, pomoćne usluge, istarski podsustav, prijenosna mreža

10. ABSTRACT AND KEYWORDS

The growing share of integrated renewable energy sources within the power system leads to instability and imbalance due to variable and erratic power production from renewable energy sources. A potential solution to the aforementioned issue is the utilization of energy storage systems in transmission networks, which is the main topic of this paper. The paper discusses the fundamental technologies of energy storage systems in which mechanical, electrical, chemical, electrochemical and thermal systems stand out. Furthermore, the paper provides a review of a comparison of relevant battery energy storage technologies. In addition, the paper discusses the application of battery energy storage systems in transmission network. In other words, it discusses the possibilities of using battery energy storage systems for integration within renewable energy sources and the consequent reduction of greenhouse gas emissions and also for increasing the quality of electricity and also for delaying the upgrade of the transmission network and also for ensuring N-1 safety criterion and also for achieving minimum system operating costs and also for provision of auxiliary services to the transmission system operator (congestion management in the network, balance of the power system, ensuring frequency stability and providing regulatory reserve, ensuring voltage stability and providing black start). Finally, the paper presents the application of the battery energy storage system on the simulation model of the Istrian subsystem, which resulted in the successful prevention of interruption of the power supply in the Istrian subsystem during the period of disturbed operating condition.

Keywords: energy storage, battery energy storage system, energy storage technologies, renewable energy sources, greenhouse gas emissions, auxiliary services, Istrian subsystem, transmission network