

# USPOREDBA RAZLIČITIH TEHNOLOGIJA ZA POHRANU ELEKTRIČNE ENERGIJE

---

Vlahović, Maja

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:190:090841>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-18**



Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**USPOREDBA RAZLIČITIH TEHNOLOGIJA ZA POHRANU**  
**ELEKTRIČNE ENERGIJE**

Rijeka, rujan 2022.

Maja Vlahović

0069067076

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**USPOREDBA RAZLIČITIH TEHNOLOGIJA ZA POHRANU**  
**ELEKTRIČNE ENERGIJE**

Mentor: prof. dr. sc. Vitomir Komen

Rijeka, rujan 2022.

Maja Vlahović

0069067076

Rijeka, 19. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**  
Predmet: **Prijenos i distribucija električne energije**  
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Maja Vlahović (0069067076)**  
Studij: **Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike**  
Modul: **Elektroenergetika**

Zadatak: **USPOREDBA RAZLIČITIH TEHNOLOGIJA ZA POHRANU ELEKTRIČNE ENERGIJE / COMPARISON OF DIFFERENT ELECTRICAL ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES**

### Opis zadatka:

Uloga pohrane električne energije u EE sustavu. Položaj i uloga pohrane električne energije na tržištu električne energije. Pregled tehnologija za pohranu električne energije i njihove tehničke karakteristike. Usporedbe različitih tehnologija pohrane i definiranje područja primjene.

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

*Maja Vlahović*

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:



Prof. dr. sc. Vitomir Komen

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:



Prof. dr. sc. Viktor Sučić

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

**IZJAVA**

Sukladno Pravilniku o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, od siječnja 2020. godine, izjavljujem da sam samostalno izradila diplomski rad pod nazivom „Usporedba različitih tehnologija za pohranu električne energije“ prema zadatku od 21.03.2022. godine, uz konzultiranje s mentorom izv. prof. dr. sc. Vitomirom Komenom.

Rijeka, rujan 2022.



Maja Vlahović

0069067076

## ZAHVALA

*Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Vitomiru Komenu na mentorstvu, uputama i velikodušnoj pomoći prilikom izrade ovog diplomskog rada i cjelokupnog studiranja.*

*Veliko hvala svim mojim prijateljicama i prijateljima, kolegicama i kolegama uz koje je ovo studiranje bilo lakše i zabavnije. Proživjeli smo mnogo sretnih, ali i onih manje sretnih trenutaka koji su nas ojačali i zblížili i ostavili neizbrisiv trag u našim studentskim danima.*

*Hvala mom dečku koji mi je pomogao prebroditi teške trenutke, davao motivaciju i bio velika potpora.*

*Najviše zahvaljujem svojim roditeljima, sestri, braći te ostaloj obitelji, iako neki više nisu sa nama. Vjerovali ste u mene i bili mi podrška u svakom usponu i padu koji sam imala. Bez Vaše pomoći ovo ne bi bilo moguće.*

*Hvala Vam!*

*Maja Vlahović*

## Sadržaj

|  |    |
|--|----|
| 1. UVOD.....   | 3  |
| 2. TEHNOLOGIJE SPREMNIKA ELEKTRIČNE ENERGIJE .....                           | 5  |
| 3. MEHANIČKI SUSTAVI SKLADIŠTENJA ELEKTRIČNE ENERGIJE .....                  | 7  |
| 3.1. Crpno-akumulacijske hidroelektrane .....                                | 7  |
| 3.2. Pohrana komprimiranim zrakom.....                                       | 10 |
| 3.3. Zamašnjaci .....  | 11 |
| 4. TOPLINSKI SUSTAVI ZA POHRANU ELEKTRIČNE ENERGIJE.....                     | 13 |
| 5. ELEKTRIČNI / ELEKTROMAGNETSKI SUSTAVI ZA POHRANU ELEKTRIČNE ENERGIJE..... | 15 |
| 5.1. Ultra kondenzatori (Super-kondenzatori).....                            | 15 |
| 5.2. Supravodljivi magneti .....   | 16 |
| 6. ELEKTROKEMIJSKI SUSTAVI POHRANE ELEKTRIČNE ENERGIJE.....                  | 18 |
| 6.1. Baterije.....   | 18 |
| 6.1.1. Olovne baterije .....   | 19 |
| 6.1.2. Litij-ionske baterije .....   | 19 |
| 6.1.3. Nikal-kadmij i nikal-metal-hibrid baterije.....                       | 20 |
| 6.2. Proizvodnja i skladištenje vodika.....                                  | 21 |
| 7. PRIMJENA VODIKA.....  | 23 |
| 7.1. Svojstva vodika .....   | 23 |
| 7.2. Proizvodnja i potrošnja vodika u svijetu .....                          | 24 |
| 7.3. Zeleni vodik .....  | 25 |
| 7.4. Integracija vodika u energetske sustav .....                            | 26 |
| 7.4.1. P2G2P (eng. Power-to-Gas-to-Power).....                               | 26 |
| 7.4.2. Primjena vodika u transportnom sektoru.....                           | 28 |
| 8. BATERIJSKI SPREMNICI ELEKTRIČNE ENERGIJE .....                            | 30 |
| 8.1. Akumulatorske baterije.....   | 31 |
| 8.2. Usmjerivači .....   | 32 |

|   |    |
|---|----|
| 8.3. Moguće primjene baterijskih sustava za pohranu električne energije.....    | 32 |
| 9. ULOGA SPREMNIKA ENERGIJE U ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU.....                   | 34 |
| 9.1. Upravljanje zagušenjima u mreži.....                                       | 34 |
| 9.2. Dnevno uravnoteženje - izravnavanje dnevnog dijagrama opterećenja .....    | 35 |
| 9.3. Frekvencijska stabilnost - primarna, sekundarna i tercijarna rezerva ..... | 36 |
| 9.4. Naponska stabilnost - prijenosna i distribucijska stabilnost .....         | 36 |
| 9.5. Start u uvjetima raspada mreže - crni start (eng. black-start).....        | 37 |
| 10. PRIMJER BATERIJSKOG SPREMNIKA U SN MREŽAMA.....                             | 39 |
| 10.1. BSPEE Mali Lošinj.....  | 40 |
| 11. ZAKLJUČAK .....   | 47 |
| LITERATURA.....   | 49 |
| PRILOZI .....   | 51 |
| Popis slika .....   | 51 |
| Popis tablica .....   | 52 |
| Popis kratica .....   | 52 |
| SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI.....   | 53 |
| SUMMARY AND KEY WORDS .....   | 54 |



## 1. UVOD

U elektroenergetskom sustavu (EES) odvija se konstantno uravnoteženje električne energije između one koja je proizvedena i one koja je potrošena. Pohranjivanjem proizvedene električne energije u vrijeme povećane proizvodnje ili smanjenog opterećenja, te njena predaja u trenucima kada je povećano opterećenje ili smanjena proizvodnja omogućeno je optimalno vođenje elektroenergetskog sustava. Kako se izmjenična električna energije ne može direktno pohranjivati, potrebno ju je pretvoriti u neki drugi oblik energije kao što je mehanička, kemijska, elektrokemijska ili toplinska energija.

Skladištenje energije posreduje između promjenjivih izvora i promjenjivih opterećenja. Bez mogućnosti skladištenja energija koja je proizvedena mora biti jednaka energiji koja se troši. Skladištenje energije djeluje na način da pomiče energiju kroz vrijeme. Ona energija koja se u jednom trenutku generira, u drugom se može iskoristiti tijekom skladištenja. Od ostalih oblika skladištenja energije razlikujemo ulje u Strateškom rezervatu nafte i spremnicima, prirodni plin u podzemnim rezervoarima i cjevovodima, toplinska energija u led i toplinska masa.

Postoje razni načini za skladištenje električne energije u mreži, hidraulička akumulacija električne energije, spremnici komprimiranog zraka, toplinsko, kinetičko, elektromagnetsko skladištenje, itd. Jedan od njih su baterijski spremnici koji spadaju u skupinu kemijskog skladištenja. Postoje oni koji se ne mogu puniti i je njihova primjena nepovratna, te akumulatori koje možemo puniti. Električnu energiju također možemo pohraniti u obliku vodika koji je dobiven elektrolizom vode. Taj je proces djelomično povratan posredovanjem gorivih ćelija za proizvodnju električne energije iz kisika i vodika.

Otežano skladištenje električne energije objašnjava zašto je upravljanje električnim mrežama koncipirano prema principu izravne potrošnje proizvedene električne energije, čak i kada je udaljenost između proizvodnje i potrošnje nekoliko stotina kilometara. Izravna potrošnja energije ima prednost većeg ukupnog energetskeg prinosa. Zapravo, pretvorba energije potrebna za skladištenje uzrokuje vrlo različite gubitke ovisno o korištenim tehnologijama skladištenja. Ti gubici mogu biti u rasponu od 10% do 50%, ili čak i više. Međutim, ovaj pojam prinosa može se staviti u perspektivu ako pohranjena energija dolazi iz izvora za koji bi se nepohranjena energija ionako izgubila, kao što je slučaj s energijom vjetra ili fotonaponskog podrijetla.

Treba imati na umu da se električna energija može pohraniti i kasnije koristiti u drugom energetsom obliku. To je slučaj sa spremnicima tople vode u kućanskim mrežama, čija je krajnja upotreba toplinska energija i proizvodnja vodika putem elektrolize. Neka opterećenja imaju kapacitet skladištenja koji omogućuje kontrolu napajanja iz električne mreže, kao kod hladnjača u hladnjačama supermarketa ili skladištenja u baterijama električnih vozila. [20]

## 2. TEHNOLOGIJE SPREMNIKA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Spremnici električne energije su definirani kao dijelovi elektroenergetskih mreža koji mogu ostvariti odmak u vremenu između proizvodnje električne energije i potrošnje, to jest onu električnu energiju koja se jednom pohranila, spremnik ovisno o potrebi može uz kontrolirano moduliranje pogonskih parametara vraćati nazad u mrežu.

Osnovne veličine kojima se opisuju spremnici električne energije:

- **Nazivna snaga** - najviša izlazna snaga koju daje sustav za pohranu energije
- **Gustoća energije** - količina energije koja može biti pohranjena u kilogramu ili kubnom metru spremnika te je bitna kod dimenzioniranja prostora u koji se spremnik smješta
- **Vrijeme pražnjenja** - vremensko razdoblje koje je potrebno da bi se skladište energije ispraznilo
- **Vrijeme odziva** - vremensko razdoblje koje se gleda od trenutka kada sustav dobije obavijest za pražnjenje pa sve do uspostavljanja nazivne snage pražnjenja
- **Samopražnjenje** - proces gubitka energije koja je pohranjena neovisan o ciklusima punjenja i pražnjenja
- **Učinkovitost** - omjer izražen u postotku između električne energije koja je predana sustavu tijekom pohrane energije te električne energije koja je predana mreži tijekom pražnjenja sustava

S obzirom na činjenicu da različite tehnologije spremnika električne energije imaju različite značajke, sve tehnologije ne mogu biti jednako primjerene za sve one funkcije koje se mogu obavljati u bilo kojem elektroenergetskom sustavu.

Spremnike energije prema veličini možemo podijeliti na:

- velike centralizirane spremnike koji su većih snaga
- distribuirane lokalne spremnike koji se ugrađuju u srednjenaponske ili niskonaponske mreže
- mikro spremnike za kućanstva

U distribucijskim mrežama spremnici imaju velik obujam funkcija koje obavljaju. S jedne strane, spremnici moraju biti sposobni da reagiraju vrlo brzo da bi pratili trenutne promjene opterećenja

u nekoj distribucijskoj mreži, dok s druge strane ukoliko prate promjene proizvodnje, vrijeme odziva može biti duže. Da bi se ostvario željeni načina rada, potrebno je odabrati tehnologiju koja ima odgovarajuća karakteristična vremena odziva i vremena pražnjenja.

Kao najznačajniji i najrašireniji oblik pohrane jako velikih količina električne energije u svijetu se još uvijek koriste crpno-akumulacijske hidroelektrane (oko 98% spremnika od otprilike 160 GW su reverzibilne hidroelektrane). U budućnosti se očekuje znatno povećavanje udjela baterijskih sustava koji se koriste kao oblik pohrane električne energije prvenstveno zbog praktičnosti već poznatih tehnologija baterija te potencijalno značajnog broja korisnika koji su u distribucijskoj mreži. [4], [5], [6]

Električne energija se može pohranjivati na različite načine zbog svoje primjene, pa se sustavi za pohranu električne energije dijele na:

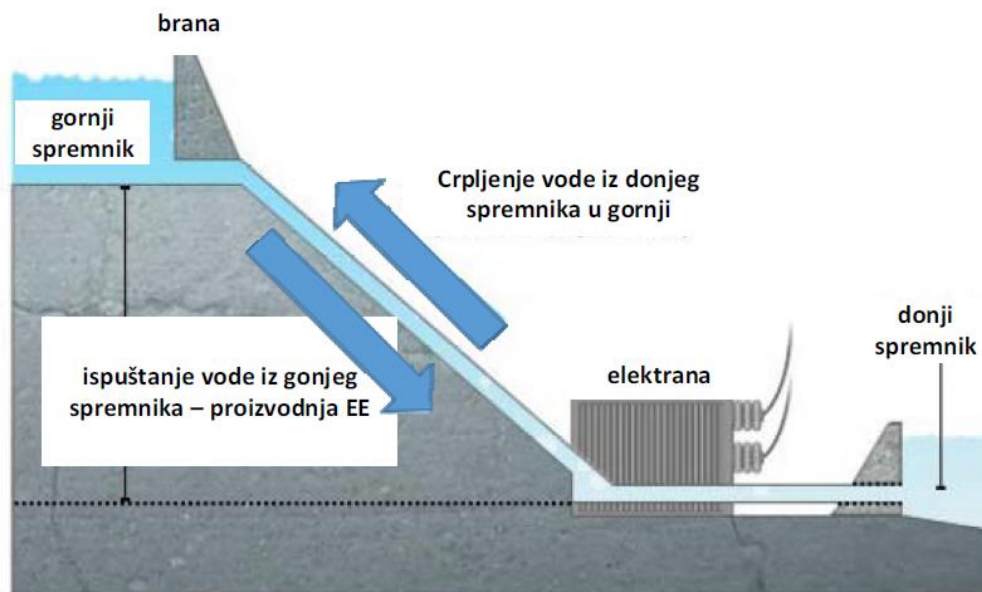
- mehaničke sustave - crpno-akumulatorske hidroelektrane, komprimirani zrak, zamašnjaci
- električni/elektromagnetski sustavi - ultra-kondenzatori, supravodljivi magneti
- elektrokemijski sustavi - pohrana vodika, baterije
- toplinski sustavi - pohrana topline

### 3. MEHANIČKI SUSTAVI SKLADIŠTENJA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Mehanički sustavi za skladištenje električne energije se odnose na skladištenje u obliku kinetičke ili potencijalne energije ili pak u komprimiranom plinu i naprezanju materijala.

#### 3.1. Crpno-akumulacijske hidroelektrane

Još u 19. stoljeću krenula je upotreba crpno-akumulacijskih hidroelektrana kao jednog od oblika za pohranjivanje energije. Godine 1890. u Italiji i Švicarskoj je izgrađena prva elektrana takvog tipa. Gledano na razini svijeta, danas je instalirano ukupno više od 120 GW crpno-akumulacijskih hidroelektrana, te to čini oko 99% svih svjetskih sustava instaliranih za pohranu električne energije. Najveća crpno-akumulacijska hidroelektrana dosad izgrađena je Bath County, u američkoj saveznoj državi Virginia. Instalirana nazivna snaga je 3003 MW, te je reverzibilnog tipa. [26]



Slika 3.1. Prikaz principa rada crpno-akumulacijske hidroelektrane [26]

Konvencionalne hidroelektrane su postrojenja kod kojih voda iz akumulacijskog jezera (spremnika vode) protječe kroz postrojenje, te dalje nastavlja teći prirodnim tokom. Za razliku od njih kod crpno-akumulacijskih hidroelektrana priča je malo drugačija. One se sastoje od dva akumulacijska jezera ili spremnika vode između kojih postoji visinska razlika. Ti spremnici su međusobno povezani cjevovodima. U vrijeme kada je opterećenje malo, energija se pohranjuje

na način da hidroelektrana crpi vodu iz donjeg u gornji spremnik. U drugom slučaju, kada je potrebna proizvodnja električne energije zbog velike potrošnje, tada voda iz gornjeg spremnika teče u donji te na taj način pokreće turbinu sa generatorom (Slika 3.1.)

Kako bi se omogućila šira primjena ovog tipa hidroelektrana, postoje dvije vrste:

- reverzibilne hidroelektrane - dva spremnika koja su povezana preko jednog cjevovoda po bloku, a u kojem se nalazi reverzibilna turbina (ovisno o potrebi može raditi kao turbina, ali i kao crpka)
- crpne hidroelektrane - dva cjevovoda u bloku povezuju spremnike vode, u jednom je cjevovodu crpka, a u drugome turbina.

Još jedna podjela crpno-akumulacijskih hidroelektrana je prema načinu na koji se pohranjuje energija:

- čisti crpni sustav - temelji se na spremnicima koji ne spadaju u dio prirodnog toka te su najčešće namijenjeni kao kratkotrajni oblik pohrane energije (manje od 24 sata), za vrijeme kada je smanjena potrošnja električne energije vrši se crpljenje vode, dok se prilikom povećane potrošnje energija koja je pohranjena koristi da bi se pokrila vršna opterećenja
- kombinirani crpni sustav - osim pumpanjem, gornji spremnik se može puniti i prirodnom vodom te se zbog toga gornji spremnik treba izgraditi na odgovarajućem vodnom slivu

Kao donji spremnik u oba crpna sustava može se koristiti postojeća akumulacija, stari napušteni rudnici ili pak podzemne špilje i drugi nekoristeni podzemni oblici. Također, postoji opcija sa otvorenim morem, te je prva takva hidroelektrana na morsku vodu izgrađena 1999. godine u Yanbaru u Japanu.



*Slika 3.2. Prva crpno-akumulacijska hidroelektrana na morsku vodu - Okinawa Yanbaru (30MW) [15]*

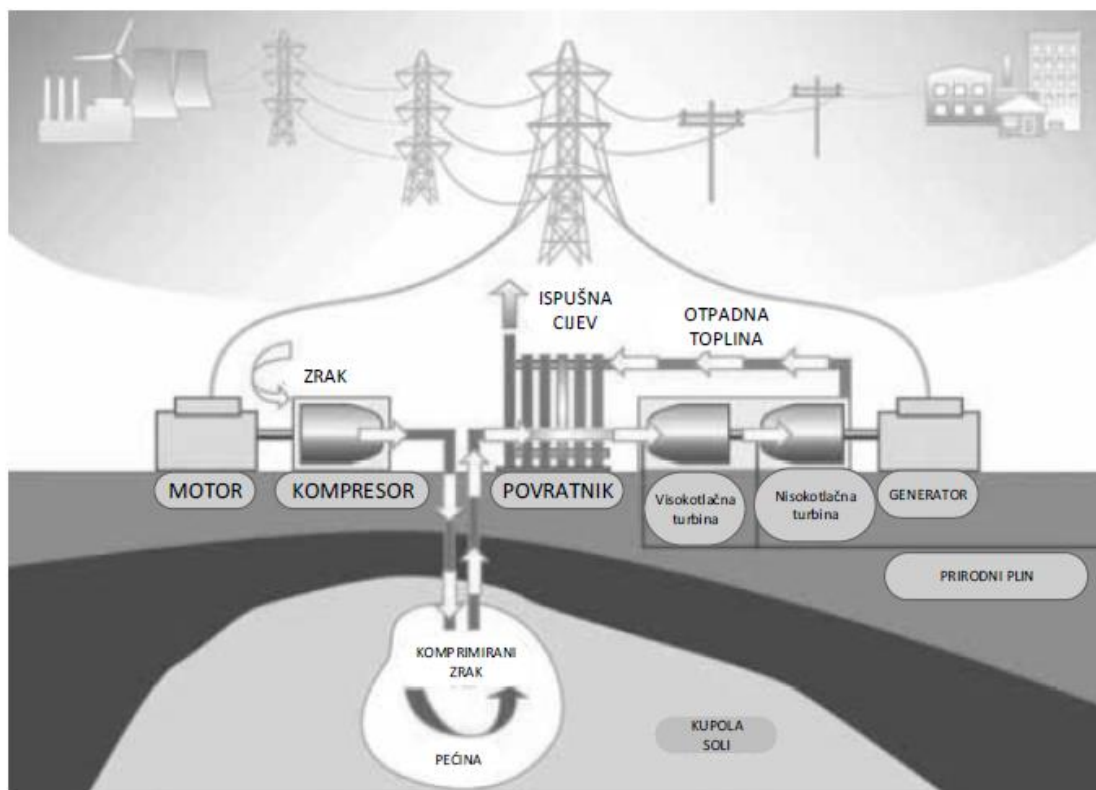
Prilikom izgradnje bilo kakvog objekta, pa tako i crpno-akumulacijske hidroelektrane potrebno je razmisliti o prednostima, ali i nedostacima koji će utjecati na cjelokupni sustav. Neke od prednosti crpno-akumulacijskih hidroelektrana su visoki stupanj iskoristivosti od 70-85%, relativno kratko vrijeme odziva, prihvatljiva cijena izgradnje te dug životni vijek. Iako je nedostataka malo, oni ipak postoje, a neki od glavnih su veliki utjecaj koji imaju na okoliš, mogućnosti izgradnje koja ovisi o geološkoj formaciji područja na kojoj se planira izgradnja te enormni vodeni resursi koji su potrebni za normalno funkcioniranje.

U današnje vrijeme sve je veći fokus na električnoj energiji koja dolazi iz obnovljivih izvora energije, no usprkos tome crpno-akumulacijske hidroelektrane i dalje zadržavaju glavnu ulogu kada je riječ o skladištenju električne energije. Možda najbolji razlog tome je to što nove tehnologije još uvijek nisu nametnute kao komercijalno isplative, no daljnjim razvojem to će se promijeniti.

Kako je ranije navedeno, zbog utjecaja na okoliš i nemogućnosti izgradnje ovog tipa hidroelektrane na bilo kojem području, proizvođači su primorani naći alternativniji pristup. Zbog toga se okreću rekonstrukciji te modernizaciji već postojećih hidroelektrana kako bi se podigla njihova nazivna snaga, ali i učinkovitost. Isto tako, daljnjim razvijanjem tehnologije sasvim je prihvatljivo očekivati da će se u budućnosti cijena izgradnje crpno-akumulacijske hidroelektrane pogonjene morskom vodom smanjiti, te će se još više iskorištavati i potencijal mora u svrhu proizvodnje električne energije.

### 3.2. Pohrana komprimiranim zrakom

Skladištenje energije uz pomoć komprimiranog zraka također je jedna od tehnologija koja je jako dobro poznata još od 19. stoljeća. Kao spremnik komprimiranog zraka koriste se nadzemni ili podzemni spremnici, a ukoliko je potrebno komprimirani zrak se može pomiješati sa prirodnim plinom, spaliti i širiti u modificiranoj plinskoj turbini koja se koristi za proizvodnju električne energije.



Slika 3.3. Prikaz sustava pohrane energije komprimiranim zrakom [26]

Tri su osnovna dijela ovakvog sustava pohrane energije - kompresor, spremnik zraka i plinska turbina/generator. Kroz razdoblje manjih opterećenja, kompresor se pokreće pomoću energije iz električne mreže te on komprimira zrak i potom ga gura u spremnik. Taj komprimirani zrak se tijekom razdoblja vršnog opterećenja koristi na način da se širi, potom se miješa sa prirodnim plinom i na kraju sagorijeva te tako pokreće plinsku turbinu.

Prilikom pohrane komprimiranog zraka najčešće se koriste podzemna skladišta, najčešće špilje ili napušteni rudnici (najpoznatiji su rudnici soli). Kad se zrak komprimira on se zagrijava, a nakon širenja hladi te je to razlog zašto se zrak nakon komprimiranja prvo treba ohladiti, a tek



onda smjestiti u spremnik. Po završetku spremanja zraka u spremnik, taj isti hladni komprimirani zrak ponovo treba zagrijati jer u suprotnom dolazi do zaleđivanja krilaca na turbini. Učinkovitost suvremenih sustava za pohranu komprimiranog zraka („dijabatski“ sustavi) iznosi oko 40-50%, a navedeno znatno smanjuje učinkovitost.

Kako bi se podigla efikasnost elektrana sa komprimiranim zrakom, razvija se ideja naprednog „adijabatskog“ sustava u kojem će se toplina koja je nastala kao nusproizvod komprimiranja zraka skladištiti te kasnije upotrijebiti da bi se zrak zagrijao tijekom širenja. Ovime bi se učinkovitost sustava povećala na 70%. Prednost ovog sustava je mogućnost skladištenja velike količine energije te najjeftiniji način pohrane ako se nalazi na pogodnoj lokaciji. S druge strane, nedostaci su niska učinkovitost te geografska ograničenja.

### 3.3. Zamašnjaci

Zamašnjaci su rotirajući mehanički uređaji koji spremaju električnu energiju u mehaničku rotacijsku. Kinetička energija zamašnjaka može se opisati pomoću jednadžbe:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 \quad (3.1.)$$

gdje je:

$E_k$  - kinetička energija zamašnjaka

$I$  - moment tromosti zamašnjaka

$\omega$  - kutna brzina

U situaciji kada u elektroenergetskom sustavu postoji višak električne energije, ta se energija putem pretvarača dovodi do statora zamašnjaka koji zatim pokreće motor stvaranjem zakretnog momenta. Kod ovakvog slučaja zamašnjak se ponaša kao motor te pohranjuje kinetičku energiju. Prilikom predaje pohranjene energije u mrežu, smjer energije se mijenja i zamašnjak sada radi ako generator. Takozvani zamašnjaci prve generacije koriste se još od 1970. godine, te čak i danas pronalaze svoju upotrebu u sustavima za besprekidna napajanja u kombinaciji sa diesel agregatima. Danas se zbog razvoja tehnologije sve više koriste brzorotirajući zamašnjaci koji se nalaze u kućištu punjenom vakuumom te postižu velike brine vrtnje, čak do preko 50 000 okretaja u minuti.

Prednost zamašnjaka je u dugom životnom vijeku, malim troškovima održavanja te su ekološki prihvatljivi jer ne sadrže otrovne komponente i pri svom radu ne stvaraju emisije CO<sub>2</sub>. Također, moguće je postići veliki raspon snaga sustava ako se složi više jednakih jedinica. Naravno postoje i nedostaci. Zamašnjaci su nepogodni kao oblik dugoročnog pohranjivanja energije zbog trenja koje nastaje u ležajevima te otpora zraka koji ga konstantno usporava. Također problem su veliki investicijski troškovi, te sigurnost i mehanička izvedba koji predstavljaju veliki izazov za proizvođače.

Zamašnjaci se mogu koristiti i za usluge regulacije frekvencije i napona u elektroenergetskom sustavu zbog velike specifične snage. Neka od najvećih postrojenja koja koriste tehnologiju brzrotirajućih zamašnjaka, a priključena su na električnu mrežu su Stephentown, New York i Hazle Township, Pennsylvania u SAD-u sa nazivnom snagom od 20 MW i mogućnošću pohrane energije do 5 MWh.



*Slika 3.4. Postrojenje u Stephentown, New York (NY), SAD [27]*

#### 4. TOPLINSKI SUSTAVI ZA POHRANU ELEKTRIČNE ENERGIJE

Toplinski sustavi za pohranu električne energije koriste materijale koji imaju sposobnost dužeg zadržavanja topline nakon zagrijavanja za pohranu električne energije. Ukoliko je potrebno, ta se pohranjena toplinska energija koristi u svrhu proizvodnje vodene pare koja služi za pogon parnih turbina u elektranama koje proizvode električnu energiju. S obzirom da otopina soli ima sposobnost da apsorbira velike količine toplinske energije, ona služi kao medij za pohranu toplinske energije. Zagrijavanje medija odvija se tako da velika pokretna ogledala prate kretanje sunca.

Zagrijani medij koji se sastoji od solne otopine ima dobra toplinska svojstva i mogućnost da dugo zadržava toplinu. Zbog toga se može koristiti kao oblik proizvodnje električne energije i pohrane energije čak i u vremenima u kojima uopće nema sunčevog zračenja ili ga nema u dovoljnim količinama. Primjer ovakvog sustava pohrane je sunčeva elektrana u južnoj Španjolskoj koja sadrži tri jednake elektrane koje imaju nazivnu snagu 50 MW, što ukupno daje 150 MW. Za vrijeme oblačnih dana i noćnih sati sustav ima mogućnost proizvodnje dostatne količine električne energije za opskrbu potrošača 7,5 sati nakon što sunčevo zračenje prestane djelovati.

Prednosti ovakvih sustava su mogućnost velike pohrane energije i sigurnost. Također osiguravaju iskorištavanje energije Sunca uz uravnoteženiju proizvodnju za razliku od fotonaponskih elektrana. Nedostaci su niska učinkovitost, visoka cijena izgradnje i veliko samopražnjenje. Da bi se toplinski sustav mogao više razvijati i koristiti potrebno je pronaći druge medije koji su cjenovno pristupačniji i lakše upravljivi.

Prva komercijalna solarna elektrana u svijetu izgrađena je u Španjolskoj snage 19,9 MW. Opremljena je sa dva spremnika rastaljenih soli koji sakupljaju toplinsku energiju koja je proizvedena tijekom dana, dakle može generirati struju 24 sata dnevno. Sastoji se od tisuća četvornih metara ogledala koja se koncentriraju na sunčevu svjetlost i rade kao povećala. Elektrana je projektirana za rad 270 dana u godini sa kapacitetom proizvodnje oko 110 000 MWh energije godišnje, što je dostatno za opskrbu oko 25 000 kućanstava.



*Slika 4.1. Gemasolar, Španjolska [28]*

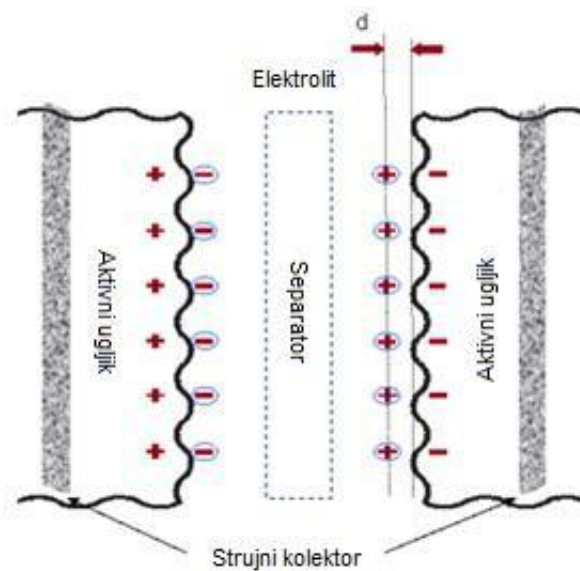
## **5. ELEKTRIČNI / ELEKTROMAGNETSKI SUSTAVI ZA POHRANU ELEKTRIČNE ENERGIJE**

### **5.1. Ultra kondenzatori (Super-kondenzatori)**

Ultra-kondenzatori ili super-kondenzatori su dvoslojni električni kondenzatori te su poznati preko 60 godina. Imaju vrlo visoku kapacitivnost u odnosu na normalne kondenzatore. Super-kondenzatori su oblik poveznice između klasičnih kondenzatora koji se koriste u elektronici te standardnih baterija. Razlog tome je praktički neograničena stabilnost ciklusa, iznimno velike snage te veća sposobnost pohrane energije kada se uspoređuju sa tradicionalnim kondenzatorima. Ovakva tehnologija još uvijek ima mnogo potencijala za razvoj što bi moglo dovesti do mnogo veće kapacitivnosti, ali i energetske gustoće.

Dvije najbitnije činjenice su vrlo visoka vrijednost kapacitivnosti te mogućnost iznimno brzih punjenja i pražnjenja koji su posljedica vrlo niskog unutrašnjeg otpora. Kao prednosti ovakvih kondenzatora još se mogu navesti pouzdanost, dug životni vijek, jednostavno održavanje te mogućnost rada na različitim temperaturama i okruženjima. Ekološki su prihvatljivi i lako ih je neutralizirati ili reciklirati. Iznimno su učinkoviti (oko 90%) te su pogodni u slučajevima gdje postoji veliki broj kratkih punjenja i pražnjenja. No usprkos svemu, super-kondenzatori nisu pogodni za dugoročno skladištenje energije jer imaju visoku stopu samo-pražnjenja i visoke troškove ulaganja.

Od 1980. godine super-kondenzatori sudjeluju u širokoj primjeni te ih se može naći u energetske, ali i potrošačkoj elektronici. Kao jedna od novijih opcija korištenja ovih kondenzatora je primjena u električnim vozilima, gdje bi služili kao među-spremnici tijekom procesa ubrzanja i regenerativnog kočenja.



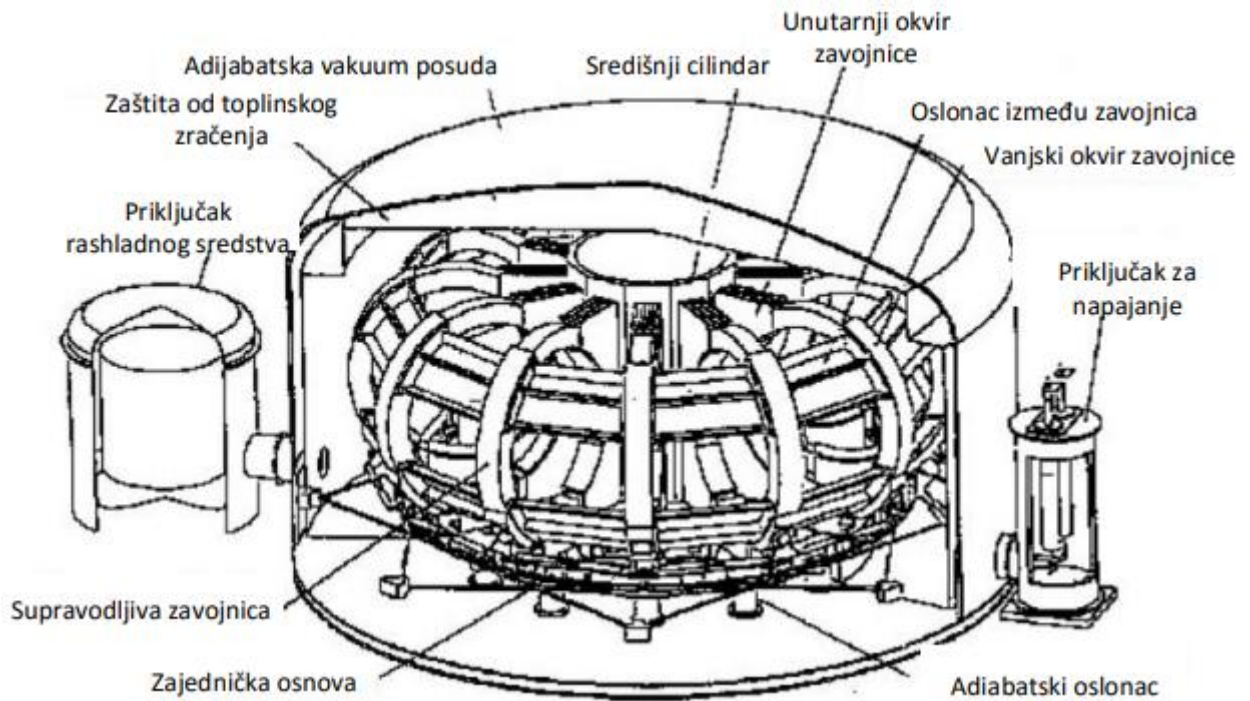
Slika 5.1. Super-kondenzator [17]

## 5.2. Supravodljivi magneti

Supravodljivi magneti rade na principu elektrodinamike. U supravodljivom svitku istosmjerna struja stvara magnetsko polje u kojem je energija pohranjena. Taj se svitak mora čuvati na temperaturi nižoj od njegove supravodljive kritične temperature. Nekada je ta temperatura iznosila 4 K (-269°C), no kroz razna istraživanja dokazano je da danas dostupni materijali mogu raditi i na oko 100 K (-173°C).

Ovo je jedina tehnologija gdje se električna energija direktno pretvara u struju i na taj način se postiže iznimna efikasnost čak do 97%. Također, ova tehnologija ima vrlo brzo vrijeme odziva što znači da je tražena snaga trenutno na raspolaganju. Svitak ne sadrži pokretne dijelove, a o rashladnom sustavu ovisi cjelokupna pouzdanost. To znači da je vrijeme pohrane energije neodređeno tako dugo dok je sustav hlađenja u funkciji, no zbog energetske potrebe rashladnog sustava ograničeno je duže vrijeme skladištenja. Iako nije raširen oblik pohrane, najčešće se koriste u proizvodnim pogonima kao oblik kontrole kvalitete električne energije.





*Slika 5.2. Dijelovi supravodljivog magnetskog svitka [16]*

## 6. ELEKTROKEMIJSKI SUSTAVI POHRANE ELEKTRIČNE ENERGIJE

Elektrokemijski sustav pohrane električne energije podrazumijeva pohranu električne energije u elektrokemijske spremnike tako da ju tijekom punjenja pretvori u kemijsku energiju, a prilikom pražnjenja se nazad pretvara u električnu energiju. Ovakav način pohranjivanja električne energije temelji se na elektrokemijskim reakcijama oksidacije i redukcije. Postoje tri vrste uređaja: primarne i sekundarne baterije te gorivi članci, odnosno ćelije. Razlika je u građi. Primarne i sekundarne baterije sastoje se od kemijskih komponenti koje su ugrađene, dok gorivi članci koriste sintetička goriva poput vodika. Najvažnija razlika između primarnih i sekundarnih baterija je to da se sekundarne baterije mogu puniti, za razliku od primarnih.

### 6.1. Baterije

Baterije su izrađene od naslaganih ćelija te se u njima kemijska energija pretvara u električnu i obrnuto. Željeni napon baterije kao i razina struje dobivaju se električnim povezivanjem stanica serijski i paralelno. Baterije su klasificirane u ovisnosti o njihovim energijskim i energetske kapacitetima. Kod većine tipova baterija, snaga i energetski kapacitet nisu neovisni te se popravljaju tijekom dizajniranja baterije. Neke od drugih važnih značajki baterija su učinkovitost, životni vijek, radna temperatura, granica pražnjenja (baterije se uglavnom ne isprazne do kraja te granica pražnjenja označava do kolike vrijednosti možemo isprazniti bateriju), samopražnjenje (neke baterije ne mogu zadržati svoj električni kapacitet kada su pohranjene te samopražnjenje označava brzinu pražnjenja), gustoća energije.

Trenutno se u području baterija odvija značajan razvoj tehnologije. Razvijaju se različite vrste baterija od kojih su neke komercijalno dostupne, dok su neke vrste još uvijek u eksperimentalnoj fazi. Baterije koje se koriste u elektroenergetskim sustavima su dubokog ciklusa (slične su onima koje se koriste u električnim vozilima) s energetske kapacitetom 17 - 40 MWh te imaju učinkovitost 70-80%. Postoje razni oblici baterijskih tehnologija te su neki prikladniji i koriste se u elektroenergetskom sustavu.



### 6.1.1. Olovne baterije

Olovne baterije spadaju u sekundarne vrste baterija, te su jedne od najstarijih, ali i najpoznatijih vrsta baterija. Danas ih je moguće naći u različitim oblicima i karakteristikama ovisno o primjeni. S obzirom na činjenicu da ovaj tip baterija ima već unaprijed određene veličine, u velikim energetske sustavima se koriste na način da se spoje serijski i/ili paralelno. Tako se može dobiti željena snaga i kapacitet.

Svaka ćelija olovne baterije sadrži pozitivnu elektrodu olovnog dioksida i negativnu elektrodu od spužvastog olova, odvojeno mikroporoznim materijalom i uronjeno u vodeni elektrolit sumporne kiseline (sadržan u plastičnom kućištu). Prednost ovakvih baterija je niska cijena i prilično visoka učinkovitost, no kratkog su vijeka trajanja te kod ekstremnih temperatura imaju loše performanse. Neke od poznatih izvedbi su VLA, VLRA i AGM baterije.



Slika 6.1. Olovno-kiselinska baterija [29]

### 6.1.2. Litij-ionske baterije

Ova vrsta baterija spada u suvremene tipove baterija. Gledano prema povijesti Li-Ion su bile prve litijske baterije koje su bile razvijene za upotrebu u prijenosnoj elektronici, no nakon većeg broja procesa u kojima su se punile i praznile postale su temperaturno nestabilne te su zbog toga bile izložene eksplozivnim reakcijama. Litij-ionske baterije su jako lagane, imaju značajno veći kapacitet naspram ostalih baterija te visok elektrokemijski potencijal. [3]

U posljednjih nekoliko godina litij-ionska tehnologija ostvaruje značajan napredak u primjeni kod stacionarnih spremnika električne energije. Ove baterije su veliku primjenu našle kod plug-in hibridnih električnih vozila i električnih vozila, kod kojih se koriste baterije sa kapacitetom od 15 do 20 kWh te do 50 kWh za električna vozila.



*Slika 6.2. Litij-ionska baterija [30]*

### 6.1.3. Nikal-kadmij i nikal-metal-hibrid baterije

Nikal-kadmij baterije (NiCd, Ni-Cd) spadaju u skupinu punjivih baterija te koriste nikal-oksidi hidroksid i metalni kadmij za elektrode. Nikal-kadmij baterije sa mokrim ćelijama izumljene se 1899. godine, a u komercijalnoj upotrebi se nalaze od 1915. godine. Napon tijekom pražnjenja je oko 1,2 V te on malo opada skoro do kraja pražnjenja. Ove baterije izrađuju se u širokom rasponu veličina i kapaciteta, od prijenosnih zatvorenih tipova koji se mogu zamijeniti sa suhim ugljično-cink ćelijama do velikih ventiliranih ćelija koje se koriste za napajanje u stanju mirovanja. U usporedbi sa drugim vrstama baterija koje se mogu puniti, ove imaju dobar životni ciklus i performanse na niskim temperaturama uz priličan kapacitet te su zbog toga bile prve baterije u široj upotrebi (kućanski uređaji i alati, medicinska oprema, videokamere).

Njihova najznačajnija prednost je sposobnost da isporuče svoj gotovo puni nazivni kapacitet pri visokim stopama pražnjenja (pražnjenje za jedan sat ili manje). Materijali potrebni za izradu ovih baterija su skuplji od materijala za olovno-kisele baterije, te ćelije imaju visoke stope samopražnjenja. Nikal-kadmij baterije imaju sposobnost rada na niskim temperaturama (od -20°C do -40°C) te su to jedine baterije koje imaju ovu mogućnost. Glavne mane ove vrste baterija su kemijski sastav koji je zbog kadmija toksičan, energija koju proizvedu nije visoka, a

izražen je i problem kristalizacije. Kako bi se spriječilo daljnje zagađivanje okoliša, ove se baterije polagano povlače iz upotrebe.

Kao zamjena za nikal-kadmij baterije uvode se nikal-metal-hibrid baterije. Iako imaju mnogo veću energetska gustoću u odnosu na nikal-kadmij baterije, maksimalna nazivna snaga nikal-metal-hibrid baterija je još uvijek oko deset puta manja. Nikal-metal-hibrid baterije zamijenile su litij-ionske baterije u mobilnim i prijenosnim sustavima, te se većinom koriste u današnjim hibridnim vozilima jer su vrlo robusne i mnogo sigurnije za razliku od litij-ionskih baterija.



*Slika 6.3. Nikal-kadmij baterije [32]*

## **6.2. Proizvodnja i skladištenje vodika**

Najmlađi sustavi koji se koriste za pohranu energije su postrojenja koja proizvode vodik. Vodik je kemijski element koji nema boje, mirisa ni okusa, nije otrovan te je lakši od zraka, no izuzetno je zapaljiv i eksplozivan. Najrašireniji je element u svemiru, dok ga na Zemlji ima samo u različitim spojevima. Da bi se proizveo čisti vodik, moguća su tri različita načina: može se izvlačiti iz fosilnih goriva, proizvoditi iz plinova iz rafinerija i metana te elektrolizom. U elektroenergetskom sustavu, elektroliza pronalazi svoju primjenu iz razloga što je mnogo veća učinkovitost takvog sustava u odnosu na ostale. Elektroliza se smatra ekološki čistom proizvodnjom zato što je nusprodukt proizvodnje, a i potrošnje voda (tj. vodik i kisik).

Kompresijom vodika moguće je spremati vodik u spremnike ili podzemne rezervoare tako da se vodik pretvara u tekući oblik pomoću hlađenja pod pritiskom i vezivanjem vodika za metale. Gorivim ćelijama se direktno pretvara elektrokemijska energija u električnu te se one koriste za proizvodnju električne energije iz vodika. Iz zraka se uzima kisik i vodik te se oni dovode do gorivih ćelija gdje se odvija kemijska reakcija. Prosječna učinkovitost ovakvog sustava

procijenjena je na otprilike 50%, no u usporedbi sa ostalim sustavima koji se koriste za pohranu energije to je neprihvatljivo.

Vodik ima veliku gustoću (gledano kao gorivo), te zbog toga, ali i ekološke prihvatljivosti te mogućnosti brzih prihvaćanja i otpuštanja velikih kapaciteta energije, može se očekivati porast korištenja vodika u energetici.

Korištenje postrojenja koja proizvode i pohranjuju vodik u mikromrežama ima određenu prednost u odnosu na preostale spremnike zato što se energija koja je proizvedena i pohranjena u vodiku ne mora biti iskorištena za transformaciju u električnu energiju, već se može iskoristiti kao pogonsko gorivo za vrijeme kada nije potrebna proizvodnja električne energije.

Prednost proizvodnje i skladištenja vodika je to što vodik ima veliku gustoću energije te se može iskoristiti za pohranu velikih količina energije, koja se može skladištiti čak do nekoliko mjeseci. Nedostatak ovog tipa pohrane je niska učinkovitost, velike mjere sigurnosti zbog eksplozivnosti te potreba nekog drugog uređaja za pohranu energije kako bi se proces pokrenuo.

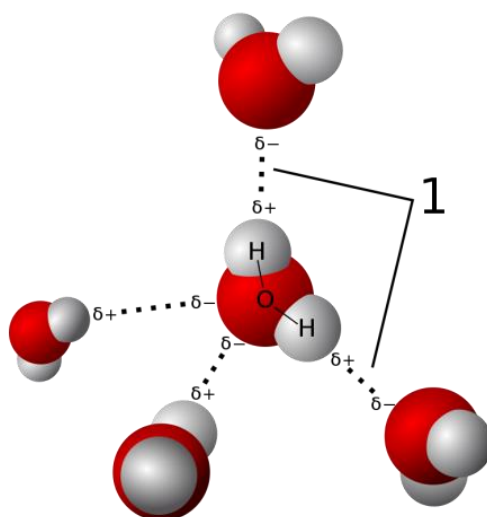
U Južnoj Koreji se nalazi najveće postrojenje sa gorivim člancima koje je priključeno na električnu mrežu, čija je nazivna snaga 58,8 MW, a sastoji se od 21 jedinice od kojih svaka ima 2,8MW.



*Slika 6.4. Najveće postrojenje sa gorivim člancima - Južna Koreja [31]*

## 7. PRIMJENA VODIKA

Jedan od najprisutnijih kemijskih elemenata u svemiru, a ujedno i najlakši element je vodik ( $H$ ). Također, poznat je i pod nazivom "gorivo budućnosti" zato što korištenjem u gorivom članku uz oslobađanje energije kao nusproizvod reakcije proizvodi vodu. Vodik se u svijetu velikim dijelom proizvodi parnim reformiranjem, parcijalnom oksidacijom i auto-termalnim reformiranjem prirodnog plina, a jako mali dio dolazi od plinofikacije biomase i elektrolize vode. Kao potencijalni pokretač energetske tranzicije te globalne dekarbonizacije zasigurno je "zeleni vodik". To je vodik koji je proizveden korištenjem obnovljivih izvora energije te je danas to tehnički moguće izvesti. Glavni razlog povećanja interesa za ovakvim oblikom opskrbe jesu niže cijene proizvodnje obnovljivih izvora energije.



Slika 7.1. Model vodikovih veza (1) kod molekula vode [20]

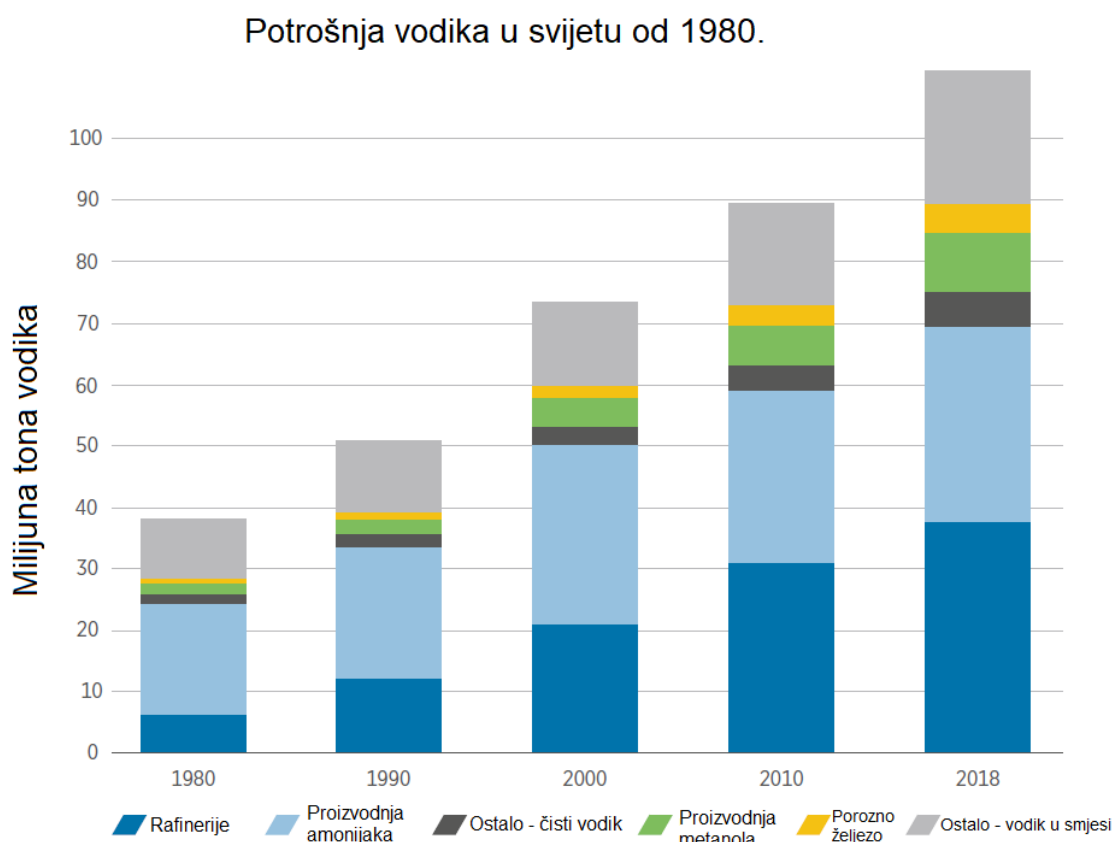
### 7.1. Svojstva vodika

Vodik je kemijski element bez boje, mirisa i okusa, nije otrovan, no na standardnom tlaku i temperaturi je izrazito zapaljiv. Kako ima najmanju gustoću, lakši je od zraka te se zbog toga podiže iz atmosfere te ga vrlo rijetko možemo pronaći u čistom molekularnom obliku. Kao gorivo, izgaranjem sa kisikom predstavlja gorivo koje ne sadrži štetne emisije. Zbog energije koja je oslobođena prilikom izgaranja vodika u zraku, tj. pri reakciji sa vodom, daje mu mogućnost da se koristi kao oblik goriva. Upotrebljiv je u gorivim člancima te u motorima s unutarnjim izgaranjem, a danas se koristi i u komercijalnim električnim vozilima sa gorivim

člancima kao što su automobili i autobusi. S obzirom da se mora proizvesti iz nekog primarnog oblika izvora energije poput prirodnog plina, ugljena ili pomoću obnovljivih izvora energije, zapravo se smatra prijenosnikom energije.

## 7.2. Proizvodnja i potrošnja vodika u svijetu

Danas je godišnje proizvedeno oko 120 milijuna tona vodika, dvije trećine otpadaju na čisti vodik, dok je jedna trećina mješavina sa drugim plinovima. To je oko 4% konačne potrošnje energije i ne-energetske potrošnje na globalnoj razini, prema statistici Međunarodne agencije za energiju (IEA). Od ukupnog proizvedenog vodika, oko 95% dolazi iz ugljena i prirodnog plina, dok samo 5% nastaje kao nusproizvod elektrolize u procesu proizvodnje klora. U industriji željeza i čelika koksni plin sadrži visoki udio vodika, a dio tog vodika se i obnavlja. U ovom trenutku ne postoji značajnija proizvodnja vodika iz obnovljivih izvora energije. No sve je izglednije da će se to uskoro promijeniti. Značajan dio vodika koji se danas proizvodi se upravo i iskorištava na licu mjesta u industriji. Dvije trećine upotrijebljenog vodika troši se na proizvodnju amonijaka i rafiniranje nafte u industriji. [21]



Slika 7.2. Trendovi korištenja vodika u razdoblju od 38 godina (1980.-2018.) [21]

Zbog strogih zakonskih regulativa koje se odnose na zaštitu okoliša, može se očekivat značajan porast potražnje za vodikom u sljedećim godinama s obzirom na njegova ekološki pozitivna svojstva. Kao posljedica na povećanu potražnju za dizelskim gorivom i rafinerijskom preradom (sve se više iskorištavaju rezidualne sirovine), povećala se i potražnja za vodikom. Kao značajniji procesi koji se sve više koriste u rafinerijama su hidrodesulfurizacija kojom se procesom odsumporavanja ulazne sirovine poput dizela, benzina i kerozina stvara sumporovodik koji se kasnije koristi u Clausovom procesu ili se koristi za dobivanje sumporne kiseline. Drugi proces je hidroizomerizacija koja se koristi za poboljšavanje svojstava goriva koje je proizvedeno, te procesi dearomatizacije i hidrokrekiranja koji isto koriste vodik. [22]

### **7.3. Zeleni vodik**

Kao što i samo ime govori, zeleni vodik proizveden je na održiv način, tj. nastao je korištenjem obnovljivih izvora energije. Da bi se to postiglo koriste se elektrolizatori, uređaji koji korištenjem električne energije razdvajaju molekule vode na kisik i vodik. Kada se energija korištena u tom procesu proizvede iz obnovljivih izvora, tada možemo reći da vodik postaje prijenosnikom obnovljive energije. Balansiranjem sustava u vrijeme niske proizvodnje elektrolizatori pomažu u integraciji varijabilnih obnovljivih izvora energije. Ključne tehnologije koje se koriste u proizvodnji zelenog vodika u stalnom su razvoju. Sa dodatnim ulaganjima u razvoj tih tehnologija, cijena proizvodnje će se spuštati te će možda u budućnosti moći konkurirati na tržištu. [22]

U nekim dijelovima svijeta već je započeto planiranje i izvođenje komercijalnih projekata, na primjer Kanada, Japan, zapadna Europa. Uglavnom se fokusira na područja gdje su potrebna minimalna ulaganja u nove infrastrukture, to jest u područja gdje postoji mogućnost iskorištavanja postojeće infrastrukture te također one u kojima se vodik pokazao kao najbolje rješenje za zadovoljavanje kriterija u pogledu klimatskih ciljeva. Početni projekti svoj fokus stavljaju na široku primjenu, odnosno na industriju poput petrokemijske i čelične, te na teški transport kao što su autobusi, kamioni, pomorski transport, avioni. Isto tako elektrogoriva, koja su proizvedena iz obnovljive energije mogu zamijeniti klasična fosilna goriva bez da se promijene tehnologije konačnih oblika trošila. Elektrogoriva su sintetska goriva temeljena na zelenom vodikom čijim se miješanjem u reaktoru sa ugljikovim dioksidom stvara sintetski plin koji zatim prelazi u tekuće stanje i dalje se rafinira na primjer stvarajući e-dizel ili e-kerozin.

Ovakva goriva se mogu miješati sa postojećim gorivima, no samo u određenim mjerama i to u motorima sa unutarnjim izgaranjem. [22]

Kako bi se privatne investicije potaknule u istraživanja, razvoj te izgradnju projekata potrebne su razvojne politike i zakonske regulative. U zakonskom okviru trebala bi se potaknuti potražnja za vodikom tako da se na primjer ograniče emisije te cijena njihovih naknada. Još jedan način su zakonske odredbe za uvođenje dijela obnovljivih izvora energije u industrijskoj potrošnji te bi se na taj način moglo opravdati ulaganje u zeleni vodik. Uz ovo je dakako potrebna i financijska potpora u obliku sufinanciranja ili smanjivanja poreza koja bi omogućila početne razlike u cijenama novog proizvoda koja će u početku biti zasigurno viša u odnosu na cijenu energenata koji već postoje na tržištu. [22]

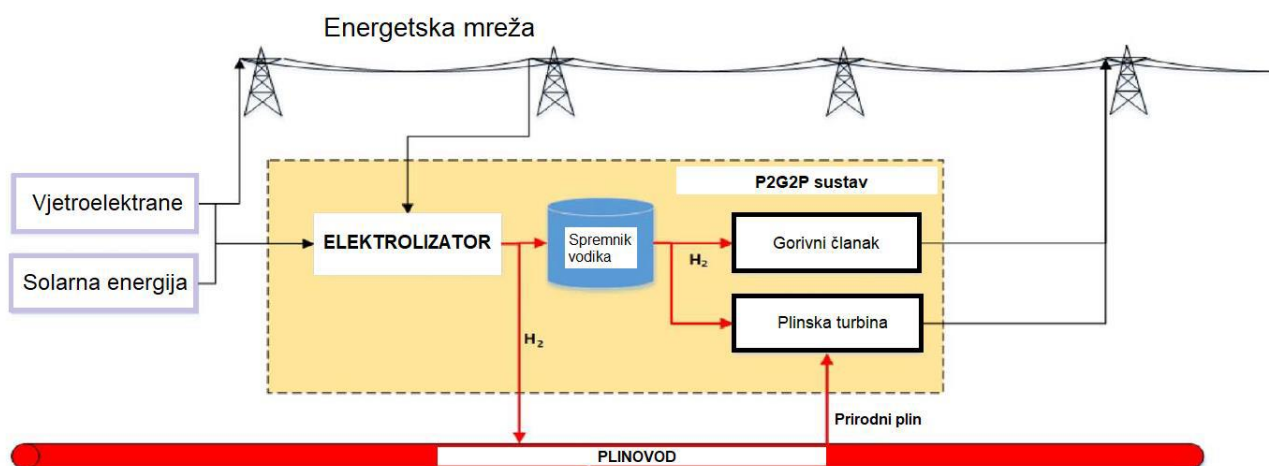
#### **7.4. Integracija vodika u energetska sustav**

Gledano na globalnoj razini, vodik postepeno povećava svoju ulogu u energetska tranziciji, te se očekuje da u bližoj budućnosti njegova primjena značajno poraste ponajviše zbog mogućnosti njegova iskorištavanja na različite načine. Iako već postoje zrele tehnologije u kojima se vodik primjenjuje (poput proizvodnje amonijaka, metanola te u rafinerijama), svoju ulogu pronalazi i u transportnom sustavu, točnije u vozilima koja su pogonjena gorivim člancima kao što su automobili, autobusi, kamioni, vlakovi, radni strojevi. Još jedna primjena su avioni gdje služi kao sredstvo kojim se pogoni električni sustav aviona te u pomoćne energetske jedinice. [22]

##### **7.4.1. P2G2P (eng. Power-to-Gas-to-Power)**

Vodik, kao prijenosnik energije ima mogućnost korištenja u sustavima pohrane energije. Primarno se to odnosi na P2G2P sustave (eng. *Power-to-Gas-to-Power*) koji su još poznati kao P2P (eng. *Power-to-Power*). Oni kao komponenta za pretvaranje primarne energije koriste elektrolizatore te gorive članke, kojima je karakteristika brzo odzivno balansiranje energije u sustavu. Ovakvi sustavi smatrani su potencijalnim oblikom za skladištenje obnovljive energije.





Slika 7.3. Jednostavna shema P2G2P sustava [23]

Power-to-Gas-to-Power postrojenja, kao što samo ime govori pretvaraju električnu energiju u plinsko gorivo, tj. vodik, te se on pohranjuje ili dalje transportira za proizvodnju električne energije. Ova tehnologija svoju upotrebu pronalazi u pohrani viška energije koja je proizvedena iz obnovljivih izvora (najčešće su to fotonaponske ćelije i vjetroelektrane) te se kasnije ta energije može koristiti u razdobljima visoke potražnje u elektroenergetskoj mreži. Takav sustav može biti iskorišten lokalno te se može spojiti na glavnu distribucijsku mrežu.

Kao glavne elemente ovog sustava možemo navesti:

- elektrolizatori - jedinice u kojima se odvija elektroliza vode, najčešće se koriste alkalni i PEM elektrolizatori
- objekti za skladištenje plina - kriogeni spremnici, spremnici plina koji su pod tlakom
- generator električne energije - plinska turbina ili PEM gorivi članak

Vjetroelektrane i fotonaponske ćelije nemaju stabilnu proizvodnju električne energije zato što ovise o prirodnim pojavama, vjetru i suncu, te se može samo okvirno odrediti kolika će biti njihova proizvodnja na temelju dosadašnjih podataka o proizvodnji, pa se sve veći fokus stavlja na korištenje P2G2P sustava. Iako je njihov udio u proizvodnji električne energije 2018.g. iznosio samo oko 10%, svake godine se njihov ukupni instalirani kapacitet sve više povećava.

Pilot projekti koji se koriste P2G2P sustavom kao oblikom pohrane imaju prilično nisku korisnost, do 40%. Razlog tome su dva procesa energetske transformacije, mala učinkovitost gorivih članaka, ali i značajna pomoćna snaga koja se koristi u P2G2P sustavima. Uređaji koji se

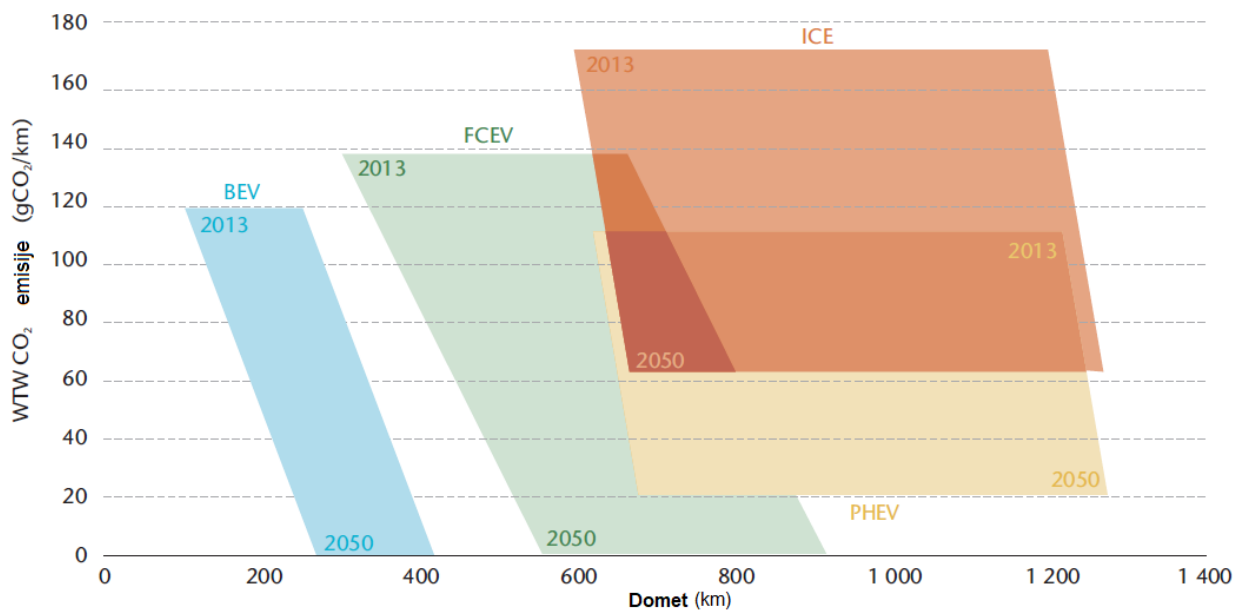
koriste nisu cjenovno pristupačni te su kratkog vijeka trajanja što cijelu investiciju ne čini baš povoljnom. Potrebno je provesti detaljnu tehno-ekonomsku analizu zasebno za svaki slučaj kako bi se pronašlo najbolje rješenje. Također, potrebna su i daljnja istraživanja i razvoj koja se ponajviše fokusiraju na povećanje učinkovitosti ovakvog tipa sustava.

BIG HIT (*eng. Building Innovative Green Hydrogen Systems in an Isolated Territory*) je demonstracijski projekt realiziran na škotskom otočju Orkney na čijem se prostoru nalaze vjetroelektrane i plimne elektrane čiji je zajednički nazivni kapacitet 50 MW, a godišnja proizvodnja energije 46 GWh.

#### 7.4.2. Primjena vodika u transportnom sektoru

Činjenica da se potražnja energije u svim sektorima značajno povećala u odnosu na prije 30, 40 godina, ali i sve veće ekološke probleme, svijet je primoran na velike promjene. Jedan od načina je dekarbonizacija cestovnog transporta koji uključuje održiva goriva i nove vrste pogona vozila.

Električna vozila sa gorivim člancima (*eng. Fuel Cell Electric Vehicles - FCEV*) za generiranje pokretne snage koriste vodik koji je spremljen u tlačnom spremniku. Da bi se optimizirala potrošnja i pokrila vršna potrošnja energije u vozilu koristi se električna struja koja nastaje rekuperacijom energije kočenja i pohranjuje se u bateriji. Potrošnja vodika kao goriva je do sada izmjerena na oko 1kg za 100 prijeđenih kilometara, a današnja vozila na ovakav pogon mogu preći do 650 km. Kako su ovakva vozila jako slična konvencionalnima, mogu se bez većih poteškoća zamijeniti te pritom emitirati mnogo manje stakleničkih plinova.



**Napomena:** Gornja granica emisija za BEV (*engl. Battery Electric Vehicle*) vozila uzima u obzir današnji svjetski prosječni energetska miks, dok se donja granica bazira na 100% obnovljivim izvorima energije. Gornja granica emisija FCEV (*engl. Fuel Cell Electric Vehicle*) vozila uzima u obzir 90%-tnu proizvodnju vodika iz parnog reformiranja prirodnog plina, dok se donja granica bazira na 100% zelenom vodik. Donja granica emisija PHEV (*engl. Plug-In Hybrid Vehicle*) vozila uzima u obzir 65% zastupljenosti električnih vozila na cesti do 2050. godine, te 30% zastupljenosti biogoriva za ICE (*engl. Internal Combustion Engine*) i PHEV vozila.

Slika 7.4. Emisije različitih vrsta pogona vozila u odnosu na domot vozila [23]

U usporedbi sa klasičnim, cijene ovakvih vozila su značajno više, najviše zbog visoke cijene gorivog članka. Međutim, ulažu se veliki naponi te postoji potencijal da se te cijene u neko dogledno vrijeme smanje te vozila ovog tipa budu cjenovno pristupačnija svima. Na komercijalnom tržištu postoji vrlo mali broj vozila sa pogonom na gorivi članak, te ih se može naći samo u određenim zemljama. Može se pretpostaviti da je svaki poznatiji proizvođač automobila kroz svoju povijest imao u nekom trenutku ideju o razvoju vozila pogonjenih vodikom, no zbog visokih cijena i manjka infrastrukture taj je razvoj naišao na probleme i zastoje te u velikoj većini slučajeva nije nastavljen.

## 8. BATERIJSKI SPREMNICI ELEKTRIČNE ENERGIJE

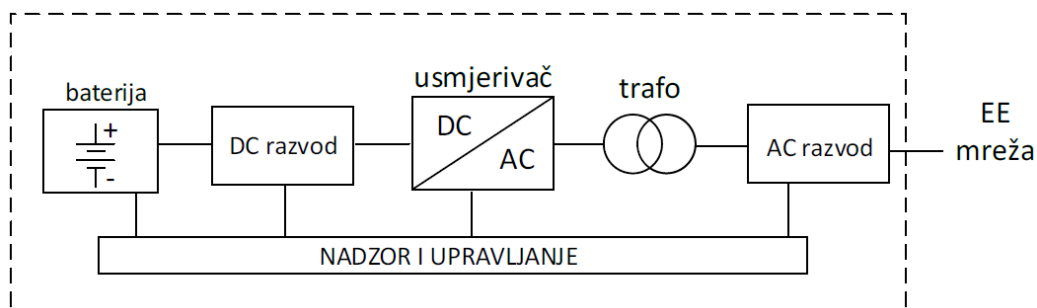
Zbog rastuće integracije obnovljivih izvora energije u distribucijske mreže te sve veći udio električnih automobila, operatori distribucijskih sustava primorani su pronaći načine za prilagodbu navedenim trendovima. To je moguće tako da se investira u razvoj distribucijske mreže, a kao ključan element može se navesti ugradnja spremnika električne energije koji omogućavaju bolju pouzdanost i sigurnost sustava.

Karakteristike baterijskih spremnika električne energije [25]:

- Energija spremnika - umnožak struje, napona i vremena pražnjenja spremnika
- Snaga spremnika - umnožak struje i napona pražnjenja spremnika
- Kapacitet spremnika električne energije - najviša vrijednost energije koja se može pohraniti u sustavu [Wh]
- Učinkovitost sustava za pohranu električne energije ( $\eta$ ) - postotni omjer između električne energije koja je predana sustavu za vrijeme pohrane energije i električne energije predane mreži za vrijeme pražnjenja sustava; može se povećati ako se smanje gubici punjenja, gubici pražnjenja i gubici samopražnjenja
- Vrijeme odziva sustava za pohranu energije - vrijeme koje je mjereno od trenutka kada sustav dobije nalog za pražnjenje skladišta energije do uspostave nazivne snage pražnjenja
- Životni vijek sustava za pohranu energije - izražava se preko broja ciklusa punjenja-pražnjenja koje može odraditi za vrijeme svog životnog ciklusa
- Troškovi su izraženi u  $\text{€(kn)/kW}$

Baterijski sustavi za pohranu električne energije (BSPEE) građeni su od nekoliko bitnih jedinica:

1. akumulatorske baterije
2. usmjerivači - ispravljači i izmjenjivači
3. sustav za nadzor i upravljanje BSPEE
4. ostala oprema - građevinsko zemljište, kontejneri ili zgrade za izgradnju opreme, električna oprema, itd.



Slika 8.1. Blok shema BSPEE [25]

## 8.1. Akumulatorske baterije

Najvažnija komponenta baterijskih postrojenja su akumulatorske baterije te one čine 20-50% cijene cijelog postrojenja. U njima se višak električne energije pretvara u potencijalnu kemijsku energiju. Akumulatorske baterije koje se koriste u velikim baterijskim postrojenjima, mogu se podijeliti u dvije grupe - obične stacionarne akumulatorske baterije i baterija sa cirkulirajućim elektrolitom. U primjeni su trenutno najzastupljenije litij-ionske baterije. Zbog velike gustoće energije moguće ih je postaviti u malim prostorima, a brz razvoj omogućuje stalni pad cijene.

Tablica 8.1. Karakteristike nekih akumulatorskih baterija [25]

| Karakteristika                 | Olovne    | NiCd      | Li-ion    | NaS         |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| <b>TEHNIČKE KARAKTERISTIKE</b> |           |           |           |             |
| Dugotrajnost                   | ≤ 20 god. | 20+ god.  | ≤ 10 god. | ≤ 15 god.   |
| Broj ciklusa (DoD 80%)         | 200-1000  | 1000-3500 | 1000-2000 | 4000-5000   |
| Gustoća energije (Wh/kg)       | 15-40     | 15-40     | 70-250    | 100-120     |
| Nazivni napon članka (V)       | 2         | 1,2       | 2,4-3,7   | 2           |
| Korisnost                      | 70-82     | 60-70     | > 90      | 80-90       |
| Vrijeme punjenja/praznjenja    | 5/1       | 1/1       | 1/1       | 1/1         |
| Vrijeme odziva                 | < 1 ms    | < 1 ms    | < 1 ms    | 5 ms        |
| Samopražnjenje (%/dan)         | 0,033-0,3 | 0,067-0,6 | ≤ 0,1     | 0 (?)       |
| Radna temperatura (°C)         | -10 - +40 | -40 - +50 | -20 - +60 | +310 - +350 |
| Pogodne za snagu (MW)          | ≤ 10      | < 30      | ≤ 2       | ≤ 50        |
| Duljina pražnjenja             | do 5 h    | < 1 h     | ≤ 2 h     | 2-8 h       |
| <b>TROŠKOVI</b>                |           |           |           |             |
| Cijena baterije (€/kW)         | 100-500   | 400-900   | 150-1000  | 3000-4000   |
| Cijena baterije (€/kWh)        | 100-200   | 450-1100  | 700-1300  | 400-600     |

## 8.2. Usmjerivači

Usmjerivači služe za pretvaranje izmjeničnog napona u istosmjerni tijekom punjenja akumulatorskih baterija, ali i za obrnuti proces, pretvaranje istosmjernog u izmjenični kada se akumulatorska baterija prazni. Drugim riječima, mogu raditi kao ispravljači ili izmjenjivači ovisno o tome u kojem režimu rade. Njihova cijena može iznositi 15-40 % cijene cijelog postrojenja.

Njihove funkcije kao dio BSPEE su [25]:

- pohranjivanje električne energije u akumulatorskim baterijama
- kontrolirano napajanje elektroenergetskog sustava iz akumulatorskih baterija
- kompenzacija jalove snage na mjestu izmjeničnog priključka usmjerivača
- naponska podrška injektiranjem radne i jalove snage
- omogućavanje komunikacije s nadređenim sustavom upravljanja – BSPEE

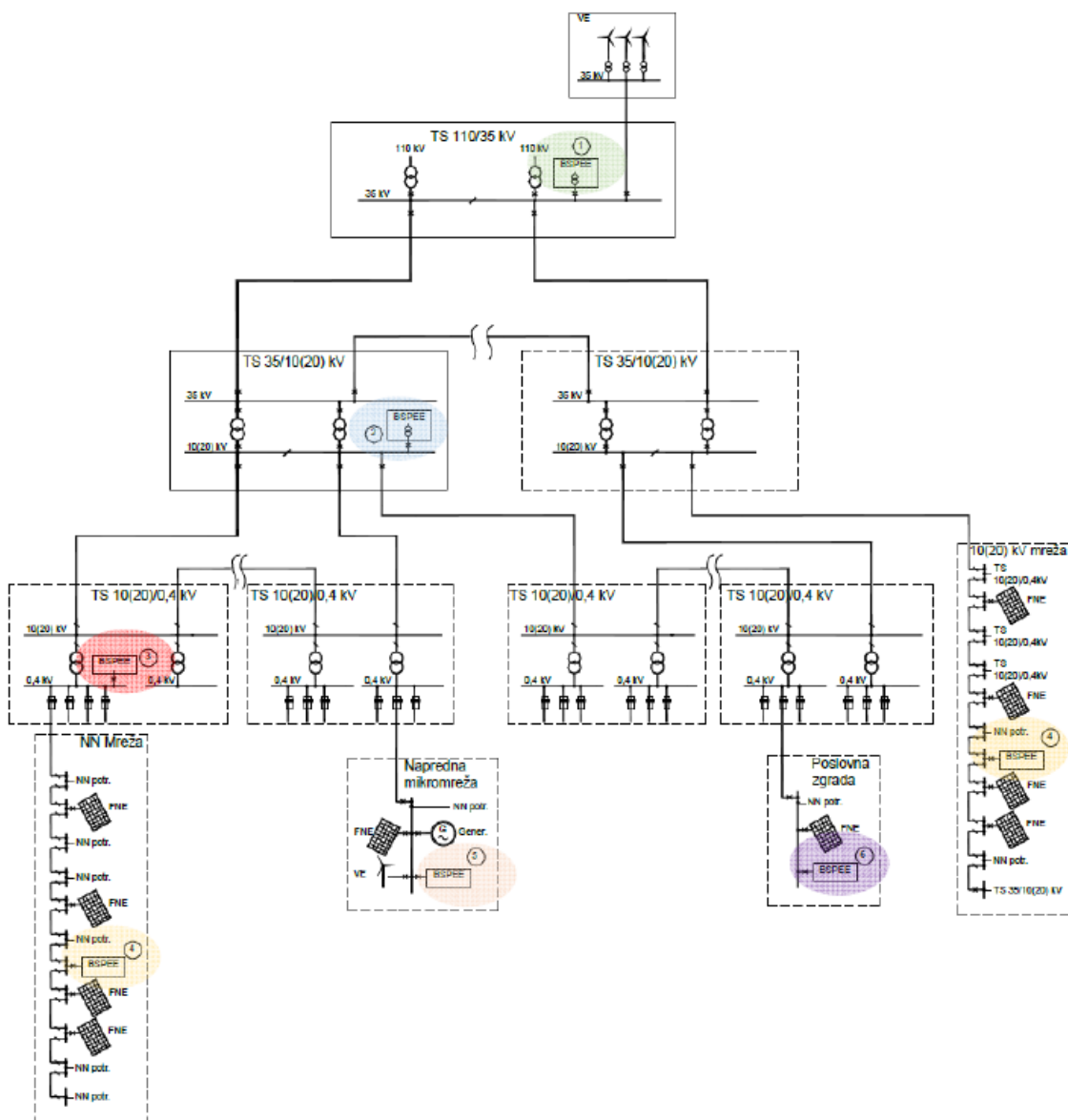
## 8.3. Moguće primjene baterijskih sustava za pohranu električne energije

Na slici (Slika 8.2.) prikazana su mjesta na kojima je moguća ugradnja baterijskih sustava za pohranu električne energije (BSPEE), no ovisno o mjestu na kojem se ugrađuje, mijenja se i njegova primjena [25]:

- broj 1 (zeleno) BSPEE je priključen u TS 110/35 kV, na mjestu priključenja vjetroelektrane na 35 kV sabirnicama, koji sudjeluje u reguliranju električne energije koja je isporučena kroz izlaznu snagu, može pružiti vremensko optimiranje proizvodnje i smanjenje potrebe za isključenjem vjetroelektrane, dodatno može pružiti regulaciju napona i frekvencije te kompenzaciju jalove snage
- broj 2 (plavo) BSPEE je spojen na 10 (20) kV sabirnice u TS, za primarnu funkciju koristi se smanjivanje vršnog opterećenja TS te posljedično dovodi do odgode ili eliminacije potrebe da se izgradi nova distribucijska mreža, radi promjenjivosti područja s vršnim opterećenjem kroz cijelu godinu postoji mogućnost ugrađivanja mobilnih BSPEE-ova koji se mogu premještati po lokacijama
- broj 3 (crveno) BSPEE je spojen na 0,4 kV sabirnice u TS, na toj se poziciji većinom koristi kada je priključen velik broj distribuiranih izvora električne energije na

niskonaponsku mrežu pri čemu dolazi do promjene tokova snage prema SN mreži kada je velika proizvodnja, a mala potrošnja

- broj 4 (žuto) BSPEE je spojen na niskonaponski izvod distribucijske mreže zajedno sa proizvođačima i potrošačima u svrhu reguliranja napona
- broj 5 (narančasto) BSPEE je spojen na naprednu mikromrežu s ciljem ostvarivanja autonomije mikromreže
- broj 6 (ljubičasto) BSPEE je priključen na niskonaponski razvod koji napaja poslovne zgrade zbog aktivnog sudjelovanja potrošača u radu elektroenergetskog sustava - upravljanje opterećenjem potrošnje



Slika 8.2. Moguća mjesta ugradnje BSPEE [25]

## 9. ULOGA SPREMNIKA ENERGIJE U ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU

Spremnici energije imaju sposobnost da odgovore na veliki broj mrežnih zahtjeva to jest pomoćnih usluga. Te pomoćne usluge su: upravljanje zagušenjima koja se događaju u mreži, dnevno uravnoteženje tako da se izravna dnevni dijagram opterećenja, frekvencijska stabilnost (koja može biti primarna, sekundarna i tercijarna rezerva), naponska stabilnost (prijenosna i distribucijska stabilizacija), pomoć prilikom izvanrednih okolnosti kao što je start u uvjetima kada je mreža raspadnuta (eng. *black-start*) te upravljanje potrošnjom [10].

U pogledu vlasništva, spremnici se mogu podijeliti u dvije skupine. Prva skupina su oni kojima je vlasnik operator sustava, dok u drugu skupinu spadaju oni spremnici kojima su vlasnici privatni investitori.

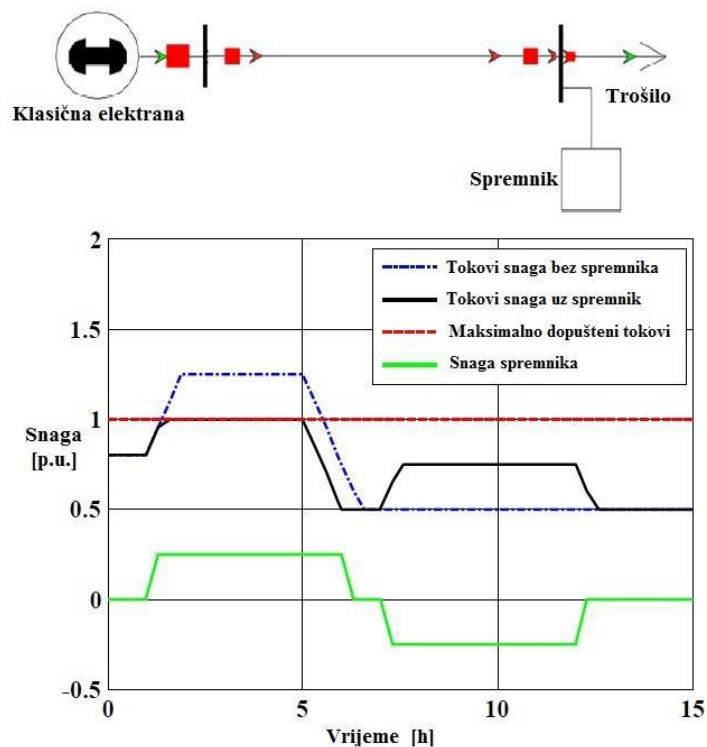
### 9.1. Upravljanje zagušenjima u mreži

Stanje u prijenosnom sustavu kod kojeg se pogon odvija na granici jednog ograničenja ili više njih naziva se zagušenje u mreži. Kod takvih pogonskih stanja operator prijenosnog sustava primjenjuje mjere pomoću kojih se fizički upravlja zagušenjima. U takvim slučajevima koriste se elementi vlastite mreže koji su operatoru na raspolaganju kao što je promjena uklopnog stanja elemenata mreže, promjena preklopke transformatora sa opcijom zakretanja kuta napona. Još jedna mogućnost je da operator daje nalog elektranama da se promijeni proizvodnja, tj. da se napravi preraspodjela proizvodnje. Kao posljedica obiju mjera javlja se promjena tokova snaga, čime dolazi do rasterećivanja dijelova mreže koji su ugroženi. Da bi se rasteretio ugroženi element mreže ili dio mreže gdje je nastalo zagušenje, koriste se spremnici energije da se dio energije spremi u njima, a nakon što je opasnost od zagušenja smanjena ili otklonjena, ta spremljena energija se dalje predaje u mrežu.

Smanjenje opterećenja dalekovoda koji je privremeno preopterećen tokovima snaga koji su iznad maksimalno dopuštenih vrijednosti je zapravo cilj upravljanja zagušenjem u EES-u. Kao važno sredstvo u sprječavanju zagušenja imaju sustavi za skladištenje energije, a razlog tome je njihova reverzibilnost. Slika 9.1. prikazuje princip uporabe sustava za skladištenje energije prilikom pojave zagušenja. Dalekovod je preopterećen te to iznosi 125% zbog povećanja zahtjeva potrošača, u vremenskom razdoblju od 2:00 do 5:00. Kako bi se smanjilo opterećenje na



dalekovodu, spremnik injektira električnu energiju za vrijeme razdoblja kada je potrošnja velika, te se puni kada je energija kroz dalekovod minimalna. [20]



Slika 9.1. Princip korištenja sustava za skladištenje električne energije kod zagušenja [1]

## 9.2. Dnevno uravnoteženje - izravnavanje dnevnog dijagrama opterećenja

Da bi se omogućilo dnevno uravnoteženje elektroenergetskog sustava, tj. da bi se izravnao dnevni dijagram opterećenja, koriste se baterijski spremnici energije. To znači da se za vrijeme kada je opterećenje nisko, električna energija skladišti u spremnicima, a tijekom razdoblja vršnog opterećenja ti spremnici se prazne i predaju tu spremljenu energiju u mrežu. Da bi maksimizirali svoju dobit spremnici energije dio su tržišta energije prema slijedećoj funkciji cilja (9.1.):

$$\text{Maximize } \sum_{t=1}^T \alpha(t) (q^{dis}(t) - q^{ch}(t)) \quad (9.1.)$$

gdje je:

$\alpha(t)$  - tržišna cijena

$q^{dis}(t)$  - količina električne energije kojom se spremnik prazni

$q^{ch}(t)$  - količina električne energije kojom se spremnik puni

Ovim načinom smanjuju se troškovi pogona elektroenergetskog sustava jer je izbjegnuta proizvodnja električne energije iz skupocjenih vršnih elektrana. Smanjenje broja gašenja termoelektrana koje imaju visok tehnički minimum postiže se povećanjem minimalne potrošnje u sustavu.

### **9.3. Frekvencijska stabilnost - primarna, sekundarna i tercijarna rezerva**

U slučaju kada postoji određena neravnoteža između proizvodnje i potrošnje električne energije, spremnici energije imaju mogućnosti da doprinesu stabilnosti frekvencije. Također, u sustavu postoje i agregati kojima je odziv sporiji. Kod sustava gdje je značajan iznos instaliranog kapaciteta vjetroelektrana, može doći do rasta ili pada frekvencije sustava ukoliko je promjena njihove proizvodnje nagla. Operator sustava vrši nadzor nad radom elektroenergetskog sustava te u slučaju promjene izdaje zahtjev za aktiviranjem tercijarne rezerve. Sekundarna rezerva za to vrijeme automatski korigira nepravilnosti u sustavu prema stanju koje se nalazi na razmjeni, tj. na granicama sustava gdje on graniči sa susjednim graničnim elektroenergetskim sustavima. Kod takvih događaja baterijski spremnici imaju bitnu ulogu te pružaju značajnu pomoć zbog brzog odziva koji imaju. U svijetu se već duže vrijeme koriste reverzibilne hidroelektrane za ovakvu vrstu pomoćne usluge, a zadnjih godina njihova instalirana snaga raste u cilju omogućavanja stabilnosti fleksibilnijeg sustava.

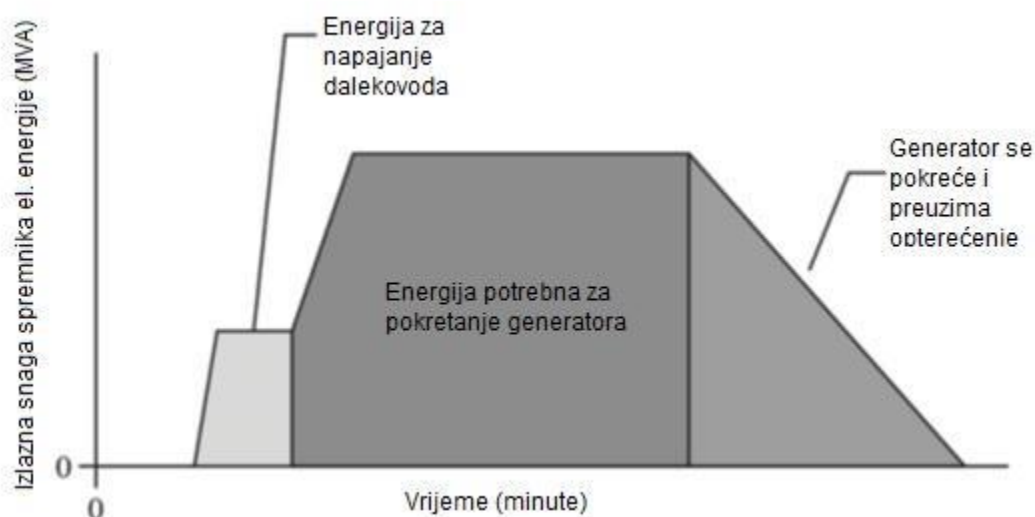
### **9.4. Naponska stabilnost - prijenosna i distribucijska stabilnost**

Stanje sustava gdje se tijekom normalnog pogona ili nakon nekog poremećaja napon održava unutar normalnih granica klasificira se kao naponska stabilnost sustava. Pojavljivanje poremećaja u sustavu uvjetovano je izostankom isporuke dovoljne količine jalove energije u elektroenergetski sustav. Kao posljedica dolazi do propada napona ili u najgorem slučaju do sloma napona sustava.

Baterijski spremnici energije zbog svoje lokacijske fleksibilnosti imaju mogućnost pomoći elektroenergetskom sustavu tijekom razdoblja poremećene naponske stabilnosti tako da injektiraju, tj. apsorbiraju snagu za što je potreban i vrlo brz odziv spremnika.

## 9.5. Start u uvjetima raspada mreže - crni start (eng. black-start)

Ako za pokretanje nema potrebe za vanjskim napajanjem, proizvodne jedinice imaju mogućnost pružanja pomoćne usluge crnog starta. Na taj način te proizvodne jedinice nude pomoć ostalima da podignu proizvodnju i uključe se na mrežu. Spremnici energije mogu pružati ovakvu pomoćnu uslugu iz razloga što u kratkom vremenskom roku mogu dati značajan postotak vlastite instalirane snage.



Slika 9.2. Izlazna snaga spremnika pri beznaponskom startu [17]

Kako bi se nastavilo nesmetano napajanje potrošača nakon događaja koji su doveli do isključenja ili sloma elektroenergetskog sustava, operator mora ponovo pokrenuti mrežu. Da bi se to moglo napraviti, operator se koristi proizvodnim elektranama koje imaju mogućnost pokretanja bez mreže (crni start) ili elektranama koje su usprkos tih događaja i tijekom njih uspješno nastavile sa radom (otočni rad). Da bi uređaji za skladištenje električne energije doprinijeli oporavku mreže, potrebno je da ispunjavaju određene zahtjeve: [1]

- kontrola prijelaznog stanja nastalog prebacivanjem blokova opterećenja - sustav za skladištenje električne energije treba injektirati snagu koja minimalno iznosi 5-10% neto kontinuirane snage,
- stabilizacija odvojene mreže neovisno o zahtijevanoj razini snage od strane trošila - sustav za skladištenje mora omogućavati rad u širokom rasponu snage, posebice za vrijeme niskih razina snage i održavati rad na ovim razinama,

- očuvanje globalne ravnoteže između ponude i potražnje, treba obratiti pozornost na frekvenciju koja mora biti unutar prihvatljivih granica - na zahtjev operatora prijenosnog sustava, sustav za skladištenje mora dati podatke o frekvenciji izolirane mreže toliko dugo dok ima pristup rezervama snage
- održavanje stabilnog rada bez oscilacija napona ili frekvencije - potrebni su odgovarajući regulatori brzine i napona u sustavu
- kontrola prenapona koji se pojavljuju kod ponovnog povezivanja dijelova mreže

## 10. PRIMJER BATERIJSKOG SPREMNIKA U SN MREŽAMA

Kako bi se smanjile razlike između vršnog i baznog opterećenja na otocima te povećala sigurnost opskrbe, u elektroenergetski sustav otoka instaliraju se spremnici energije. U popularnim turističkim središtima razlike između vršnog i baznog opterećenja izrazito su visoke za vrijeme turističke sezone iz razloga što dolazi do značajnog porasta potrošnje električne energije u odnosu na period izvan sezone kada je potrošnja značajno niža. Kako se samo dimenzioniranje elektroenergetske mreže radi prema potencijalno najvišem ostvarivom opterećenju, mreža je većinskim dijelom godine podopterećena. Baterijski spremnici energije imaju mogućnost smanjivanja neto vršnog opterećenja tijekom sezone, te bi se na taj način smanjila ulaganja u novu infrastrukturu, to jest povećala bi se učinkovitost već postojeće. S obzirom na sve veći broj klima uređaja i punionica za električna vozila, očekuje se još veći porast vršnog opterećenja i u nadolazećim godinama.

Kada se govori o velikim sunčanim elektranama na otoku, razlike baznih i vršnih opterećenja mogu postati još i veće zato što se stvarna potrošnja umanjena za lokalnu proizvodnju smanjuje za vrijeme sunčanog dana, no kada sunce zađe, ljudska aktivnost je još uvijek prilično velika ili se i povećava, a sukladno tome neto potrošnja ostaje visoka ili se isto tako dodatno povećava. Ukoliko se koristi baterijski spremnik odgovarajućeg kapaciteta, moguće je barem tijekom jednog dijela godine osigurati opskrbu električnom energijom isključivo iz obnovljivih izvora energije.

Baterijski spremnici, osim doprinosa mrežnoj infrastrukturi, mogu u sklopu bilančne grupe trgovati na tržištu električne energije, prodavati je po višoj cijeni, a kupovati po nižoj, te generirati prihode kroz arbitražu električne energije. Također baterijski spremnici mogu dio vlastitog kapaciteta iskoristiti za pružanje uravnoteženja i drugim bilančnim grupama.

Baterijski spremnici imaju vrlo brz odziv te zbog toga imaju mogućnost dodatnog sudjelovanja u nekim uslugama koje su pružene operatoru prijenosnog sustava (regulacija frekvencije, crni start, otočni pogon, itd.). Crni start omogućava napajanje dijela mreže nakon kvara kako bi se sustav vratio u normalni pogon. Kod otočnog pogona moguća je regulacija frekvencije i napona korištenjem baterijskog spremnika da bi lokalna mreža mogla ostati u pogonu i nakon ispada glavne mreže. U jednom i drugom slučaju korišteni baterijski pretvarači moraju biti građeni kao mrežno stvarajući elementi.

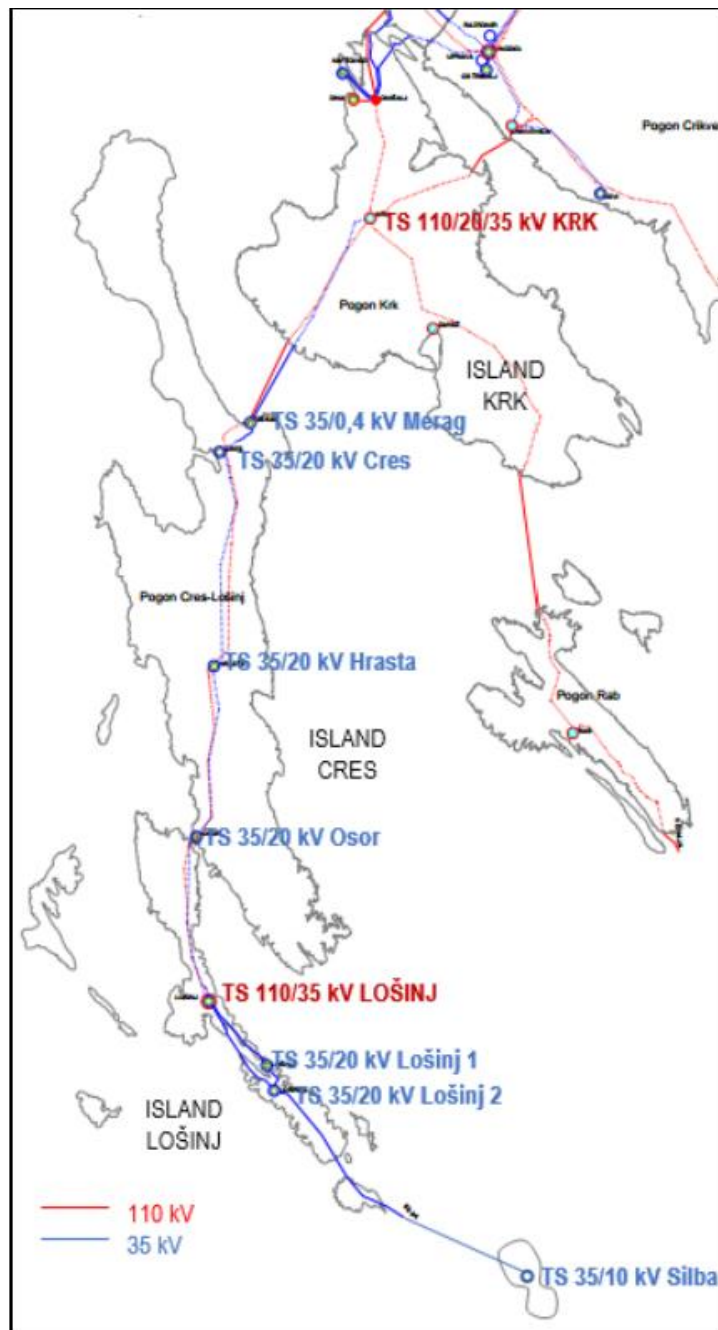
Osim neravnoteže u pogledu djelatne snage, otočni pogon je vrlo osjetljiv i na naponske oscilacije kao posljedica slabe povezanosti sa čvrstom mrežom. Razlog tome su također velike razlike u neto opterećenju. Spremnici energije mogu promjenom radne točke vrlo brzo utjecati i na napone. To dolazi do izražaja ako pretvarači imaju mogućnost rada u sva četiri kvadranta i na zahtjev injektirati ili preuzimati jalovu energiju. [19]

### **10.1. BSPEE Mali Lošinj**

Smještaj baterijskog spremnika određen je temeljem potrebe osiguravanja rezervnog napajanja u slučaju ispada DV 110 kV Krk - Lošinj u vrijeme kada se svi korisnici sa otoka Cresa i Lošinja napajaju iz TS 110/35/20 kV Krk po 35 kV naponskoj razini. Pogon je promatran za vrijeme turističke sezone (vršna sezona) i razdoblja umjereno visoke potrošnje. Postojeća distribuirana proizvodnja je obuhvaćena mjerenjima u 35/x kV stanicama, dok je utjecaj planiranih velikih sunčanih elektrana koje su priključene na 35 kV naponsku razinu ocijenjen njihovim uključivanjem i isključivanjem.

Izgradnja baterijskih sustava predviđena je na otocima Lošinj i Cres. Ugrađivanjem baterije na Cresu omogućava se optimiranje prihvata proizvodnje iz sunčanih elektrana koje su na otoku te bolje upravljanje sa naponima na otoku, smanjivanje vršnih opterećenja opreme, smanjenje gubitaka i potencijalno autonomni pogon otoka nekad u budućnosti.

Instalirani kapaciteti baterija moraju biti minimalno 7,7 MWh u SE Cres te 26,5 MWh u TS Lošinj. [19]



Slika 10.1. 110 kV i 35 kV mreža koja napaja otok Cres i otok Lošinj [18]

Kako bi se poboljšale naponske prilike na otoku Cresu i Lošinj, napravljen je idejni projekt u kojem će se u TS 110/35 kV Lošinj ugraditi postrojenje za poboljšanje naponskih prilika. To će se realizirati ugradnjom baterijskog spremnika za pohranu električne energije ukupno pohranjene energije 26,5 MWh te najviše snage punjenja i pražnjenja od 13 MW. U projektnom zadatku je razmatrana opcija smještaja novog postrojenja u kontejnere, no zbog veličine prostora koju bi oni zauzeli te raznih propisa koji se moraju poštivati (dodatan razmak između kontejnera baterija od minimalno 3 metra), odlučeno je da je bolja opcija postavljanje novog postrojenja u zidanu

zgradu. Također, zbog izuzetno jake posolice koja je prisutna na području na kojem je TS 110/35 kV Lošinj, troškovi ugradnje ionako već skupih kontejnera bi dodatno porasli. Zidana zgrada pruža bolju zaštitu te daje mogućnost etažnog smještaja opreme što dodatno smanjuje prostorno zauzimanje postojeće parcele. [19]

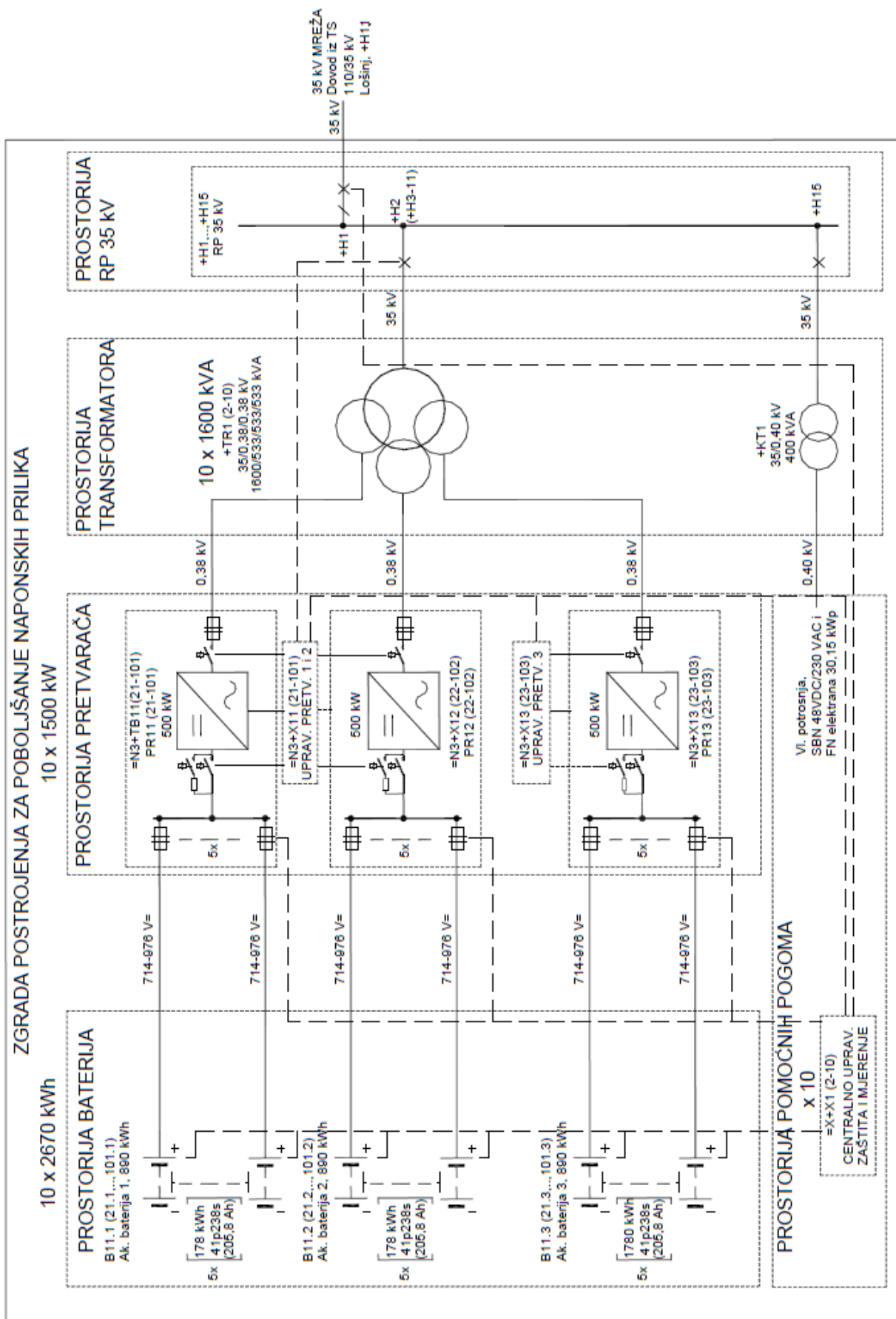


*Slika 10.2. TS 110/35 kV Lošinj [24]*

Osnovni dijelovi baterijskih sustava za pohranu električne energije su [19]:

1. Akumulatorske baterije
2. Sustavi grijanja, ventilacije i hlađenja (HVAC)
3. Sustav za gašenje požara baterija
4. DC razvodi
5. Dvosmjerni AC/DC pretvarači i pretvarački transformatori
6. SN postrojenja
7. Postrojenje vlastite potrošnje i besprekidnih napajanja
8. Električna instalacija i kabeli
9. Oprema uzemljenja, gromobranske i prenaponske zaštite
10. Vatrodojava
11. Oprema nadzora, upravljanja i automatskog održavanja





Slika 10.3. Blok shema BSPEE Lošinj 13MW, 26,5 MWh [19]

Osnovna usluga koju će pružati BSPEE Lošinj je smanjenje razlika između vršnog i baznog opterećenja na otocima Cresu i Lošinju te povećavanje sigurnosti opskrbe. Ta usluga se vrši za vrijeme turističke sezone u ljetnim mjesecima kada je vršna potrošnja izrazito visoka, za razliku od ostatka godine kada je potrošnja značajno niža. Mreža je veliki dio godine podopterećena, s obzirom da se dimenzioniranje elektroenergetske mreže radi prema potencijalno najvišem ostvarivom opterećenju. Ako u obzir uzmemo činjenicu da su lokalna proizvodnja iz solarnih elektrana i otočna potrošnja izrazito stohastičke veličine, njihov pogon će se ugradnjom baterijskih spremnika za pohranu električne energije uravnotežiti. Da se poboljšaju naponske prilike na otocima Cresu i Lošinju ugradit će se dva baterijska spremnika BSPEE 13 MW/ 26,5 MWh Lošinj i BSPEE 3 MW/ 7,7 MWh Orlec (ovdje se ne razmatra). [19]

Uz osnovne usluge, BSPEE Lošinj će nuditi i druge usluge:

1. regulacija napona i smanjenje gubitaka;

a u ovisnosti o budućim mrežnim pravilima i tržišnim mehanizmima, mogu se naknadno dogovoriti i još neke usluge, poput:

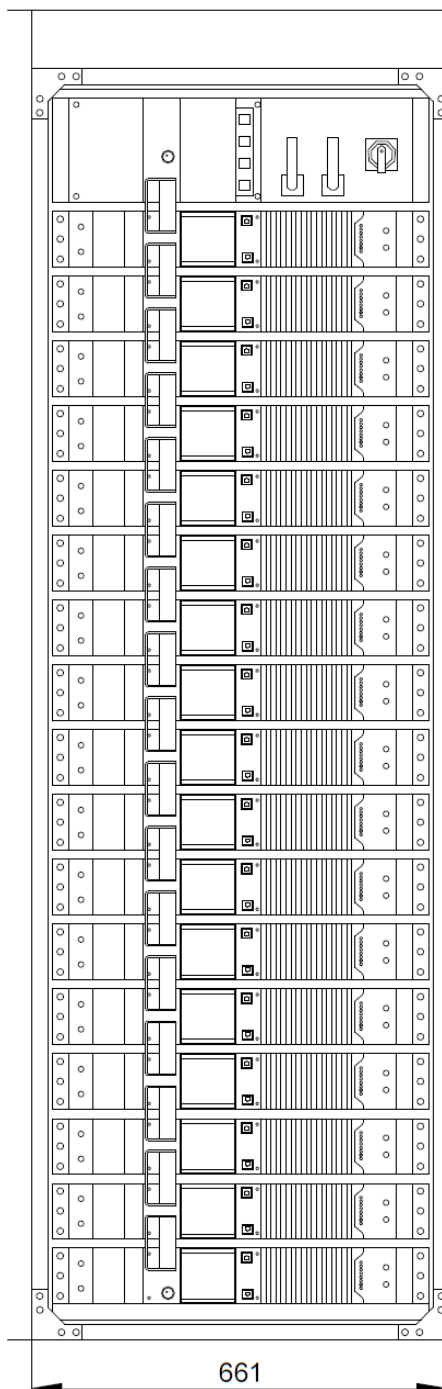
2. regulacija frekvencije
3. crni start
4. otočni rad
5. generiranje prihoda pružajući usluge arbitraže električne energije.

Potrebno je da baterija uvijek bude priključena na elektroenergetsku mrežu putem posebnog obračunskog mjesta sa ugovorenom proizvodnjom i potrošnjom električne energije, a sve zato da može sudjelovati u sekundarnoj regulaciji i arbitraži, ali i da može injektirati energiju kada radi smanjenje vršnog opterećenja. BSPEE Lošinj će se na distribucijsku mrežu otoka Lošinja priključiti iz postojećeg vodnog polja u postojećoj zgradi u kojoj se nalazi 35 kV postrojenje, upravljački dio i pomoćna postrojenja TS 110/35 kV Lošinj. [19]

Kao temeljni dio baterijskog sustava za pohranu energije su akumulatorske baterije, a danas se pretežito koriste dva tipa litij-ionskih baterija: Li-ion baterije sa pozitivnom elektrodom izrađenom iz litij nikal mangan kobalt dioksida ( $\text{LiNiMnCO}_2$ , skraćeno NMC) i Li-ion baterije s pozitivnom elektrodom izrađenom iz litij željeznog fosfata ( $\text{LiFePO}_4$ , skraćeno LFP). Vrsta koja je odabrana u ovom idejnom projektu za BSPEE Lošinj su NMC baterije zbog izuzetno dobrih svojstava za primjenu koja im je predviđena. [19]



Slika 10.4. Baterijski modul "Polarium" [19]



Slika 10.5. Baterijski ormar "Polarium" [19]

Tablica 10.1. Tehničke karakteristike jednog ormara [19]

| <b>Ormar tip Energy Storage Rack 23" 17 178 kWh</b> |   |
|---|---|
| <b>Dimenzije</b>                                    | š661 x v2200 x d780 mm                          |
| <b>Težina</b>                                       | ≈ 1200 kg                                       |
| <b>Tip članka</b>                                   | INR21700 (Li-ion, NMC tehnologija)              |
| <b>Broj modula u seriji</b>                         | 17  |
| <b>Pohranjena energije projekt.</b>                 | ≈ 178 kWh, uz pražnjenje s 0,5°C i pri 25°C     |
| <b>Kapacitet</b>                                    | ≈ 205,8 Ah, uz iste uvjete                      |
| <b>Iskoristiva energija</b>                         | ≈ 150 kWh, pražnj./punj. (do 3,00/do 4,1 V/čl.) |
| <b>Nazivni napon</b>                                | ≈ 864 V (17*14*3,63 ≈/čl.)                      |
| <b>Najviši radni napon</b>                          | ≈ 976 V (17*14*4,1 V/čl.)                       |
| <b>Najniži radni napon</b>                          | ≈ 714 V (17*14*3,00 V/čl.)                      |
| <b>Najviša struja pražnjenja</b>                    | 0,6°C (≈ 120 A)                                 |
| <b>Najviša struja punjenja</b>                      | 0,5°C (≈ 100 A)                                 |
| <b>Hlađenje</b>                                     | mješavina voda-glikol                           |
| <b>BMS</b>  | uključen  |
| <b>Životni vijek</b>                                | 20 godina (SoH 80%, optimalan SoC i 25°C)       |
| <b>Broj ciklusa</b>                                 | 6250 (SoH 80%, DoD 80% i 25°C)                  |

U novu zgradu BSPEE Lošinj će se u prostoriji baterija ugraditi 150 ormara (Energy Storage Rack 23" 17 178 kWh „Polarium“) od ukupno 26,7 MWh., uz mogućnost smještaja dodatnih 30 ormara baterija od 5,34 MWh. [19]

## 11. ZAKLJUČAK

Svijet se sve više razvija te je potreba za pohranom energije sve veća. Pohranjivanje velikih količina energije postao je jako veliki izazov. Ne postoji neka jedinstvena tehnologija za pohranu električne energije koja bi odgovarala u svakoj primjeni i bila odgovor na sve zahtjeve koje ima cjelokupni elektroenergetski sustav. Iz tog razloga potrebno je imati više vrsta različitih tehnologija koje sukladno svojim karakteristikama ispunjavaju tražene zahtjeve koje mreža postavlja pred njih. Primjena različitih tehnologija omogućava bolji uvid u njihove karakteristike, prikazuje prednosti koje imaju, ali i nedostatke koji se kroz daljnji razvoj svake tehnologije sve više smanjuju.

Postoje razni oblici i načini na koje se električna energija može pohraniti, a to su mehanički sustavi, toplinski sustavi, električni/elektromagnetski sustavi, te elektrokemijski sustavi za pohranu električne energije. No najznačajniji oblik još su uvijek crpno-akumulacijske hidroelektrane. Usprkos nedostacima kao što su geografska ograničenja, složenost, utjecaj na okoliš i vrijeme potrebno za razvoj projekta, može se pretpostaviti da će one još dugo ostati dominantna tehnologija kod izgradnje velikih spremnika za pohranu električne energije.

Iako su se sustavi za pohranu energije komprimiranim zrakom pokazali kao ekonomski isplativa opcija u slučaju kada su izgrađeni na prikladnim lokacijama, geografska ograničenja na koja se nailazi su još veća nego kod crpno-akumulacijskih hidroelektrana, te je samim time veći i utjecaj na okoliš i niža učinkovitost.

Uz navedene tehnologije, najkorišteniji su baterijski sustavi zbog mogućnosti izvedbe malih i srednjih spremnika. S obzirom da nemaju geografskih ograničenja, pogodni su za ugrađivanje na bilo kojem dijelu elektroenergetskog sustava te na taj način povećati stabilnost električne mreže. Na području baterija odvija se značajan razvoj tehnologije, razvijaju se različite vrste baterija. Još uvijek se koriste olovne baterije, no litij-ionske baterije ostvaruju sve veću primjenu u električnim vozilima. Nikal-kadmij baterije se zbog toksičnosti kadmija povlače iz upotrebe i zamjenjuju nikal-metal-hibrid baterijama.

Primjena vodika također je još jedan od oblika pohrane energije koji se sve više implementira u energetski sustav zbog izrazito dobrih ekoloških svojstava, ali i mogućnosti da ga se iskorištava

na različite načine. Značajnu ulogu ima u transportnom sustavu, a budućnost je u zelenom vodik u proizvedenom korištenjem obnovljivih izvora energije.

Baterijski sustavi svoju primjenu pronalaze u različitim područjima. Mogu se implementirati u raznim područjima u niskonaponskim i srednjenaponskim mrežama i pomoći mreži prilikom opterećenja. Na taj način bi se smanjili troškovi ulaganja u nove infrastrukture i povećala bi se učinkovitost već postojećih. Akumulacijom električne energije koja je dobivena za vrijeme kada je potražnja mala, samim time i cijena joj je niža, mogu se smanjiti troškovi električne energije. Energija koja je skladištena se kasnije tijekom vršnih opterećenja koristi umjesto električne energije koja je kupljena po visokoj cijeni. Zbog vrlo brzog odziva imaju mogućnost pružanja dodatnih usluga kao što je crni start i otočni rad, regulacija frekvencije, itd.

Kao primjer primjene baterijskog sustava pohrane je idejni projekt poboljšanja naponskih prilika implementacijom baterijskih sustava za otoke Cres (7,7 MW) i Lošinj (26,5 MW). Razlog primjene ovakvog sustava je mogućnost rezervnog napajanja u slučaju ispada DV 110 kV Krk - Lošinj za vrijeme turističke sezone kada je potreba za električnom energijom izrazito velika. Na prostoru već postojećeg postrojenja TS 110/35 kV Lošinj, u zidanoj zgradi će se postaviti novo postrojenje baterijskih spremnika za pohranu električne energije ukupno pohranjene energije 26,5 MWh i snage 13 MW.

## LITERATURA

- [1] B. Robyns, B. Francois, G. Delille, C. Saudemont, Energy Storage in Electric Power Grids, ISTE Ltd i John Wiley&Sons Inc., London i Hoboken, 2015.
- [2] Abbas A. Akhil, G. Huff, Aileen B. Currier, Benjamin C. Kaun, Dan M. Rastler, S. B. Chen, A. L. Cotter, D. T. Bradshaw, W. D. Gauntlett: DOE/EPRI Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA
- [3] Milovanovic, Zdravko & Papic, Ljubisa & Dumonjić-Milovanović, Svetlana & Milasinovic, Aleksandar & Knežević, Darko. (2018). 13.Poglavlje7 Skladištenje energije.
- [4] „Battery storage for renewables, market status and technology outlook“, IRENA report, 2015.
- [5] „Decentralized storage impact on future distribution grids“, EURELECTRIC report, 2012.
- [6] „Tracking clean energy progress 2017“, IEA, 2017.
- [7] „Baterijski sustavi za pohranu električne energije i mogućnost njihove primjene u distribucijskoj mreži HEP ODS-a“, Končar-INEM, 2018.
- [8] Z.Luburić, H.Pandžić, „Uloga spremnika energije u elektroenergetskom sustavu“, HRO CIGRE, 12. simpozij o sustavu vođenja EES, Split 2016.
- [9] Z. Zbunjak, H. Pandžić, „Integracija baterijskog spremnika energije u EES za osiguranje n-1 kriterija sigurnosti“, HRO CIGRE, 13. savjetovanje, Šibenik, 2017.
- [10] K. Bradbury, Energy storage technology review, Technical report, 2010.
- [11] H. Pandžić, I. Kuzle, “Energy Storage Operation in the Day-ahead Electricity Market,” In proc. 12th International Conference on the European Energy Market (EEM), Lisbon, Portugal, May 2015., pp. 1-6.
- [12] I. Đurić, J. Škare, T. Marijanić: Baterijski spremnici električne energije u distribucijskoj mreži, HO CIRED 6. (12.) savjetovanje, Opatija, 2018.
- [13] M.Skok, T.Baričević, „Pomoćne usluge i usluge u distribucijskoj mreži u vrtlogu novih značajki pogona distribucijske mreže, HRO CIGRE, 12.savjetovanje, Šibenik 2015.
- [14] „Analize utjecaja nove EU energetske politike od interesa za HEP grupu i prijedlog prilagodbe“, FER 2018.
- [15] Technical Articles, url: <https://www.gses.com.au/pumped-hydro-storage/>
- [16] Kosić D., "Sustavi pohrane električne energije", Diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Osijek, 2016. Dostupno na url: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/etfos:1092/preview>
- [17] Razumović K., "Spremnici električne energije u distribucijskoj mreži", Diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i

- informatijskih tehnologija Osijek, Osijek, 2016. Dostupno na url: <https://repozitorij.etfos.hr/islandora/object/etfos%3A2077/datastream/PDF/view>
- [18] "Povećanje sigurnosti napajanja područja otoka Cresa i Lošinja", Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije HO CIRED, 6. (12.) savjetovanje, Opatija, 13. - 16. svibnja 2018. Dostupno na url: [https://www.ho-cired.hr/images/OPATIJA2018/Referati\\_po\\_studijskim\\_odborima/SO5/SO5-19.pdf](https://www.ho-cired.hr/images/OPATIJA2018/Referati_po_studijskim_odborima/SO5/SO5-19.pdf)
- [19] "Idejni projekt postrojenja za poboljšanje naponskih prilika", BSPEE Lošinj\_MAPA\_3\_Elektrotehnički projekt
- [20] Dostupno na url: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Vodik>
- [21] Hydrogen: A Renewable Energy Perspective, IRENA 2019.
- [22] Hydrogen form Renewable Power: Technology Outlook for the Energy Transition, IRENA 2018.
- [23] Šarčević F., "Mogućnosti iskorištavanja vodika kao goriva", Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Zagreb, Zagreb 2020. Dostupno na url: <https://repozitorij.rgn.unizg.hr/islandora/object/rgn%3A1380/datastream/PDF/view>
- [24] Položaj TS 110/35 kV Lošinj, Google Maps, Dostupno na url: <https://www.google.com/maps/@44.583658,14.4098877,273m/data=!3m1!1e3>
- [25] "Primjena nove tehnologije baterijskih spremnika električne energije u distribucijskoj mreži", Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije HO CIRED, 7. (13.) savjetovanje, Šibenik, 24. - 27. lipnja 2021.
- [26] "Usporedba različitih tehnologija pohrane električne energije", Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije HO CIRED, 7. (13.) savjetovanje, Šibenik, 24. - 27. lipnja 2021.
- [27] Dostupno na url: <https://beaconpower.com/stephentown-new-york/>
- [28] Dostupno na url: <https://hr.legaltechnique.org/articles/tehnologii/gemasolar-pervaya-v-mire-kruglosutochnaya-gelioelektrostanciya-bull-novosti-v-fotografijah.html>
- [29] Dostupno na url: <https://electronic.ba/proizvod/31035/akumulatorska-olovna-baterija-6v-12ah-151x50x94mm-ultracell>
- [30] Dostupno na url: <https://www.hoffmann-group.com/HR/hr/rotometal/Mjerna-tehnika/Rezervni-dijelovi-i-pribor/Ure%C4%91aji-za-mjerenje-i-ispitivanje-rezervni-dijelovi-i-pribor/Litij-ionska-baterija/p/492926->
- [31] Dostupno na url: <https://www.powermag.com/innovative-byproduct-hydrogen-fuel-cell-power-plant-completed/>
- [32] Dostupno na url: <https://technoluxpro.com/hr/akkumulatory/batarei/ni-cd.html>



# PRILOZI

## Popis slika

|  |    |
|--|----|
| Slika 3.1. Prikaz principa rada crpno-akumulacijske hidroelektrane [26].....                         | 7  |
| Slika 3.2. Prva crpno-akumulacijska hidroelektrana na morsku vodu - Okinawa Yanbaru (30MW) [15]..... | 9  |
| Slika 3.3. Prikaz sustava pohrane energije komprimiranim zrakom [26] .....                           | 10 |
| Slika 3.4. Postrojenje u Stepentown, New York (NY), SAD [27].....                                    | 12 |
| Slika 4.1. Gemasolar, Španjolska [28] .....  | 14 |
| Slika 5.1. Super-kondenzator [17].....   | 16 |
| Slika 5.2. Dijelovi supravodljivog magnetskog svitka [16].....                                       | 17 |
| Slika 6.1. Olovno-kiselinska baterija [29] .....   | 19 |
| Slika 6.2. Litij-ionska baterija [30] .....  | 20 |
| Slika 6.3. Nikal-kadmij baterije [32].....   | 21 |
| Slika 6.4. Najveće postrojenje sa gorivim člancima - Južna Koreja [31].....                          | 22 |
| Slika 7.1. Model vodikovih veza (1) kod molekula vode [20] .....                                     | 23 |
| Slika 7.2. Trendovi korištenja vodika u razdoblju od 38 godina (1980.-2018.) [21].....               | 24 |
| Slika 7.3. Jednostavna shema P2G2P sustava [23] .....  | 27 |
| Slika 7.4. Emisije različitih vrsta pogona vozila u odnosu na domet vozila [23] .....                | 29 |
| Slika 8.1. Blok shema BSPEE [25] .....   | 31 |
| Slika 8.2. Moguća mjesta ugradnje BSPEE [25] .....   | 33 |
| Slika 9.1. Princip korištenja sustava za skladištenje električne energije kod zagušenja [1] .....    | 35 |
| Slika 9.2. Izlazna snaga spremnika pri beznaponskom startu [17] .....                                | 37 |
| Slika 10.1. 110 kV i 35 kV mreža koja napaja otok Cres i otok Lošinj [18].....                       | 41 |
| Slika 10.2. TS 110/35 kV Lošinj [24] .....   | 42 |
| Slika 10.3. Blok shema BSPEE Lošinj 13MW, 26,5 MWh [19] .....  | 43 |
| Slika 10.4. Baterijski modul "Polarium" [19].....  | 45 |
| Slika 10.5. Baterijski ormar "Polarium" [19].....  | 45 |

## Popis tablica

|   |    |
|---|----|
| Tablica 8.1. Karakteristike nekih akumulatorskih baterija [25]..... | 31 |
| Tablica 10.1. Tehničke karakteristike jednog ormara [19].....       | 46 |

## Popis kratica

|                                       |                              |
|---------------------------------------|------------------------------|
| SoH (eng. <i>State of Health</i> )    | Stanje zdravlja baterije     |
| SoC (eng. <i>State of Charge</i> )    | Stanje napunjenosti baterije |
| DoD (eng. <i>Depth of Discharge</i> ) | Dubina pražnjenja baterije   |

## SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

U današnje vrijeme potreba za električnom energijom je sve veća. Kako bi se zadovoljila ta potreba sve se više koriste razni oblici pohranjivanja električne energije (mehanička pohrana energije, kemijska pohrana energije, toplinska pohrana energije). Svaka tehnologija ima svoje prednosti i mane, te se prema svojim karakteristikama odabiru tako da zadovoljavaju postavljene uvjete, ali i ispunjavaju očekivanja radi kojih se i primjenjuju. Neke od tehnički naprednijih tehnologija koje se trenutno najviše koriste su crpno-akumulacijske hidroelektrane, sustavi za pohranu komprimiranim zrakom i baterijski sustavi za pohranu električne energije. Imajući u vidu da su neke tehnologije već dobro poznate, i dalje postoji prostora za napredak te je razvoj na tom području jako velik i brz.

**KLJUČNE RIJEČI:** Crpno-akumulacijske hidroelektrane, baterijski sustavi za pohranu električne energije, pohrana energije pomoću zamašnjaka, vodik, baterije

## **SUMMARY AND KEY WORDS**

Nowadays, the need for electricity is increasing. In order to meet this need, various forms of electrical energy storage (mechanical energy storage, chemical energy storage, thermal energy storage) are increasingly being used. Each technology has its advantages and disadvantages, and according to its characteristics, they are selected so that they meet the set conditions, but also fulfill the expectations for which they are applied. Some of the more technically advanced technologies currently in most use are pumped-storage hydro power plants, compressed air storage systems, and battery systems for electrical energy storage. Bearing in mind that some technologies are already well known, there is still room for improvement and the development in this area is very large and fast.

**KEY WORDS:** Pumped-storage hydro power plants, battery systems for electric energy storage, energy storage using fly wheels, hydrogen, batteries