

# VRSTE POHRANE ELEKTRIČNE ENERGIJE

---

**Gorišek, Josip**

**Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:322168>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-12**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
STROJARSKE KONSTRUKCIJE

JOSIP GORIŠEK

# **VRSTE POHRANE ELEKTRIČNE ENERGIJE**

DIPLOMSKI RAD

KARLOVAC, rujan 2023.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
STROJARSKE KONSTRUKCIJE

JOSIP GORIŠEK

# **VRSTE POHRANE ELEKTRIČNE ENERGIJE**

DIPLOMSKI RAD

Mentor: dr. sc. Vladimir Tudić

KARLOVAC, rujan 2023.

## PREDGOVOR

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno, koristeći stečena znanja tijekom studija i rada te navedenu literaturu. Zahvaljujem se mentoru prof. Vladimiru Tudiću, na stručnim savjetima i pruženoj pomoći pri izradi ovoga rada, također zahvaljujem na podršci svojoj obitelji, prijateljima te svima koji su bili uz mene.

## **SAŽETAK**

Pohrana energije je sve više prisutna tema u svijetu. Tranzicijom na obnovljive izvore energije, pojavili su se problemi skladištenja viška energije. Kako preko obnovljivih izvora većinom imamo dio kada oni rade punim kapacitetom, a drugim djelom rade sa smanjenim intenzitetom, ili ne rade, potrebno je tu energiju skladištiti za korištenje tokom vremena mirovanja sustava. Kako nije moguće samo pustiti veliku količinu energije u mrežu zbog preopterećenja sustava, potrebno ju je spremi na određeni period. Također, porastom transporta koji se također oslanja na električnu energiju, sama pohrana postaje dodatno potrebna.

## **SUMMARY**

Energy storage is an increasingly prevalent topic in the world. With the transition to renewable energy sources, problems of storing excess energy have emerged. As we mostly have periods when renewable sources operate at full capacity, and other times when they operate at reduced intensity, or not at all, it is necessary to store this energy for use during system downtime. As it is not possible to simply release a large amount of energy into the grid due to system overload, it needs to be stored for a certain period. Also, with the increase in transport that also relies on electrical energy, storage itself becomes additionally necessary.

# SADRŽAJ

ZADATAK DIPLOMSKOG RADA.....	
PREDGOVOR.....	
<b>SAŽETAK</b> .....	
Popis slika .....	
Popis tablica.....	
Popis oznaka .....	
<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. SKLADIŠTENJE ENERGIJE</b> .....	3
<b>2.1. Mehanički sustavi</b> .....	5
2.1.1. Reverzibilne hidroelektrane (PHES).....	5
2.1.2. Pohrana komprimiranog zraka (CAES).....	7
2.1.3. Zamašnjaci .....	9
<b>2.2. Električni sustavi</b> .....	11
2.2.1. Ultrakondenzatori.....	11
2.2.2. Supravodljivi magneti (SMES).....	13
<b>2.3. Kemijski sustavi</b> .....	14
2.3.1. Tehnologije kemijske konverzije (P2G) - pohrana vodika i metana.....	14
<b>2.3.2. Toplinski sustavi</b> .....	16
2.3.3. Pohrana osjetne topline .....	17
2.3.4. Pohrana latentne topline.....	19
2.3.5. Termokemijska pohrana energije .....	19
<b>2.4. Elektrokemijski sustavi</b> .....	20
2.4.1. Baterijski sustav (BESS).....	20
2.4.2. Protočne baterije .....	21
2.4.3. Olovno-kiselinske baterije .....	22
2.4.4. Baterije na bazi nikla (Ni-Cd, Ni-MH).....	25
2.4.5. Natrij-sumpor baterije (NaS) .....	27
2.4.6. Litij-ionske baterije (Li-ion) .....	28
2.4.7. Natrij-nikal-klorid ( <i>Na-NiCl<sub>2</sub></i> ).....	29
2.4.8. Cink-zrak baterije.....	30
2.4.9. Vanadij redoks protočne baterije (VRB).....	31
2.4.10. Željezo-krom protočne baterije (Fe-Cr) .....	32
2.4.11. Cink-brom protočne baterije (ZnBr) .....	33
<b>3. PRIMJENA BESS-a U PRIJENOSNOJ MREŽI</b> .....	34
<b>3.1. Minimizacija troškova rada sustava</b> .....	34
<b>3.2. Upravljanje zagušenjima u mreži</b> .....	35
<b>3.3. Uravnoteženje elektroenergetskog sustava</b> .....	37

3.4.	Naponska stabilnost .....	39
3.5.	Crni start .....	40
4.	PRIMJER SUSTAVA ZA POHRANU ENERGIJE U HRVATSKOJ .....	41
5.	USPOREDBA SUSTAVA .....	43
5.1.	Ekonomska usporedba .....	43
5.2.	Usporedba vijeka trajanja sustava .....	46
5.3.	Usporedba efikasnosti u odnosu na životni vijek .....	47
6.	LITERATURA .....	48

## Popis slika

- Slika 1 Karta hrvatske prijenosne mreže [24]
- Slika 2 Ukupni instalirani troškovi (\$/kWh) sustava u 2021. godini [5]
- Slika 3 Ukupni instalirani troškovi (\$/kWh) sustava u 2030. godini [5]
- Slika 4 primjer reverzibilne hidroelektrane (PHES) [2]
- Slika 5 primjer postrojenja za komprimiranje zraka [3]
- Slika 6 shematski primjer zamašnjaka [11]
- Slika 7 shematski prikaz ultrakondenzatora [15]
- Slika 8 shematski prikaz supravodljivog magneta [17]
- Slika 9 shema vodikovog lanca vrijednosti, od proizvodnje do krajnjeg korištenja [12]
- Slika 10 Solarna termoelektrana s osjetnim spremnicima topline [21]
- Slika 11 Primjer baterijskog sustava uz obnovljive izvore energije [19]
- Slika 12 Shema protočne baterije [49]
- Slika 13 Presjek olovne baterije [50]
- Slika 14 Ovisnost broja ciklusa o dubini pražnjenja [5]
- Slika 15 Presjek Ni-Cd baterije [15]
- Slika 16 Presjek (Ni-MH) baterije [15]
- Slika 17 Shema pražnjenja litij-ionske baterije [51]
- Slika 18 Shema rada vanadij redoks baterije [15]
- Slika 19 Shema cink-brom baterije [30]
- Slika 20 Upravljanje zagušenjima u mreži injektiranjem snage iz spremnika [1]
- Slika 21 Dijagram ravnoteže opterećenja mreže [52]
- Slika 22 Cijev reverzibilne elektrane [48]
- Slika 23 Strojarnica [48]
- Slika 24 Troškovi (\$/kWh) u 2021. godini za 1-10MW sustave [5]
- Slika 25 Troškovi (\$/kWh) u 2021. godini za 100-1000MW sustave [5]
- Slika 26 Troškovi (\$/kWh) u 2030. godini za 1-10MW sustave [5]
- Slika 27 Usporedba efikasnosti i prosječnog životnog vijeka sustava [5]

## Popis tablica

- Tablica 1 Troškovi sustava sa različitim materijalima u odnosu na vrijeme pohrane [5]
- Tablica 2 Predviđeni broj ciklusa i dubina pražnjenja u ovisnosti o vremenu [5]
- Tablica 3 Broj preostalih ciklusa u odnosu na dubinu pražnjenja LFP i NMC baterija [5]
- Tablica 4 Predviđeni troškovi 1MW Cink-zrak sustava [5]
- Tablica 5 Predviđeni troškovi komponenata 10MW sustava u ovisnosti o vremenu [5]
- Tablica 6 Tablica dnevnog opterećenja, HEP ODS [24]
- Tablica 7 Usporedba životnog vijeka raznih sustava [5]



## Popis oznaka

AGC Sustav automatske regulacije proizvodnje (eng. *Automatic Generation Control*)

AIT Prosječno trajanje dugotrajnih prekida napajanja (eng. *Average Interruption Time*)

BMS Sustav upravljanja baterijom (eng. *Battery Management System*)

BESS Baterijski sustav pohrane energije (eng. *Battery Energy Storage System*)

CAES Pohrana komprimiranog zraka (eng. *Compressed Air Energy Storage*)

CSP Koncentrirana solarna energija (eng. *Concentrated Solar Power*)

DOD Dubina pražnjenja (eng. *Depth of Discharge*)

EMS Sustav upravljanja energijom (eng. *Energy Management System*)

ENS Neisporučena električna energija (eng. *Energy Not Supplied*)

ESR Ekvivalentni serijski otpor (eng. *Equivalent Series Resistance*)

ESS Spremnik energije (eng. *Energy Storage System*)

ETS Sustav trgovanja emisijama (eng. *Emissions Trading System*)

FACTS Fleksibilni izmjenični prijenosni sustav (eng. *Flexible Alternating Current Transmission System*)

HERA Hrvatska energetska regulatorna agencija

HOPS Hrvatski operator prijenosnog sustava

LCOE Specifična granična cijena proizvodnje električne energije (eng. *Levelized Cost of Electricity*)

LCOS Specifična cijena spremnika energije (eng. *Levelized Cost of storage*)

OIE Obnovljivi izvori energije

OPS Operator prijenosnog sustava

P2G Tehnologije kemijske konverzije (eng. *Power-to-Gas*)

PCS Sustav pretvorbe energije (eng. *Power Conversion System*)

PEM Protonski propusna membrana (eng. *Proton Exchange Membrane*)

PHES Reverzibilna hidroelektrana (eng. *Pumped Hydro Energy Storage*)

SMES Supravodljivi magneti (eng. *Superconducting Magnetic Energy Storage*)

SoE Stanje energije (eng. *State of Energy*)

TES Pohrana toplinske energije (eng. *Thermal Energy Storage*)

VESS Virtualni spremnik energije (eng. *Virtual energy storage system*)

VRB Vanadij redoks baterija (eng. *Vanadium Redox Battery*)

## 1. UVOD

Pohrana energije je proces kojim se višak električne energije pretvara u drugi oblik te se sprema za kasniju upotrebu. Ono je ključno jer omogućuje korištenje obnovljivih izvora energije koji nisu konzistentni te ne proizvode energiju konstantno. Također, povećava sigurnost opskrbe energijom, smanjuje emisije stakleničkih plinova i smanjuje troškove električne energije. U današnje doba je normalno koristiti male priručne sustave za pohranu, koje imamo uz sebe, kako nam se mobilni uređaji ne bi ugasili. U svijetu gdje je navika uvijek imati dovoljno energije pri ruci, pa i u malom obujmu za uređaje kao što su mobilni telefon, prijenosno računalo, te ostali prenosivi uređaji, pohrana dobiva sve više na značaju. Električna vozila se potencijalno također smatraju sustavima za pohranu. Ona su jedan od najvećih izazova za električnu mrežu. Kako bi barem malo ublažili taj problem, koristila bi se kao sustavi za pohranu, koji bi dok su priključena na mrežu, tokom viška energije u mreži punila, te praznila dok postoji povećana potrošnja. Pretpostavlja se da će u budućnosti svako kućanstvo imati barem jedan sustav za privatnu pohranu energije, koji bi dugoročno donosio uštedu te povećao sigurnost ionako preopterećene mreže.



# HRVATSKA PRIJENOSNA MREŽA



## Legenda:

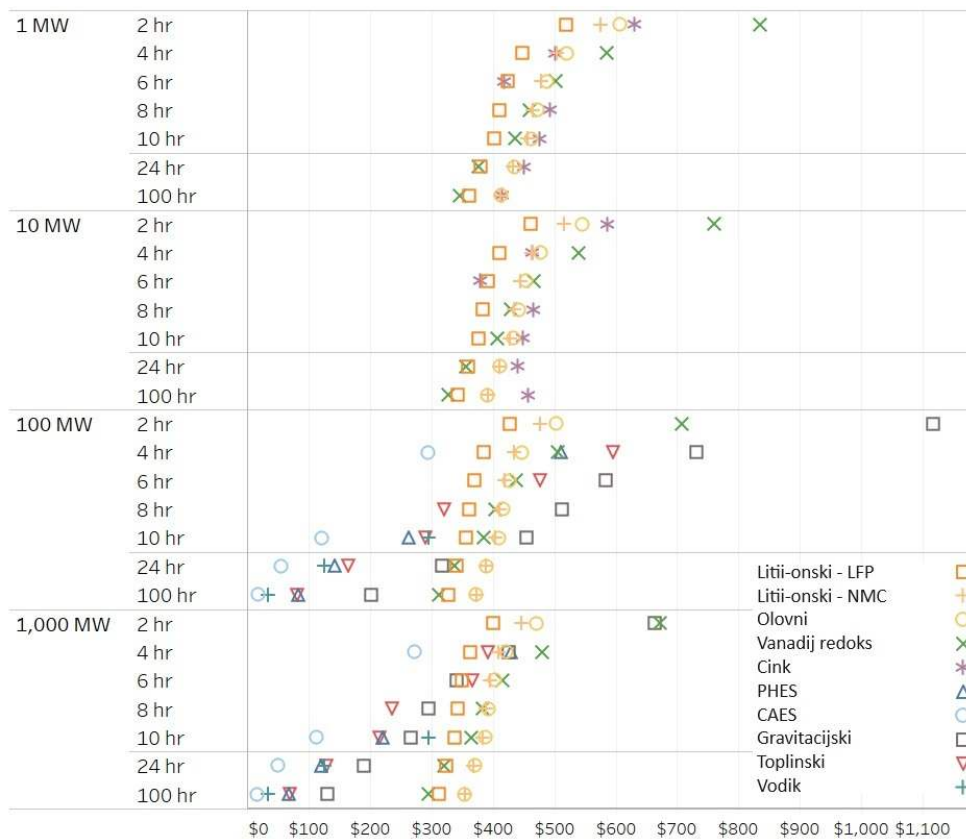
- |                               |                         |                             |     |
|-------------------------------|-------------------------|-----------------------------|-----|
| 400 kV dvostruki nadzemni vod | TS 400/220/110 kV       | TS (RP) 220 kV + TE         | EVP |
| 400 kV nadzemni vod           | TS 400/220/110 kV       | TS (RP) 220 kV + HE         | TE  |
| 220 kV dvostruki nadzemni vod | TS 400/110 kV           | TS (RP) 110 kV + VE         | HE  |
| 220 kV nadzemni vod           | TS 220/110 kV           | TS (RP) 110 kV + TE         | VE  |
| 220 kV kabelski vod           | TS 220/35 kV            | TS (RP) 110 kV kupca        |     |
| 110 kV nadzemni vod           | TS 110/x kV             | 110 kV Kabelsko postrojenje |     |
| 110 kV kabelski vod           | TS (RP) 110 kV + EVP    |                             |     |
| 110 kV podmorski kabel        | TS 110/x kV U IZGRADNJI |                             |     |
|                               | TS 35/x kV              |                             |     |

Rujan, 2022.  
Izvor: HOPS, Hrvatski elektroprivredni preduzeće

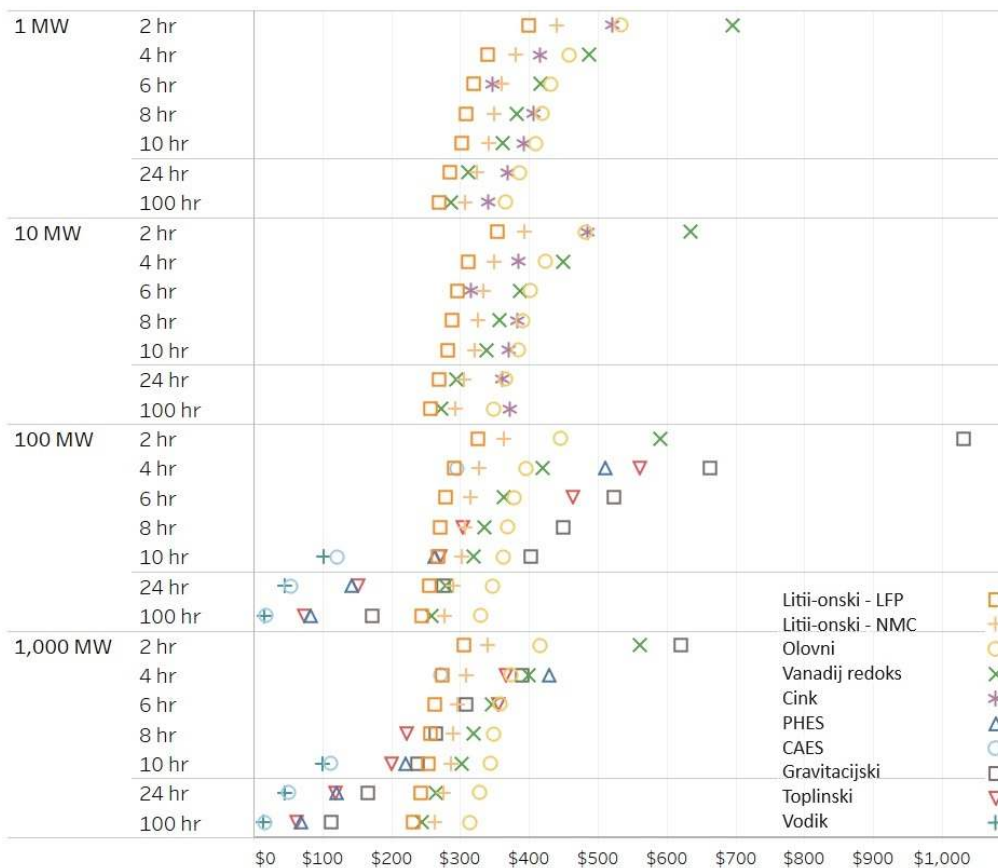
Slika 1 Karta hrvatske prijenosne mreže [24]

## 2. SKLADIŠTENJE ENERGIJE

Konvencionalne elektroenergetske mreže rade na principu neprekidnog balansiranja proizvodnje i potrošnje električne energije. Ovaj pristup osigurava stabilnost mreže, budući da je skladištenje velikih količina električne energije u izvornom obliku izazovno. Električna energija izmjeničnog valnog oblika distribuira se na određenom području putem prijenosnih mreža visokog napona, a zatim se distribuira putem distribucijskih mreža srednjeg i niskog napona. No, s povećanjem udjela obnovljivih izvora energije s nestabilnom i promjenjivom proizvodnjom električne energije, u mrežu se nastoji implementirati veći broj spremnika energije kako bi se uravnotežila proizvodnja. Također, sve veći fokus stavlja se na razvoj manjih mikromreža i pametnih mreža s distribuiranim izvorima energije. Implementacijom skladišta energije s obnovljivim izvorima energije uravnotežuje se proizvodnja energije i izbjegavaju se problemi nedostatka proizvodnje kod solarnih elektrana tijekom noći ili oblačnih dana te kod vjetro-elektrana 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. Zemlje s najvećim instaliranim kapacitetima snage spremnika energije su Kina, Japan, Sjedinjene Američke Države, Njemačka, Italija, Švedska i Španjolska. U nastavku, 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. Trenutni procijenjeni kao i pretpostavljeni troškovi u budućnosti različitih sustava prikazani su slikama ispod (Slika 2, Slika 3).



**Slika 2** Ukupni instalirani troškovi (\$/kWh) sustava u 2021. godini [5]



**Slika 3** Ukupni instalirani troškovi (\$/kWh) sustava u 2030. godini [5]

## 2.1. Mehanički sustavi

### 2.1.1. Reverzibilne hidroelektrane (PHES)

Reverzibilne hidroelektrane, također poznate kao Pumped Hydro Energy Storage (PHES) su tehnologija za pohranu energije koja se koristi već preko stoljeća. Prvi takvi sustavi nastali su u 19. stoljeću u Italiji i Švicarskoj. Danas su reverzibilne hidroelektrane široko rasprostranjene u elektroenergetskoj mreži zbog svojih velikih kapaciteta i snaga, te su najrazvijenija i najčešće korištena tehnologija za pohranu energije. Primjer takvog sustava je prikazan na slici (Slika 1).

Imaju dvostruku ulogu u elektroenergetskoj mreži. Tijekom faze generiranja, odnosno proizvodnje električne energije, voda iz rezervoara na višoj poziciji se propušta kroz vodovodne kanale i/ili cjevovode preko lopatica turbine do rezervoara na nižoj poziciji. Gornji rezervoar, koji je obično u obliku akumulacijskog jezera, omogućuje skladištenje potencijalne energije vode, čime PHES postaje spremnik energije. Kada se lopatice turbine okreću, okreće se i rotor generatora koji je mehanički povezan s turbinom, generirajući električnu energiju. S druge strane, tijekom faze potrošnje električne energije ili skladištenja vode, odnosno pumpanja vode iz rezervoara na nižoj poziciji u rezervoar na višoj poziciji, koristi se električna energija iz mreže. Za obje faze koristi se isti električni mehanizam (motor - generator) i turbina. Proizvodnja električne energije iz PHES-a odvija se tijekom perioda veće potrošnje u elektroenergetskom sustavu, što je obično tijekom dnevnih sati. Potrošnja (pumpanje ili crpljenje) odvija se tijekom perioda niže potrošnje unutar sustava, odnosno tijekom noćnih sati. Na taj način, PHES pomaže u izjednačavanju odnosa proizvodnje s potrošnjom električne energije unutar sustava u svakom trenutku. Međutim, zbog svog principa djelovanja, integracija uvelike ovisi o geografskom reljefu prostora na kojem se može smjestiti hidroelektrana. Da bi se dva rezervoara nalazila na različitim nadmorskim visinama, hidroelektrana se mora najčešće integrirati u prostore brijega, gora ili planina. Također je moguće iskoristiti rasjede između podzemnih šupljina i površine tla ili pak između mora i obližnje planinske kotline. Ovaj tip spremnika energije nije moguće integrirati u sve dijelove elektroenergetske mreže zbog svoje velike površine potrebne za pohranjivanje velike količine vode.

Dodatni problem predstavlja visoka investicija u odnosu na kapacitet instalirane snage (600 – 2.000 \$/kW). Međutim, ako se gleda prema kapacitetu pohrane energije, isplativost je veća, te iznosi 70 do 150 \$/kWh. Prednosti ove tehnologije su dug životni vijek (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. PHES se najčešće nalaze u rasponu snaga od nekoliko stotina MW do preko jednog GW. Vrijeme pražnjenja može iznositi od 1 sata do preko 24 sata. Stupanj pražnjenja je izrazito nizak zbog čega su PHES 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]

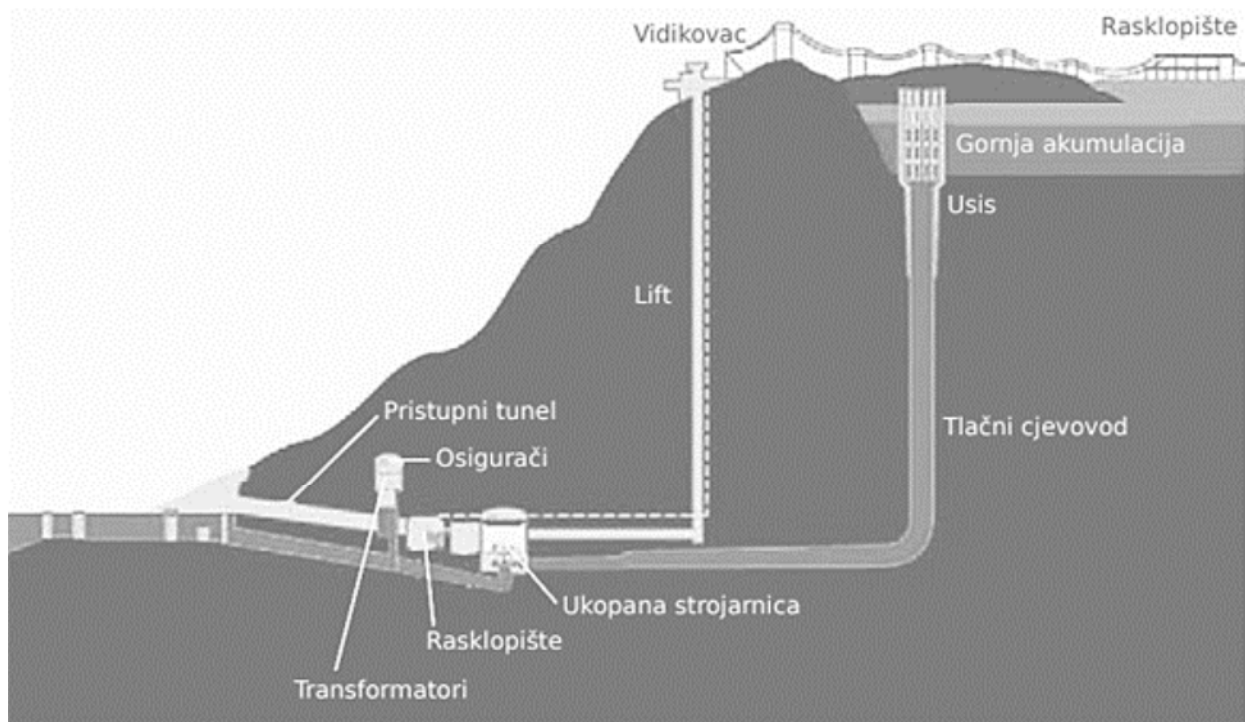
Količina energije koja se može pohraniti u reverzibilnoj hidroelektrani može se izračunati kao potencijalna energija mase vode na određenoj visini. [7]

$$E = m \cdot g \cdot h \tag{1}$$

$m$  - masa vode

$g$  - akceleracija sile teže

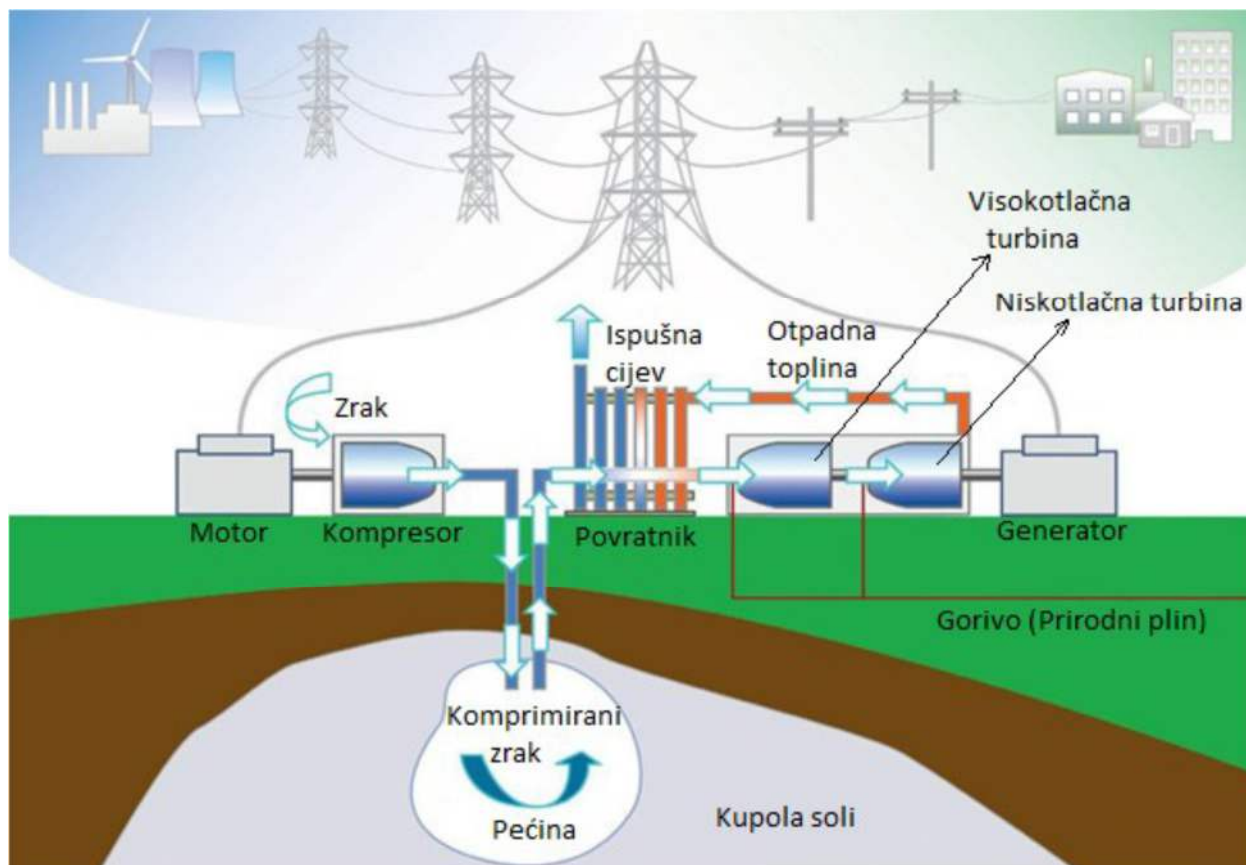
$h$  - visinska razlika dva spremnika



**Slika 4** primjer reverzibilne hidroelektrane (PHES) [2]

## 2.1.2. Pohrana komprimiranog zraka (CAES)

Tehnologija skladištenja energije putem komprimiranog zraka, poznata kao Compressed Air Energy Storage (CAES), također predstavlja oblik mehaničkog skladištenja energije. Tijekom faze pohrane, zrak se usmjerava u podzemne geološke šupljine (pećine ili kaverne) ili se tlači u plinske spremnike. Kada je to potrebno, zrak se vraća na površinu. Tijekom faze pražnjenja, zrak se diže prema površini ili se oslobađa iz spremnika, stvarajući zračnu struju koja pokreće turbinu i generator, proizvodeći električnu energiju. Ova tehnologija skladištenja energije postoji već više od pola stoljeća. Primjer takvog postrojenja je prikazan na slici ispod (Slika 2)



**Slika 5** primjer postrojenja za komprimiranje zraka [3]

Zrak se može komprimirati u različite vrste podzemnih šupljina, uključujući rudnike soli, vodonosne ili stjenovite formacije, rudarske špilje i kamenolome. Ako postojeće šupljine nisu dostupne ili nisu dovoljno velike, mogu se umjetno napraviti nove. Pri odabiru odgovarajućeg spremišta, važno je uzeti u obzir debljinu stjenke šupljine, stabilnost šupljine pri promjeni tlaka, dubinu špilje u odnosu na površinu (uglavnom između 100 i 200 metara dubine) i prisutnost mineralnih spojeva zbog rizika oksidacije. [1]



Količina pohranjene energije računa se prema slijedećem izrazu [7]:

$$E = P_1 \cdot V_1 \cdot \left[ \ln \left( \frac{P_1}{P_a} \right) - 1 + \left( \frac{P_a}{P_1} \right) \right] \quad (2)$$

$P_1$  - tlak spremnika

$V_1$  - volumen spremnika

$P_a$  - tlak okoline (atmosfera)

Tri su glavne kategorije sustava za pohranu energije komprimiranim zrakom:

Prva generacija koristi atmosferski zrak koji se komprimira tijekom faze punjenja. Zatim se zrak hladi u izmjenjivaču topline i upumpava u podzemne šupljine. Tijekom faze ekspanzije, skladišteni zrak se uzima iz podzemnih šupljina, zagrijava se u komori izgaranja (obično korištenjem prirodnog plina) i prosljeđuje se kroz sustav na principu plinske turbine. [1]

Druga generacija nastoji poboljšati efikasnost sustava i smanjiti emisije stakleničkih plinova. Koristi nove tehnologije i hibridne sustave temeljene na unaprijeđenom dizajnu plinske turbine. [1]

Treća generacija, poznata kao adijabatska pohrana komprimiranog zraka, je najnovija tehnologija pohrane koja još nije u upotrebi. Tijekom faze skladištenja, koristi se skladištenje topline za povrat toplinske energije komprimiranja. Skladištena energija (toplina) koristi se za zagrijavanje izlaznog zraka iz spremnika. [1]

Trenutni CAES sustavi imaju snage 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 PHES (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. [7]

### 2.1.3. Zamašnjaci

Zamašnjaci su uređaji koji se mogu kategorizirati kao kinetički sustavi zbog načina na koji funkcioniraju. Pohranjuju mehaničku, rotacijsku (odnosno kinetičku) energiju na temelju zamašne mase gdje je iznos pohranjene energije ovisan o kvadratu brzine rotacije (kutne brzine) i vremenu. [1]

$$E = \frac{J\Omega^2}{2} \quad (3)$$

J - vrijeme inercije

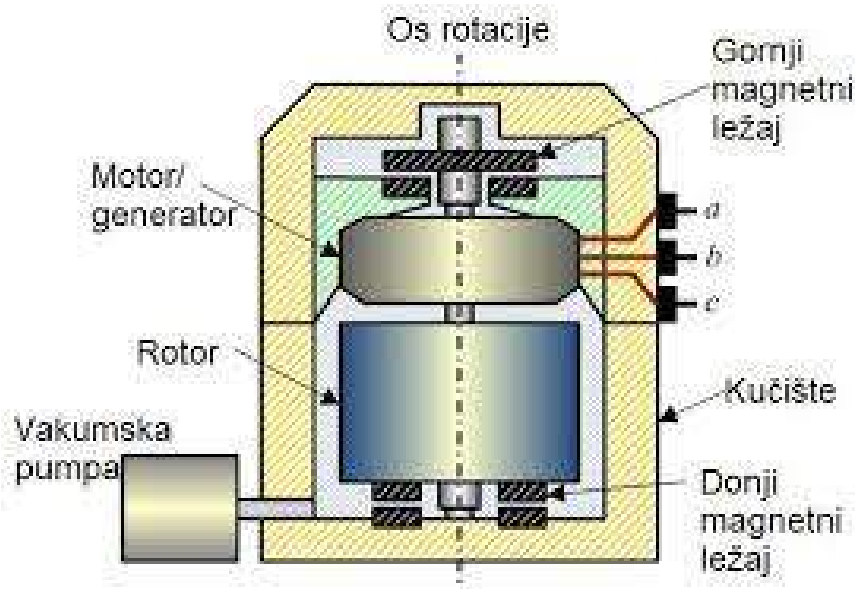
$\Omega$  - kutna brzina

Kada se brzina rotacije povećava, količina pohranjene energije također se povećava. Stoga zamašnjaci obično rotiraju na izuzetno visokim brzinama, koje mogu premašiti 10.000 o/min. Ako je broj okretaja manji od 10.000 o/min, zamašnjak se smatra sporim, dok se zamašnjak koji ima više od 10.000 o/min smatra brzim zamašnjakom.

Zamašnjaci, poput reverzibilnih elektrana, mogu djelovati u dva načina rada: generatorskom i motornom. U generatorskom načinu rada, zamašnjak pretvara mehaničku energiju u električnu koja se zatim isporučuje mreži. S druge strane, u motornom načinu rada, zamašnjak pretvara električnu energiju u mehaničku, odnosno preuzima električnu energiju iz mreže. Tijekom ciklusa punjenja, kutna brzina zamašnjaka se povećava, dok se tijekom ciklusa pražnjenja kutna brzina smanjuje. Ovo omogućuje zamašnjaku da efikasno pohrani i oslobodi energiju prema potrebama sustava.

Zamašnjaci su iznimno brzi u reagiranju na promjene u mreži (vrijeme odziva od oko 1ms do nekoliko sekundi), što ih čini pogodnima za kratkotrajno skladištenje energije, odgovarajuće sklopne operacije i regulaciju frekvencije. Također imaju sposobnost apsorpiranja velikog raspona snaga. Snaga zamašnjaka varira između 0,1 i 20 MW.

Uz veliku masu, zamašnjaci obično imaju veliki volumen. Zbog velike mase i velikog volumena, tijekom rada dolazi do velikog trenja, što je posebno vidljivo na ležajevima. Da bi se smanjilo trenje, moguće je koristiti magnetske ležajeve (osobito pri većim kutnim brzinama) i postaviti zamašnjak u vakuum. Ovim metodama smanjuje se težina i volumen volana, ali se istodobno povećava njegova cijena. Primjer zamašnjaka u vakuumu sa magnetnim ležajevima prikazana je na slici ispod (Slika 3)



**Slika 6 shematski primjer zamašnjaka [11]**

Zbog jednostavnosti principa rada, zamašnjake karakterizira visoka učinkovitost, vrlo visoka pouzdanost i dug životni vijek od više od 20 godina. Međutim, nedostatak je izuzetno kratko vrijeme akumulacije energije, koje doseže 15 minuta. Imaju visok stupanj samopražnjenja. Nedostatak zamašnjaka su visoki investicijski troškovi u pogledu performansi (od 500 do 2.000 \$/kW), ali i u pogledu skladištenja energije (od 2.000 do 8.000 \$/kWh). [1]

Zamašnjaci često su integrirani kao pomoćni izvor energije zajedno s drugim primarnim izvorom i koriste se za poboljšanje performansi primarnog izvora. U prijenosnoj mreži mogu služiti kao rezerva te za stabilizaciju napona i frekvencije. Također se mogu integrirati u konvencionalne elektrane na fosilna goriva kako bi se osiguralo pravilno funkcioniranje rotirajućih generatora (slično zamašnjaku motora s unutarnjim izgaranjem).

Primjer zamašnjaka s funkcijom pohrane energije je elektrana Beacon Power u Stephentownu (New York, Sjedinjene Američke Države) koja je u pogonu od 2011. godine. Elektrana se sastoji od 200 zamašnjaka u vakuumskim komorama ukupne snage 20 MW (ukupni raspon 40 MW). Osnovna zadaća sustava je regulacija frekvencije, pri čemu zamašnjaci prolaze kroz 3000 do 5000 potpunih ciklusa dubokog pražnjenja godišnje.

## 2.2. Električni sustavi

Električni sustavi omogućuju pohranu električne energije bez potrebe za pretvaranjem u druge oblike energije, poput mehaničke, toplinske ili potencijalne energije. Ovo se postiže kroz dva oblika pohrane: elektromagnetski i elektrostatički.

Elektromagnetski oblik pohrane koristi se za pohranu električne energije u obliku magnetskog polja. Glavni predstavnici ovog oblika pohrane su ultrakondenzatori.

S druge strane, elektrostatički oblik pohrane koristi se za pohranu energije kroz električne potencijale, odnosno elektrostatiku. Glavni predstavnici ovog oblika pohrane su supravodljivi magneti (SMES). Ovi sustavi koriste svojstva supravodljivosti za stvaranje snažnih magnetskih polja koja mogu pohraniti velike količine energije.

Ovi energetske sustavi omogućuju efikasnu i pouzdanu pohranu električne energije, što je ključno za stabilnost i pouzdanost modernih energetskih mreža.

### 2.2.1. Ultrakondenzatori

Ultrakondenzatori, poznati i kao superkondenzatori, rade na principu akumulacije električnih naboja na sučelju između elektroda (elektroničkih vodiča) i elektrolita (vodene ili organska, ionske otopine) [40].

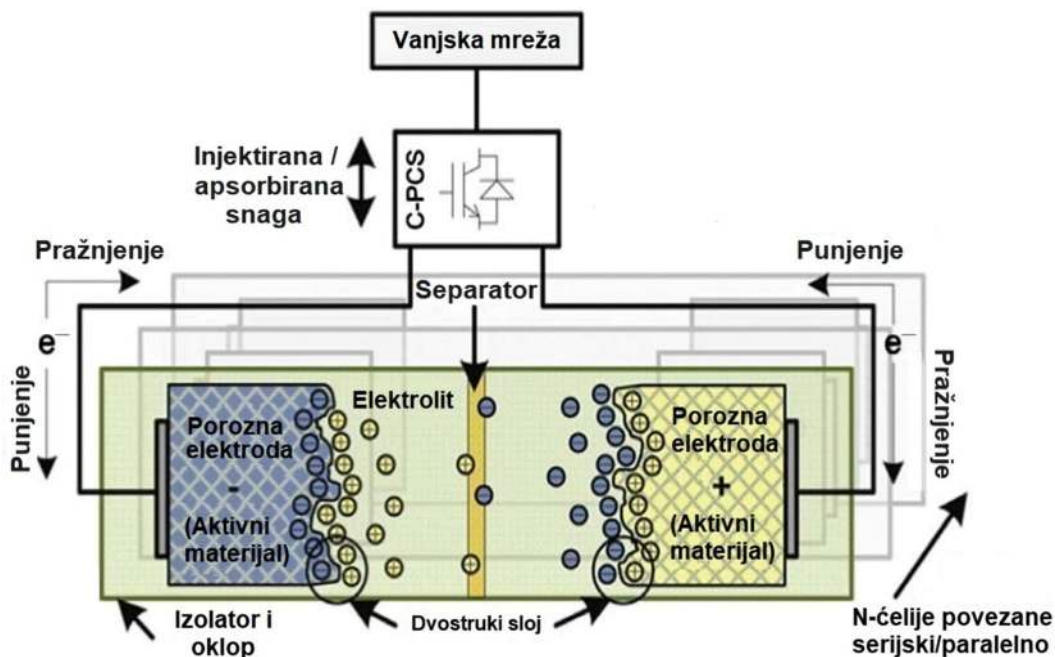
Elektrode su uronjene u elektrolit koji tvori dvostruki sloj. Na ovaj način, energija se pohranjuje elektrostatički, te se ne događa redoks reakcija koja je tipična za konvencionalne baterije. To znači da ultrakondenzatori djeluju kao skladišta energije, pohranjujući elektrostatičku energiju u električno polje. Količina pohranjene energije ovisi o kapacitetu i kvadratu napona na krajevima kondenzatora. [1]

$$E = \frac{CV^2}{2} \quad (4)$$

C - kapacitet

V - napon na krajevima (terminalima) ultrakondenzatora

Ultrakondenzatori se temelje na klasičnoj tehnologiji kondenzatora. Primarno se koriste za pohranu snage jer mogu pohraniti visoku specifičnu snagu prema masi (otprilike 10 kW/kg) s ciklusima pražnjenja i punjenja od 500 000 do 1 000 000 ciklusa. Ciklusi se mogu dogoditi iznimno brzo, a vrijeme odziva je nekoliko milisekundi.



**Slika 7 shematski prikaz ultrakondenzatora [15]**

Visoki specifični kapacitet ultrakondenzatora postiže se kroz veliku površinu koja se stvara nanošenjem aktivnog ugljena na aluminijsku foliju. Dodatno, uranjanje elektroda u elektrolit s otopljenim ionima također doprinosi povećanju specifičnog kapaciteta. Izlazna struja ultrakondenzatora određuje se na temelju vrijednosti ekvivalentnog serijskog otpora.

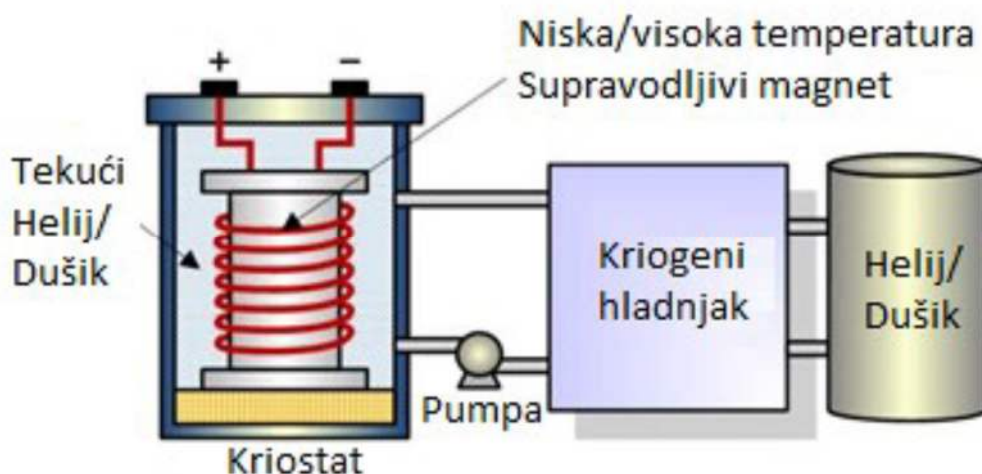
Unatoč iznimno niskom ukupnom kapacitetu pohrane, ultrakondenzatori se koriste za kompenzaciju iznenadnih, kratkotrajnih promjena u električnoj mreži. Napon elementa varira između 2,7 i 2,85 V. Kombiniranjem elemenata spojenih serijski i paralelno, dobivaju se potrebne vrijednosti napona i kapaciteta za korištenje u prijenosnoj mreži. Vremenski interval pražnjenja varira od 1 milisekunde do 1 minute. Maksimalne nominalne snage mogu doseći do 0,3 MW. Uređaji energetske elektronike koriste se za nadzor i upravljanje (balansiranje elemenata) skupine ultrakondenzatora tijekom ciklusa punjenja i pražnjenja. Ova tehnologija pohrane ima dodatnu prednost u dugom vijeku trajanja i malim operativnim gubicima. Međutim, postoji nedostatak u obliku povećanog stupnja samopražnjenja. Iako su troškovi ulaganja u odnosu na snagu niski, između 100 i 500 \$/kW, troškovi u odnosu na kapacitet pohrane energije su visoki, između 10.000 i 20.000 \$/kWh. [1]

Ultrakondenzatori se mogu klasificirati u tri različite potkategorije:

- Prva potkategorija obuhvaća dvoslojne kondenzatore, koji funkcioniraju na principu reverzibilnog nakupljanja iona na površini porozne elektrode.
- Druga potkategorija uključuje pseudokondenzatore, koji koriste reverzibilnu redoks reakciju s ionima elektrolita, pri čemu ioni reagiraju s površinskim funkcionalnim dijelovima.
- Treća potkategorija obuhvaća hibridne kondenzatore, koji predstavljaju kombinaciju faradične baterije i dvoslojne neofaradne električne elektrode tipa kondenzatora.

### 2.2.2. Supravodljivi magneti (SMES)

Supravodljivi magneti (SMES) pohranjuju električnu energiju u obliku elektromagnetske energije, odnosno magnetskog polja. Ovo se postiže tako da se supravodljiva zavojnica stavi u vakuum i ohladi ispod kritične temperature, a zatim se u nju pušta istosmjerna struja. Kada se supravodljiva zavojnica ohladi ispod kritične točke, njen otpor postaje približan nuli. Zbog toga struja nastavlja teći kroz zavojnicu čak i kada je vanjski izvor napajanja isključen. Primjer takvog magneta je naveden u slici ispod (Slika 5).



**Slika 8 shematski prikaz supravodljivog magneta [17]**

Zbog specifičnog geometrijskog oblika zavojnice, struja koja teče kroz nju stvara magnetsko polje, koje predstavlja pohranjenu energiju. S obzirom da supravodljiva zavojnica praktički nema otpora, električna struja neprestano teče kroz nju, omogućujući kontinuiranu pohranu elektromagnetske energije. Količina pohranjene energije ovisi o induktivitetu zavojnice i kvadratu struje koja teče kroz nju.

$$E = \frac{Li^2}{2} \quad (5)$$

L - induktivitet zavojnice  
i - struja unutar zavojnice

Supravodljivi magneti imaju brojne prednosti. Između ostalog, odlikuju se vrlo kratkim vremenima odziva, što može biti do nekoliko sekundi pa i čak trenutno, ovisno o dizajnu. Također, imaju visoku učinkovitost pretvorbe energije, koja može doseći do 97%. Osim toga, dugotrajni su i imaju kapacitete skladištenja energije između 1 i 10 MW. Ove karakteristike čine supravodljive magnete iznimno korisnim u različitim aplikacijama gdje je potrebna brza i učinkovita pohrana energije. Trenutno, ovi sustavi imaju nekoliko nedostataka. Prvi je visoki investicijski trošak, koji uključuje cijenu supravodljivog materijala i kriogenih strojeva, kao i nedovoljnu tehnološku razvijenost. Drugi nedostatak je

visok stupanj samopražnjenja, posebno kada se uzme u obzir energija potrošena na hlađenje kriogen tekućinom. Treći nedostatak su visoki operativni troškovi, koji se odnose na potrošnju energije za hlađenje supravodljive zavojnice. Zbog ovih razloga, ova vrsta spremnika trenutno se ne koristi u komercijalne svrhe. Kada se uzme u obzir kapacitet pohrane energije, cijena je visoka i prelazi 10.000 dolara/kW. Međutim, s obzirom na snagu, cijena je relativno niska, oko 300 dolara/kWh. [1]

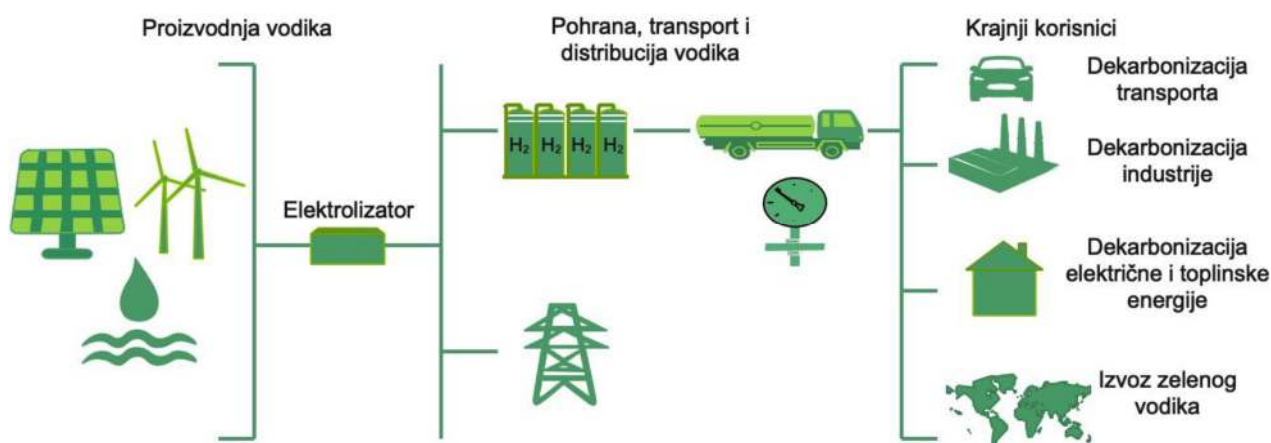
## 2.3. Kemijski sustavi

Kemijski sustavi pohranjuju energiju u obliku kemijskih tvari, odnosno goriva (krutih, tekućih ili plinovitih), koje sadrže određenu količinu kemijske energije. Ova energija je unutarnja energija koja je pohranjena na atomskoj razini (u kemijskim vezama atoma i molekula). Kroz kemijske reakcije, ova pohranjena energija se pretvara u električnu energiju koja se koristi za obavljanje korisnog rada.

Najčešći sustavi su tehnologije kemijske pretvorbe (P2G), čija je ključna značajka skladištenje vodika i/ili metana.

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

Ova tehnologija, poznata kao Power-to-Gas (P2G), koristi vodik ili metan kao sredstvo za pohranu energije. Prvi način koristi samo vodik za skladište energije, dok se u drugom koristi metan proizveden iz vodika. Proces pohrane uključuje spremanje vodika ( $H_2$ ) u odgovarajućem agregatnom stanju (plin, tekućina, krutina) unutar odgovarajućeg spremnika [13]. Primjer cijelog procesa je opisan slikom ispod (Slika 6).



**Slika 9** shema vodikovog lanca vrijednosti, od proizvodnje do krajnjeg korištenja [12]

Vodik se dobiva postupkom elektrolize deionizirane vode, tijekom kojeg se voda razdvaja vodik i kisik:



$\text{H}_2\text{O}$  - molekula vode,

$\text{H}_2$  - molekula vodika,

$\text{O}_2$  - molekula kisika

Uređaj koji se koristi za proizvodnju vodika poznat je kao elektrolizator. No, elektrolizator nije potpuno učinkovit i tijekom procesa pretvorbe dolazi do gubitka energije u obliku topline, u ispravljaču i pomoćne opreme (kompresor). Posljedica toga je učinkovitost između 56 i 73%, pri čemu se ona izračunava na temelju veće kalorijske vrijednosti vodika. Dvije su glavne kategorije elektrolizatora: sa protonskom izmjenjivačkom membranom (PEM) i alkalni elektrolizator. PEM je učinkovitiji u odnosu na alkalni. [13]

Vodik se može generirati i iz rafinerijskih plinova i metana, kao i ekstrakcijom fosilnih goriva. Međutim, najčešći postupak je elektroliza, jer je učinkovitiji od drugih metoda, a proizvodnja vodika rezultira ekološki prihvatljivim nusproizvodima (voda).

Pohranjeni vodik se zatim može upotrijebiti za generiranje metana ili električne energije. Koristeći gorivu ćeliju (fuel cell), vodik se pretvara u električnu energiju. Vodik je potrebno kemijski obraditi do određene čistoće zbog održivosti procesa.

Problemi vezani za vodik većinom su visoki troškovi zbog relativno nove tehnologije, zapaljivost i eksplozivnost samog vodika, ograničene kapacitete spremnika, niska učinkovitost te jako velika utrošena energija za komprimiranje vodika (do deset puta veća u odnosu na metan). Skladištenje vodika predstavlja veliki izazov. Vodik je jako mala molekula ( $\text{H}_2$ ), te je problematično projektirati spremnike koji ga neće propuštati. Molekule se mogu probiti kroz spojeve dijelova. Postoji sustav u kojem se vodik koristi za sintezu prirodnog plina (metanizacija), pri čemu se proizvedeni metan dovodi u plinsku mrežu ili se koristi za pogon plinskih turbine. Sabatierovim procesom metan nastaje jakim tlačenjem i pri visokoj temperaturi. Spajanjem četiri molekule vodika s jednom molekulom ugljičnog dioksida; kao nusprodukt nastaju dvije molekule vodene pare.





$H_2$  - molekula vodika

$CO_2$  - molekula ugljičnog dioksida

$CH_4$  - molekula metana

$H_2O$  - molekula vodene pare

Zbog reakcija plinova s materijalima u plinovodima, kompresorima i ostaloj plinskoj opremi, pohrana se odvija samo u podzemnim šupljinama. Potrebno je napraviti mješavinu vodika (55%) i metana (45%), te ih tako skladištiti. Također, vodik se može vezati na metale, može se i ukapljivati hlađenjem pod pritiskom. Učinkovitost skladištenja metana je 42% - 58%. Primjenom P2G sustava u elektrani na bioplin, moguće je postići veću učinkovitost. Toplina koja se generira tijekom elektrolize može se iskoristiti u procesu fermentacij. S obzirom da elektrani na bioplin također ispuštaju ugljični dioksid ( $CO_2$ ), on se može upotrijebiti u kasnijem procesu za proizvodnju mješavine metana i vodika. Time se povećava učinkovitost sustava, te se proizvodi ekološki prihvatljiviji vodik.

Investicijska cijena P2G sustava je između 900 \$ i 2200 \$/kW, ovisno o vrsti postrojenja.

### 2.3.2. Toplinski sustavi

Sustavi za pohranu toplinske energije - TES (Thermal Energy Storage) omogućuju pohranu energije u obliku topline ili hladnoće. Pohranjuje se u materijalima koji mogu održavati određene temperature u izoliranim uvjetima. Ovi toplinski sustavi su uređaji za pohranu energije koji pohranjuju toplinsku energiju na temperaturama raspona  $-40\text{ }^\circ\text{C}$  i  $400\text{ }^\circ\text{C}$ . Zbog male učinkovitosti samog sustava, često se integriraju u druge sustave, poput CAES, kako bi se iskoristila otpadna toplina. Odlika ovih sustava je pohrana velike količine energije te sposobnost pohrane do nekoliko dana. [1]

Dijelimo ih na aktivne i pasivne sustave skladištenja. Aktivni sustavi skladištenja temelje se na procesu prijenosa topline prisilnom konvekcijom 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, pasivni sustavi skladištenja sadrže dva medija, a tekućina za prijenos topline samo teče kroz medij kako bi ispunila i ispraznila kruti materijal. Toplinski sustavi se mogu podijeliti u tri potkategorije: osjetno skladištenje topline, latentno skladištenje topline i termokemijsko skladištenje.

### 2.3.3. Pohrana osjetne topline

Pohrana osjetne topline (sensible heat storage) funkcionira na principu promjene temperature materijala. Kada se određena količina energije unese u materijal, dolazi do zagrijavanja materijala, dok odvođenje energije iz materijala rezultira hlađenjem materijala. Odabir materijala temelji se na zahtjevima za toplinskim kapacitetom, veličinom prostora, gustoćom materijala, toplinskom vodljivošću materijala, električnom vodljivošću (izolacijom), kemijskom stabilnošću itd. Često se koriste čvrsti ili tekući materijali poput ulja, vode, kamena, granita i betona. Količina topline pohranjena u materijalu proporcionalna je masi materijala, temperaturnoj razlici i specifičnoj toplini. [20]

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (8)$$

$m$  - masa materijala pohrane [kg]

$c_p$  - specifični toplinski kapacitet materijala [J/(kgK)]

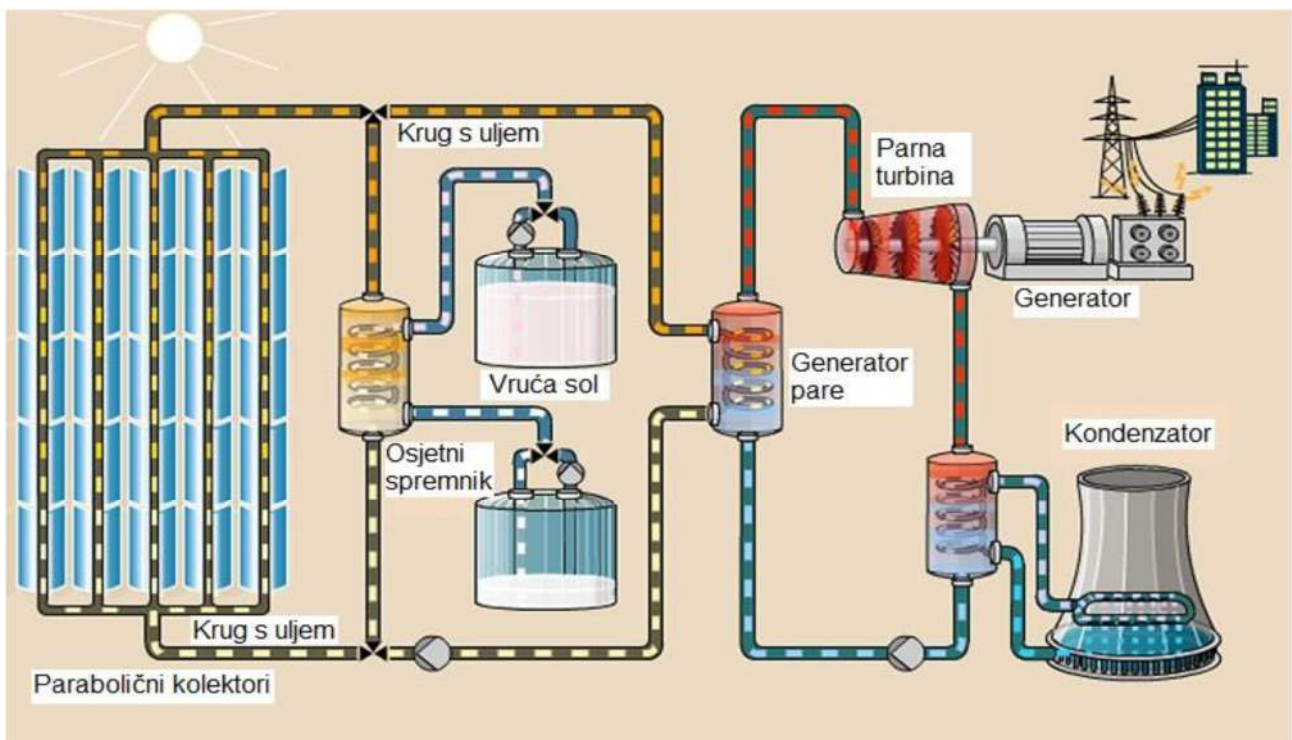
$\Delta T$  - promjena temperature [K]

Snaga (MW)	Vrijeme (sati)	Pijesak (\$/kWh)	Visokotemperaturna Sol (\$/kWh)	Niskotemperaturna Sol (\$/kWh)	Beton (\$/kWh)	Kompozit (\$/kWh)
100	4				39.9	39.9
	6				34.5	34.5 - 193.5
	8	13.2			31.8	18.8 - 191.3
	10	11.3	103.7	64.2	30.1	4.5 - 189.5
	24	7.0	101.3	62.7	26.0	7.0 - 183
	100	4.6	97.5	60.3	23.1	4.6 - 172.7
1,000	4				39.0	39.0
	6				33.9	4.5 - 176.3
	8	12.9			29.9	1.9 - 174.3
	10	11.1	97.5	60.3	28.3	1.2 - 172.7
	24	6.8	95.2	58.9	24.4	6.8 - 166.8
	100	4.4	91.6	56.7	21.8	4.4 - 157.4

**Tablica 1** Troškovi sustava sa različitim materijalima u odnosu na vrijeme pohrane [5]

Kapacitet ovisi o temperaturnim granicama. Za prijenos energije često se koriste rastaljene soli u obliku tekućine koja služi za prijenos topline. U pravilu ovaj se tip ne koristi za direktno skladištenje energije, već kao podrška neujednačenoj proizvodnji energije iz obnovljivih izvora, najčešće u CSP (Concentrated Solar Power) sustavima.

Za dugotrajnu pohranu energije mogu se koristiti dizalice topline, koje pohranjuju toplinsku energiju uz visoku učinkovitost. Tijekom faze pohrane, visokotemperaturna tekućina se komprimira u spremniku. Tokom pražnjenja, fluid se koristi za pogon turbogeneratora. Učinkovitost sustava varira oko 70% [20]. Primjer je prikazana na slici ispod (Slika 21).



**Slika 10** Solarna termoelektrana s osjetnim spremnicima topline [21]

### 2.3.4. Pohrana latentne topline

Skladištenje energije putem latentne topline temelji se na faznom prijelazu materijala, tj, latentne tekuće-parne faze fluida, što omogućuje veću gustoću energije. Kod korištenja fluida, povećani zauzeti volumen parne faze predstavlja izazov. Stoga je poželjno koristiti tekuće-krutog fluida, koristeći latentnu toplinu koja se stvara tijekom procesa taljenja i skrućivanja. Tijekom taljenja, energija se pohranjuje u materijalu kao toplina i oslobađa se kada materijal očvrstne. Voda (u kombinaciji sa solju) je najčešća tvar koja se primjenjuje za ovu svrhu, dok su efikasnije tvari različiti kloridi, parafini, nitrati, hidroksidi itd. Kapacitet skladištenja primjenom ovih nije velik, ali je znatno veći od pohrane osjetne topline. [20]

$$Q = m \cdot \Delta h \quad (9)$$

$m$  - masa materijala pohrane [kg]

$\Delta h$  - entalpija fazne promjene [J/kg]

Količina topline (energije, [J]) pohranjena u materijalu ograničena je temperaturnim granicama. Latentno skladištenje topline još je uvijek u testnoj fazi. [1]

### 2.3.5. Termokemijska pohrana energije

Termokemijsko skladištenje je proces koji kombinira kemijske reakcije i sorpcijske sustave (otvorene ili zatvorene) kako bi pohranio velike količine energije kao rezultat kemijskih reakcija koje se odvijaju na temperaturama do 400 °C. U osnovi, energija (toplina) se akumulira unutar materijala tijekom procesa desorpcije, odnosno uklanjanja adsorbiranih (vezanih) komponenti (plina ili tekućine) s unutarnje površine poroznog materijala. Reakcijski proizvodi se pohranjuju odvojeno. Pohranjena energija može se koristiti u obliku oslobođene topline kroz suprotne reakcije, na primjer kroz adsorpciju (vezivanje plinova ili tekućina na unutarnju površinu poroznog materijala). Pri odabiru materijala važni su parametri porast temperature, krivulje razgradnje, koeficijent toplinske učinkovitosti i gustoća energije u odnosu na volumen adsorbensa. Najpopularniji adsorbenti su silika gelovi i zeoliti. Uobičajeno korištene reakcije uključuju karbonizaciju, hidrataciju, razgradnju amonijaka, oksidaciju metala i cikluse sumpora. Ova vrsta skladištenja općenito ima bolja svojstva od latentnog i osjetnog skladištenja topline. Zahvaljujući odvojenom skladištenju proizvoda, termokemijsko skladište se može koristiti za dugoročno skladištenje energije. Nedostatak skladištenja (kemijske reakcije krutina-plin) su niska termodinamička učinkovitost osnovnog ciklusa i slab prijenos topline i mase u reaktivnom sloju. Kapacitet skladištenja energije ograničen je temperaturom adsorpcije. [20]

Moguća primjena termokemijskog skladištenja je kombinacija sa solarnim koncentradorima i parnom turbinom. U solarnim koncentradorima koncentracija sunčevog zračenja u prijemniku/reaktoru dovodi do vrlo visokih temperatura (cca. 700 °C), pri kojima se pumpani (isporučeni) amonijak reverzibilno razlaže na dušik i vodik. Kada se dušik i plinoviti vodik sintetiziraju u reaktoru amonijaka, stvara se velika količina topline (oslobađanje energije). Stvorena toplina stvara paru koja pokreće parnu turbinu na koju je mehanički spojen generator koji proizvodi električnu energiju koja se pušta u mrežu. Tekući amonijak je pohranjen u spremniku, a energija je zapravo pohranjena kao kemijska energija vodika. Izmjenjivači topline koriste se za prijenos topline s toplijih izlaznih produkata na hladnije reaktante, održavajući spremnik i cjevovod na temperaturi okoline. [23]

## 2.4. Elektrokemijski sustavi

Elektrokemijsko skladištenje energije je najčešći oblik skladištenja energije u gotovo svim područjima tehnologije. Električna energija može se kemijski pohraniti koristeći baterijske spremnike ili protočne baterije. Određeni spremnici energije, poput punjivih baterija, mogu se više puta puniti i prazniti, dok se spremnici energije poput klasičnih, ne punjivih baterija (na primjer, alkalnih) mogu napuniti i isprazniti samo jednom (pod uvjetom da se zadovolje sigurnost i pouzdanost baterije). S gledišta spremnika energije u elektroenergetskom sustavu, razmatraju se isključivo punjivi oblici spremnika energije.

### 2.4.1. Baterijski sustav (BESS)

Baterijski sustav za pohranu, ili BESS, sastoji se od nekoliko ključnih komponenti: baterijskog sustava, sustava za upravljanje baterijom (BMS), sustava za pretvorbu energije (PCS) i sustava za upravljanje energijom (EMS). Baterijski sustav je skupina pojedinačnih baterija koje su grupirane u module, a zatim organizirane u skupine baterija, često u obliku spremnika. BMS nadzire sigurnost baterijskog sustava prateći različite parametre poput temperature, stanja napunjenosti i temperature sklopa ćelija. PCS se sastoji od dvosmjernih usmjerivača koji pretvaraju električnu energiju iz DC u AC tijekom ciklusa pražnjenja i iz AC u DC tijekom ciklusa punjenja. EMS nadzire i upravlja protokom energije u bateriji, koordinira i usklađuje ostale elemente spremnika baterije te prikuplja, obrađuje i šalje podatke.

Osim ovih osnovnih elemenata, BESS obično uključuje dodatne sigurnosne elemente poput automatskog sustava za gašenje požara, detektora dima, sustava kontrole sobne temperature, ventilacije te sustavi grijanja i hlađenja baterija. BESS ima brojne prednosti poput brzog odziva, dugog životnog vijeka (od oko 5 do 15 godina), visoke učinkovitosti (od 70 do 90%) te mogućnosti dobivanja velikih kapaciteta pohrane električne energije i velikih izlaznih snaga. Investicijski troškovi između 500 do 650 \$/kW ili između 175 i 200 \$/kWh. [1]

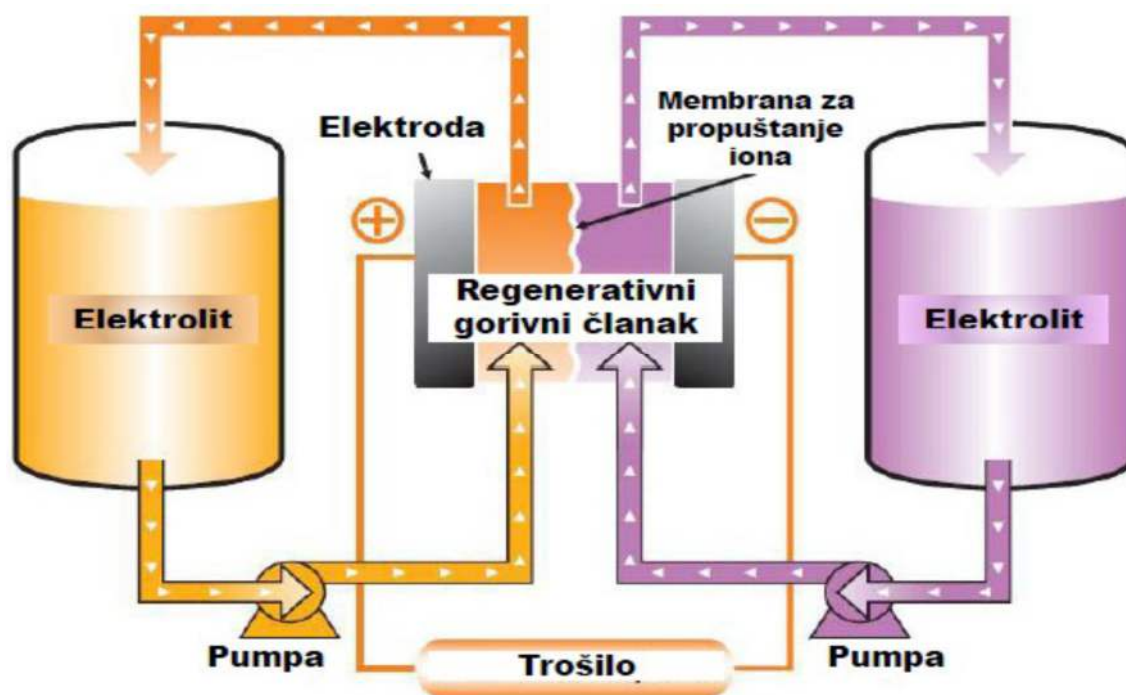


**Slika 11** Primjer baterijskog sustava uz obnovljive izvore energije [19]

## 2.4.2. Protočne baterije

Protočne baterije se od konvencionalnih elektrokemijskih baterija razlikuju po tome što tijekom elektrokemijskih reakcija na elektrodama ne nastaju čvrsti spojevi. To omogućuje neograničen kapacitet baterije, jer je masa koja se stvara na elektrodama neograničena. Glavna karakteristika protočnih baterija je tekući elektrolit (aktivni reagens) koji cirkulira u sustavu baterije i sadrži tekuće kemijske spojeve koji su odgovorni za pohranu energije. Elektrolit se pumpa između spremnika (spremnika pozitivnog elektrolita ili anolita i spremnika negativnog elektrolita ili katolita) i elektrokemijskog pretvarača. Veličina spremnika elektrolita određuje energiju, dok se veličina elektrokemijskog pretvarača određuje prema snazi.

Protočne baterije postižu učinkovitost do 85% i dug životni vijek od 15 do 20 godina. Cijena kapaciteta za pohranu energije znatno je viša od cijene baterijskih spremnika i kreće se između 700 i 2500 \$/kWh. Primjer pohrane energije u obliku protočnih baterija je integrirani sustav baterija u gradu Dalianu u Kini, koji je pušten u rad u svibnju 2022. Sustav se sastoji od 100 MW vanadijevih redoks baterija s kapacitetom skladištenja od 400 MWh. Osnovne funkcije rezervoara uključuju prebacivanje vršnih opterećenja, podršku pomoćnoj energiji za novoosnovane tvrtke na crnom tržištu i potencijalno pružanje dodatnih kapaciteta iz obnovljivih izvora energije. [27]



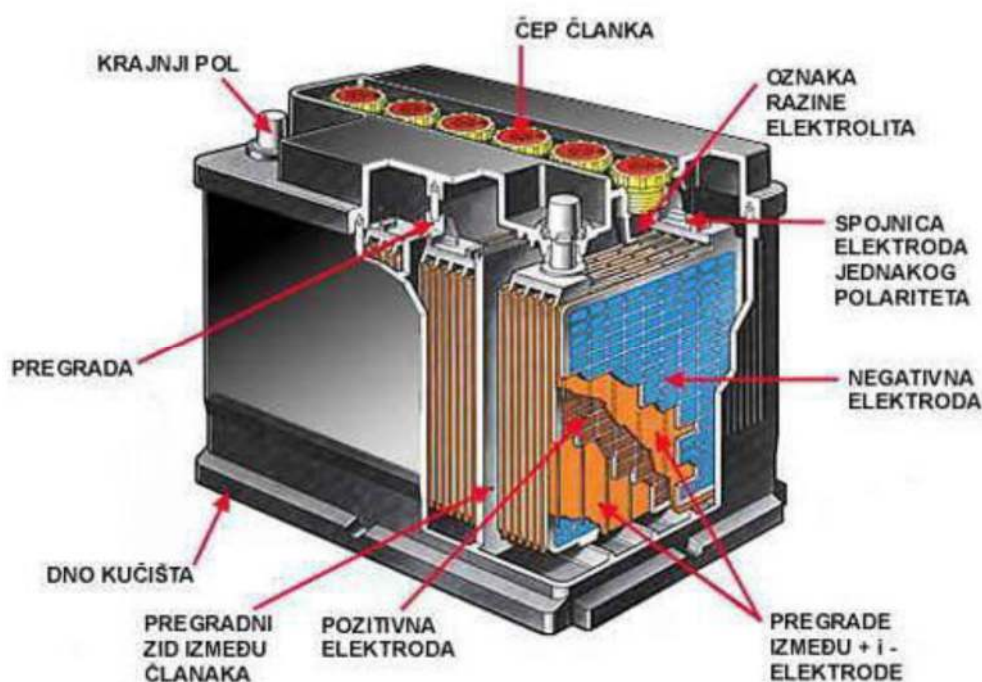
Slika 12 shema protočne baterije [49]



### 2.4.3. Olovno-kiselinske baterije

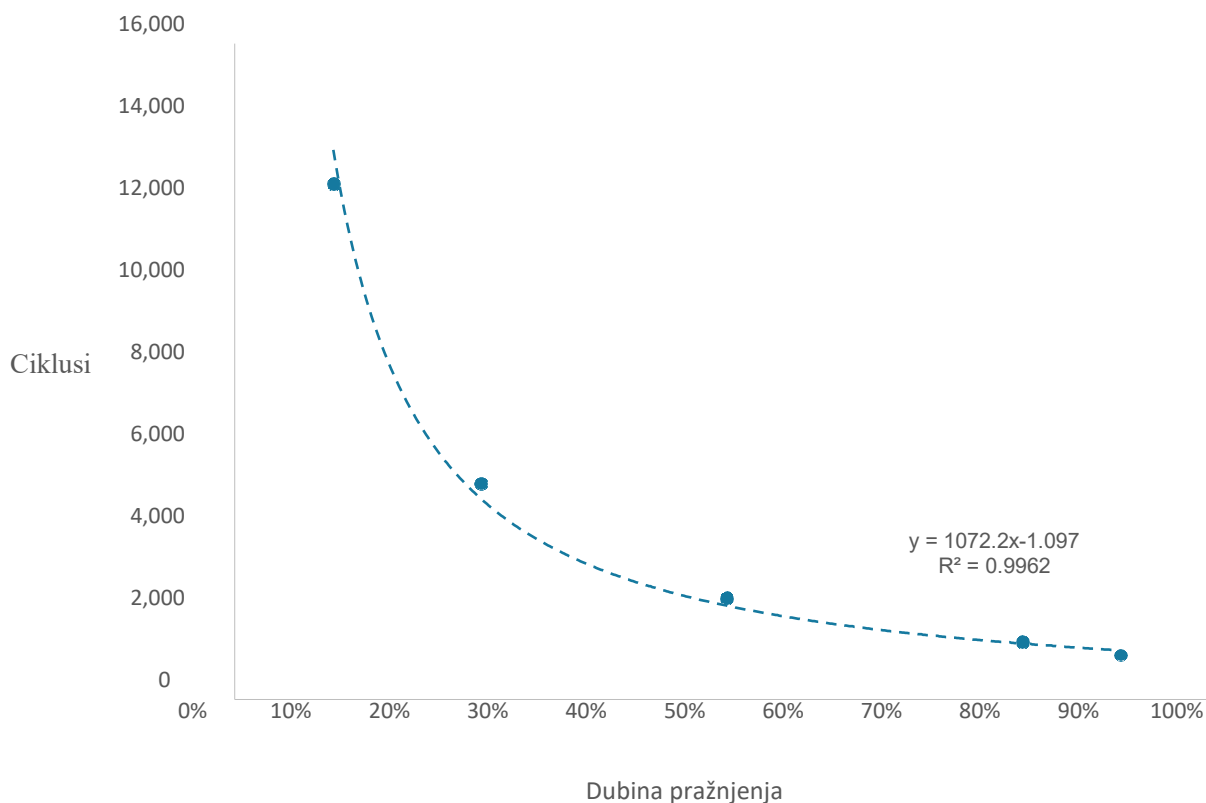
Olovne baterije, koje su najstarije tehnologije za pohranu energije dostupne na tržištu, često se koriste u sektoru transporta kao spremnici energije za napajanje električnih sustava transportnih vozila. Njihova visoka pouzdanost i niska cijena čine ih široko primjenjivima. Ove iznimno sofisticirane tehnologije za pohranu energije postoje već gotovo dvjesto godina (izumio ju je Gaston Planté 1858. godine).

Međutim, olovne baterije imaju nekoliko nedostataka, uključujući mali kapacitet pohrane energije u odnosu na masu baterije (do 30 Wh/kg) i ograničeni broj maksimalnih ciklusa punjenja i pražnjenja (do 1000 dubokih ciklusa). Također, kada su olovno-kiselinske baterije duboko ispražnjene, rade na visokim temperaturama ili je stanje napunjenosti prenisko, dolazi do trajnog oštećenja olovnih baterija zbog stvaranja kristala olovnog sulfata na elektrodama, koji trajno smanjuju kapacitet i izlaznu snagu akumulatora.



**Slika 13** Presjek olovne baterije [50]

Unutarnji otpor baterije je nizak i minimalan pri maksimalnom opterećenju. To omogućuje olovnim baterijama da postignu visoku izlaznu snagu (do deset puta veću struju od nazivnog kapaciteta). Pražnjenje baterije smanjuje izlaznu struju. Nazivni napon članka je približno 2 V. Prosječni životni vijek je približno 6 godina ili 500 do 1000 ciklusa. Stopa samopražnjenja je otprilike 4-6% mjesečno. [1, 7]



**Slika 14** Ovisnost broja ciklusa o dubini pražnjenja [5]

Dijagram prikazuje broju ciklusa koji baterija može podnijeti ovisno o dubini pražnjenja. Ako bateriju ne praznimo više od 50%, može podnijeti do 2000 ciklusa. Kako baterije većinom praznimo do 80% DOD-a, baterija ima maksimalan broj ciklusa oko 1000.

Ove baterije dijelimo u pet osnovnih kategorija:

Prva kategorija obuhvaća starter baterije koje su konstruirane za kontinuirano punjenje i pružaju iznimno visoku izlaznu snagu (struju) u kratkom vremenskom razdoblju. Starter baterije se često koriste u motorima s unutarnjim izgaranjem kako bi osigurale veliku struju električnom starteru, napajale sustav paljenja goriva i druge električne sustave. Ključna značajka ovih baterija je niska cijena, otprilike 0,2 \$/Wh za kapacitet.

Druga kategorija obuhvaća power baterije, koje se koriste kao izvor energije za pogon elektromotora u električnim vozilima poput viličara. Ove baterije imaju veći kapacitet od starter baterija, a njihovi funkcionalni i strukturni principi su slični. Prednost power baterija je njihova izdržljivost kada rade na niskoj razini napunjenosti. Također su dizajnirane za veliki broj ciklusa punjenja i pražnjenja. Specifična cijena energetske kapaciteta je otprilike 0,5 \$/Wh.

Treća kategorija uključuje gel elektrolitske baterije, poznate i kao gel baterije. Ove se baterije koriste u malim profesionalnim uređajima, poput radio komunikacija. Kapacitet pojedinačnih baterija je otprilike 100 Ah. Prednost gel baterija je njihova sposobnost rada u položajima gdje baterija nije okomita tijekom rada. Osim toga, ne zahtijevaju održavanje. Specifična cijena energetske kapaciteta je otprilike 0,6 \$/Wh.



Četvrta kategorija obuhvaća AGM (Absorbent Glass Mat) baterije, koje se karakteriziraju upotrebom sitnih staklenih vlakana koja apsorbiraju sumpornu kiselinu, čime se baterija čini otpornom na curenje elektrolita. Prednosti AGM baterija uključuju njihovu veliku izlaznu snagu (veliku struju), što rezultira iznimno niskim unutarnjim otporom i dugim vijekom trajanja. Međutim, nedostatak je ubrzano sušenje elektrolita i korozija pozitivne elektrode.

Peta kategorija obuhvaća stacionarne cijevne ploče. Dizajn cijevne ploče drži aktivni materijal zajedno i pritišće ga na rešetku za prikupljanje. Također, dizajn karakterizira struktura okvira koja se sastoji od niza okomitih stupova povezanih na zajedničku kolektorsku mrežu. Iznad svakog pola nalaze se mikroporozne izolacijske cijevi koje sadrže aktivnu masu olovnog oksida. Kombinacija svih navedenih komponenti stvara pozitivnu elektrodu (ploču). [7]

Primjer upotrebe olovnih baterija u prijenosnoj električnoj mreži je spremnik baterije od 10 MW s kapacitetom od 40 MWh izgrađen u gradu Chino, Kalifornija. Učinkovitost spremnika je približno 70% (ovisno o krivulji punjenja i pražnjenja).

Vrijeme (sati)	Maksimalni DOD (%)	Prilagođeni DOD (%)	Ciklusi
2	61.0%	58.0%	1,951
4	70.6%	68.1%	1,634
6	77.0%	75.0%	1,470
8	81.6%	79.9%	1,371
10	86.2%	80.0%	1,370
24	98.5%	80.0%	1,370
100	102.5%	80.0%	1,370

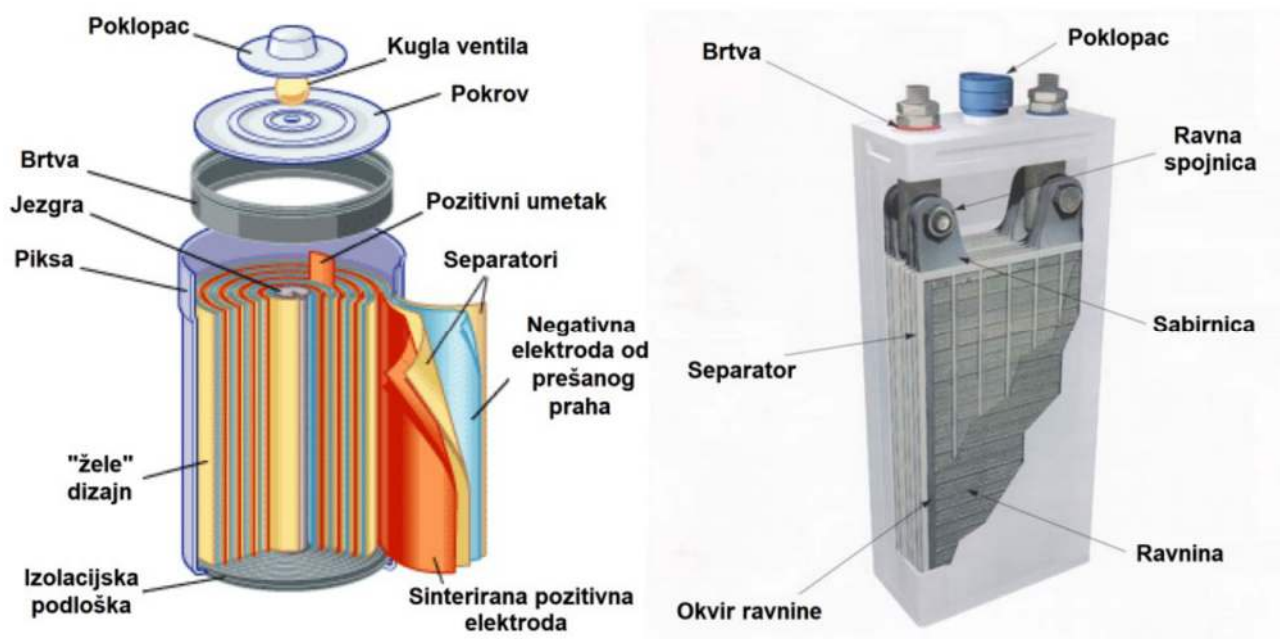
**Tablica 2** Predviđeni broj ciklusa i dubina pražnjenja u ovisnosti o vremenu [5]

Tablica prikazuje maksimalni mogući DOD te pretpostavljeni broj ciklusa koji baterija može podnijeti pri određenom DOD-u, ovisno o vremenu. Također, prikazan je prilagođeni (smanjeni) DOD, kako bi se povećao životni vijek baterije.

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

Baterije na bazi nikla obuhvaćaju dvije glavne tehnologije: nikal-kadmij (Ni-Cd) i nikal-metal hidrid (Ni-MH). Oba tipa imaju isti napon ćelije od približno 1,2 V i dvostruko veću snagu u odnosu na težinu u usporedbi s olovnim baterijama. Nikal-kadmijeva baterija je starija tehnologija skladištenja energije na bazi nikla. U prošlosti su se koristile u različitim aplikacijama, uključujući prijenosne elektroničke uređaje, električna radna vozila i prva električna vozila iz kraja 20. stoljeća. [1]

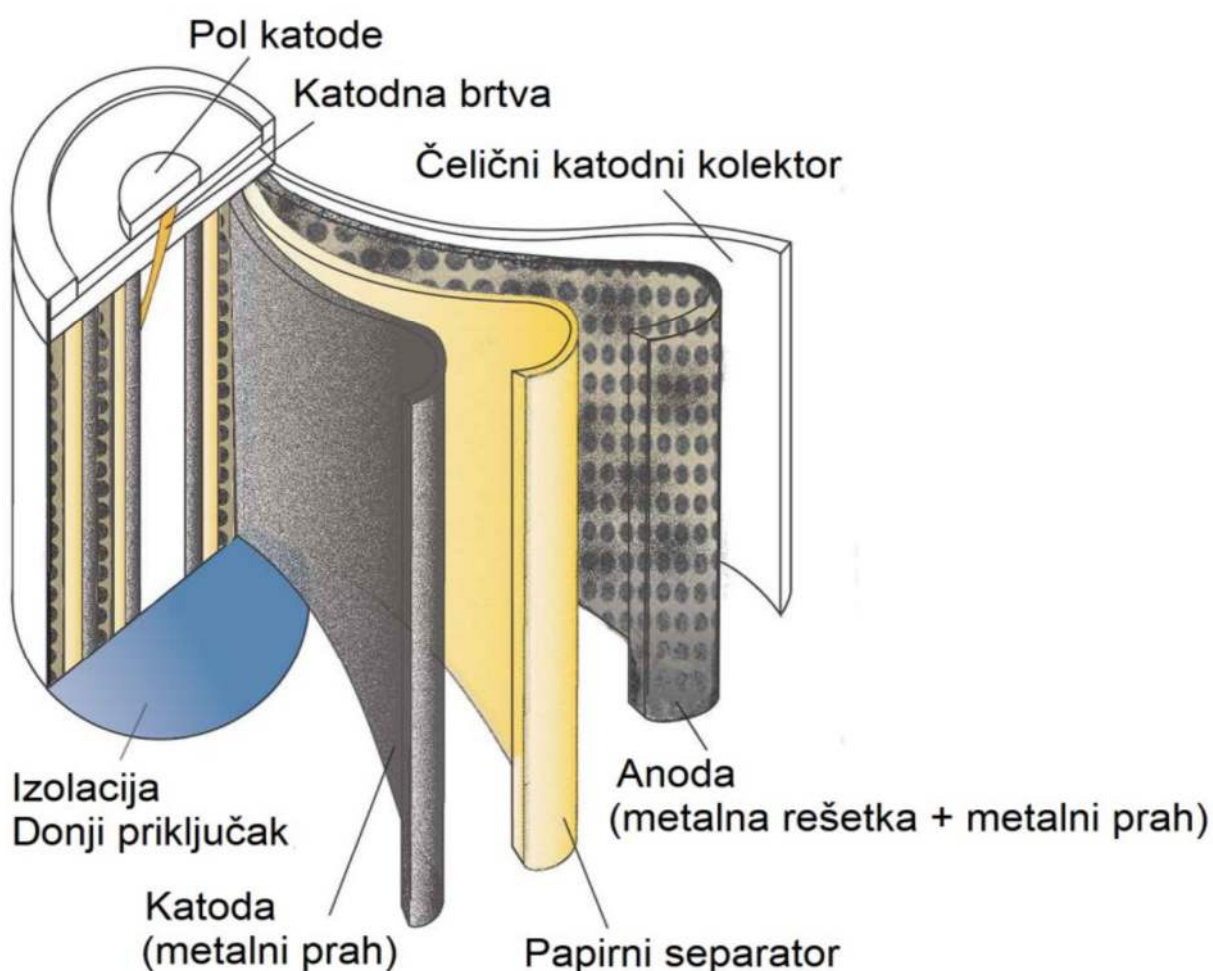
Gustoća energije Ni-Cd tehnologije je otprilike 60 MWh/kg. Međutim, zbog toksičnosti kadmija, upotreba ove tehnologije skladištenja se sve više ograničava. Također, zbog visokih troškova tehnologije, nije postignut značajan tehnološki napredak niti se proširio na energetski sektor. Životni vijek je oko 10 godina ili 500 do 1000 ciklusa, dok je stopa samopražnjenja 5-20% mjesečno. Primjer pohrane energije u elektroenergetskoj mreži pomoću nikal-kadmijeve tehnologije je rezervoar baterije u američkoj saveznoj državi Aljasci. Instalirani akumulatorski spremnik može osigurati 40 MW za 7 minuta, odnosno kapacitet od 4,7 MWh, te 27 MW za 15 minuta, odnosno kapacitet od 6,7 MWh.



**Slika 15 Presjek Ni-Cd baterije [15]**

Nikal-metal-hibridna baterija nova je tehnologija pohranjivanja koja je namijenjena zamjeni starijih nikal-kadmijevih (Ni-Cd) baterija. Prednost nikal-metal-hibridnih (Ni-MH) baterija je u tome što ne koriste kadmij, koji uklanja otrovne tvari iz sadržaja baterije. Gustoća energije veća je nego kod prethodne Ni-Cd tehnologije i iznosi oko 80 Wh/kg. [1]

Nazivni napon članka je 1,25 V. Prednosti su visoke struje pražnjenja i smanjeni učinak memorije u odnosu na Ni-Cd tehnologiju. Nedostaci uključuju nemogućnost funkcioniranja na niskim temperaturama, preporuka da se baterija ne puni dok se potpuno ne isprazni, stopa samopražnjenja koja se povećava na 15-25% mjesečno, te ograničen životni vijek od 2 do 5 godina ili 300 do 600 ciklusa punjenja i pražnjenja.



**Slika 16 Presjek (Ni-MH) baterije [15]**

#### 2.4.5. Natrij-sumpor baterije (NaS)

Natrij-sumporne baterije se odlikuju upotrebom keramičkog elektrolita koji, zahvaljujući dobroj ionskoj vodljivosti, ostaje u tekućem stanju. Stoga se ove baterije čuvaju na temperaturama između 290 i 350 °C. S obzirom na zapaljive karakteristike natrija, kućište natrij-sumporne baterije mora biti hermetički zatvoreno. Kemijske reakcije se događaju na elektrodama od tekućeg natrija (negativna elektroda) i sumpora (pozitivna elektroda).

Ova vrsta baterije ima prednost u velikom broju ciklusa punjenja i pražnjenja (preko 4.000 ciklusa, pod uvjetom da se baterija isprazni do 80% svog nazivnog kapaciteta), što omogućuje dugotrajnost baterije do 15 godina.

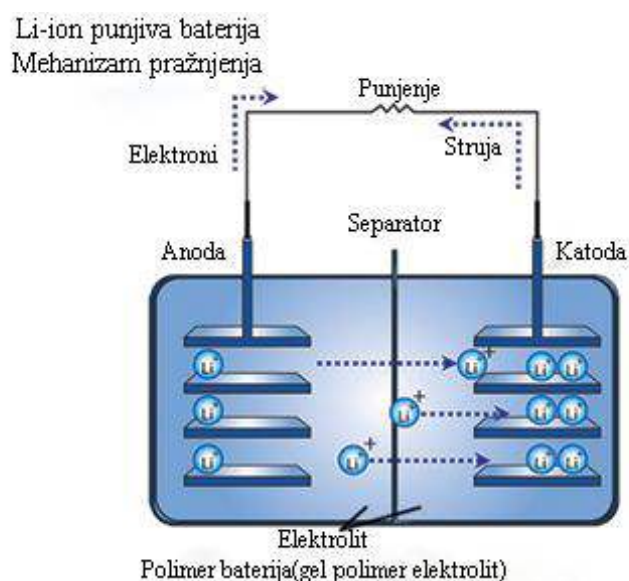
Kada govorimo o prosječnim parametrima tehnologije NaS baterija, gustoća energije iznosi 117 kWh/t, a učinkovitost ciklusa punjenja i pražnjenja prelazi 87% (ukupna učinkovitost sustava preko 17%). Niska cijena materijala koji se koriste u bateriji čini ih prikladnima za upotrebu u velikim mrežnim kapacitetima, gdje se mogu aktivno koristiti nekoliko sati, ovisno o opterećenju i namjeni. [27]

Natrij-sumporne baterije se primjenjuju za pohranu velikih količina energije, s tipičnim kapacitetima baterija koji dosežu nekoliko MWh (s izlaznom snagom od nekoliko MW i vremenskom konstantom od nekoliko sati).

Primjer upotrebe natrij-sumporne baterije u elektroenergetskoj mreži je baterijski sustav koji je postavljen u Japanu, s ukupnim kapacitetom od 244,8 MWh. Sustav se sastoji od 17 baterijskih jedinica kapaciteta 2 MW (ukupno 34 MW). Ovaj sustav baterija koristi se za pohranu energije generirane od strane vjetro-elektране snage 51 MW. Učinkovitost ovog spremnika baterija iznosi 75%. [1]

#### 2.4.6. Litij-ionske baterije (Li-ion)

Litij-ionske baterije generiraju električnu energiju putem kretanja litijevih iona s negativne elektrode, obično od grafita, do prijelaznog metalnog oksida poput kobalt dioksida ili mangana. Ove baterije su poznate po visokoj gustoći energije, što je količina energije koja se može pohraniti u odnosu na masu baterije. Također, imaju nisku stopu samopražnjenja (oko 2% mjesečno), što ih čini prikladnima za dugotrajno skladištenje energije. Broj ciklusa punjenja i pražnjenja može doseći oko 4.000 ciklusa, ovisno o razini pražnjenja baterije. Međutim, litij-ionske baterije imaju nedostatke poput visoke cijene i problema s odlaganjem i recikliranjem. Prosječni životni vijek je oko 10 godina. [1]



**Slika 17** Shema pražnjenja litij-ionske baterije [51]

Postoji nekoliko Litij-ionske tehnologija:

Litij-ionska (Li-ion) karakterizira činjenica da se litij održava u ionskom stanju. To je posljedica upotrebe spoja za umetanje, s pozitivnim elektrodama od kobalt mangan dioksida ili željeznog fosfata i negativnim elektrodama obično od grafita. Ova tehnologija litij-ionskih baterija karakterizira visoka gustoća energije (do 150 Wh/kg), nisko samopražnjenje, izbjegavanje efekta pamćenja i sloboda održavanja. Nedostatak ove tehnologije je nisko maksimalno pražnjenje, jer veće pražnjenje ubrzava proces starenja baterije. Još jedan nedostatak je potreba za korištenjem sigurnog sustava upravljanja baterijom (BMS), inače bi se baterija mogla smrznuti. Zbog nepravilnog korištenja baterije može doći do požara ili eksplozije.

Tehnologija litij-polimera (Li-Po), poznata i kao litij-polimer, razlikuje se od litij-ionske tehnologije jer koristi polimerni gel kao elektrolit. Ovo omogućava povećanu sigurnost baterije i smanjenu težinu. Međutim, ova tehnologija ima nedostatak u obliku više cijene u usporedbi s litij-ionskim baterijama.

Tehnologija Lithium Iron Phosphate (LFP) se odlikuje korištenjem negativne elektrode od litijevog metala. Ova tehnologija pruža visoku sigurnost baterije (mali rizik od eksplozije zahvaljujući čvrstom elektrolitu i elektrodama) i nema memorijski efekt. Gustoća energije može doseći oko 110 Wh/kg. Međutim, nedostatak je što se optimalno funkcioniranje može postići samo na visokim temperaturama (približno 85 °C).

NMC baterije su također vrsta litij baterije. Glavna razlika je da kod ovih vrsta, je uporaba složene legure koja sadrži nikal, mangan i kobalt. Anoda je napravljena od mješavine ovih metala, što može značajno povećati snagu izvora energije. Značajka litij-nikal-mangan-kobaltovog oksida jest ta da čak i u fazi proizvodnje možete promijeniti karakteristike baterije povećanjem ili smanjenjem sadržaja elemenata koji čine bateriju. Mogu postići veće brzine punjenja, te imaju visoki kapacitet. Također, imaju visoku gustoću do otprilike 200 Wh/kg. [1]

Prosječan DOD (%)	Preostali ciklusi - LFP	Preostali ciklusi - NMC
80	4,800	3,040
70	6,000	4,000
60	8,000	5,573
30	32,000	40,533
5	192,000	608,000

**Tablica 3** Broj preostalih ciklusa u odnosu na dubinu pražnjenja LFP i NMC baterija [5]

Tablica prikazuje maksimalne cikluse dvaju možda najperspektivnijih tehnologija na bazi litija. Vidimo da LFP bolje podnosi visoki dubine pražnjenja, te pri 60% i više DOD-a, daje bolje rezultate. Pri manjim dubinama, NMC može izdržati neusporedivo više ciklusa.

#### 2.4.7. Natrij-nikal-klorid ( $Na-NiCl_2$ )

Natrij-nikal-klorid baterije su visokotemperaturne baterije koje rade na temperaturama između 270 i 350°C kako bi se postigao precizan unutarnji otpor, što zahtijeva termičku kontrolu. Tijekom punjenja, sol (NaCl) i nikal (Ni) se transformiraju u nikal klorid ( $NiCl_2$ ) i rastopljeni natrij (Na). Tijekom pražnjenja, reakcija se odvija u suprotnom smjeru. Zbog upotrebe gustog keramičkog materijala kao elektrolita za odvajanje elektroda, kroz elektrolit mogu prolaziti samo natrijevi ioni, ali ne i elektroni (električno odvajanje anode i katode s otvorenim vanjskim strujnim krugom). Stoga se reakcija događa samo kada se u vanjskom zatvorenom krugu pojavi elektronska struja koja je jednaka struji natrijevih iona. Čelije su sastavljene od metalnog kolektora struje, elektrolita, beta aluminijske cijevi, porozne katode  $M/MCl_2$  i tekuće natrijeve anode. Ovi elementi su hermetički zatvoreni u metalnom kućištu ćelije. Spajanjem ćelija nastaju moduli prosječnog kapaciteta 20 kWh. Kapacitet spremnika natrijevih nikal-kloridnih baterija doseže 3 MW. [27]

#### 2.4.8. Cink-zrak baterije

Cink-zrak predstavlja elektrokemijsku tehnologiju za skladištenje energije koja pripada široj kategoriji metal-zrak baterija. Naziv "metal-zrak" proizlazi iz upotrebe električki pozitivnog metala (cink, magnezij, aluminij, litij) u elektrokemijskoj vezi s atmosferskim kisikom, što stvara električni potencijal, odnosno električnu struju u zatvorenom strujnom krugu. Zrak unutar baterije prolazi kroz cinčanu elektrodu, a kisik u zraku djeluje kao elektroda, odvojena od druge elektrode elektrolitom. Struja nastaje oksidacijom cinčane elektrode i oslobađanjem elektrona nakon stvaranja hidroksilnih iona u tekućem elektrolitu, koje stvara katalizator nakon pražnjenja zračne elektrode. Punjenje baterije dovodi do obrnute reakcije i kisik se ispušta u zračnu elektrodu.

Prednosti ovog tipa baterije uključuju relativno visoku gustoću skladištenja energije (do tri puta veću od litij-ionskih baterija) zahvaljujući upotrebi jedne elektrode unutar baterije, odsutnost štetnih i eksplozivnih nusproizvoda, mogućnost potpunog uklanjanja cinkovog oksida recikliranjem i nisku cijenu materijala korištenih u bateriji. [27]

Izazovi povezani s ovom vrstom baterija uključuju prisutnost ugljičnog dioksida u zraku i njegov utjecaj na elektrolit i katodu, potrebu za termoregulacijom, stvaranje cinkovih dendrita, usporavanje ili zaustavljanje reakcije oksidacije te veliki utjecaj stanja baterije. Utjecaj ambijentalnog zraka (vlažnost i nečistoće) na rad baterije, skupa proizvodnja baterijskih ćelija (zračna elektroda) i niska učinkovitost sustava za pohranu, manja od 50%, također su problemi. Ova tehnologija je trenutno još uvijek u razvoju pa je teško procijeniti realne troškove. Mogući raspon snage za ovu vrstu baterija je između 0,01 i 1 MW. [27]

Parametar	Jedinica	Vrijednost				
Trajanje	Sati	8	10	24	48	100
Nominalna snaga	MW	1	1	1	1	1
Baterijski paketi	\$/kWh	208	174	94	66	51
Popratne komponente	\$/kWh	42	35	19	13	10

**Tablica 4** Predviđeni troškovi 1MW Cink-zrak sustava [5]

Tablica prikazuje pretpostavljene troškove (\$/kWh) baterijskog paketa Cink-zrak u ovisnosti o trajanju punjenja / pražnjenja. Vidimo da pri duljim ciklusima, cijena investicije znatno pada. Za sada ne postoji ni jedan operativni sustav preko kojeg bi imali uvid u realne troškove, te su gore navedeni troškovi samo pretpostavljeni, te se mogu razlikovati od realnih troškova kada prvi sustavi budu pušteni u pogon.



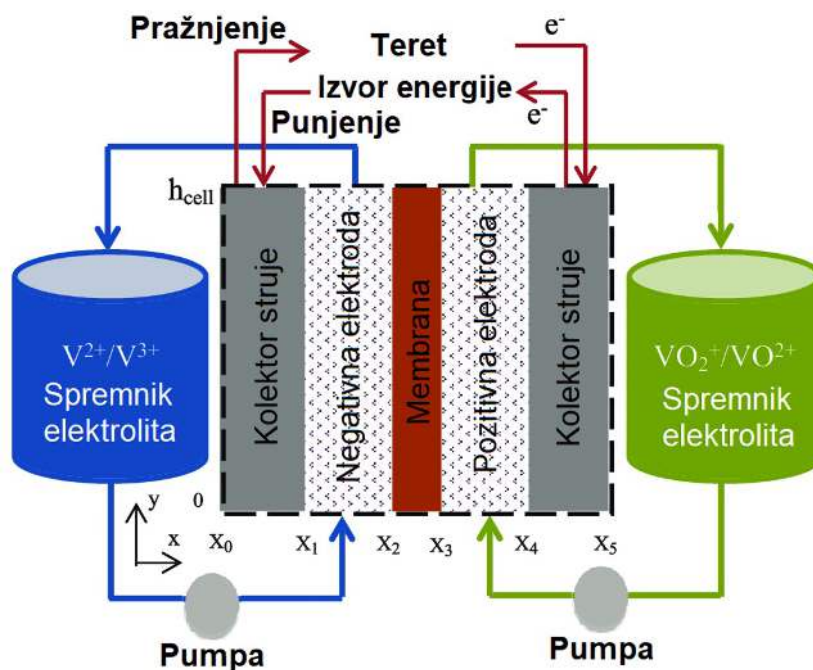
## 2.4.9. Vanadij redoks protočne baterije (VRB)

Vanadij Redoks baterije (Vanadium Redox Batteries – VRB) spadaju u kategoriju protočnih baterija. Osnovu vanadijskih redoks baterija čine redoks reakcije različitih oblika vanadijevih iona, odnosno simultane reakcije oksidacije i redukcije. Tijekom ciklusa punjenja, na pozitivnoj elektrodi, nakon otpuštanja elektrona, ioni  $V^{4+}$  se pretvaraju u ione  $V^{5+}$ , dok se na negativnoj elektrodi, nakon prihvaćanja elektrona, ioni  $V^{3+}$  pretvaraju u ione  $V^{2+}$ . Ove ionske reakcije pohranjuju električnu energiju u obliku kemijske energije. Tijekom ciklusa pražnjenja redoslijed reakcija je obrnut i kemijska energija se pretvara u električnu energiju.

Tijekom reakcije, ioni vanadija se nalaze u kiselj vodenoj otopini, koja služi kao elektrolit. Vanadij redoks baterije sadrže dva elektrolita. Međutim, prednost je što su oba elektrolita identična kada je baterija ispražnjena. Pozitivni i negativni elektroliti, koji se sastoje od vanadija i sumporne kiseline, pohranjuju se u vanjskom spremniku i pumpaju se putem vanjskih pumpi prema potrebi, što ovoj vrsti baterije omogućuje iznimno visok kapacitet pohrane energije. Polustanice su odvojene membranom za izmjenu protona, koja omogućuje zatvaranje kruga i cirkuliranje ionskih naboja.

Nominalni napon baterijskih ćelija bez opterećenja je 1,4V. Da bi se postigao viši napon, ćelije se u modulima spajaju u seriju. Jedna od prednosti ovih baterija je izuzetno brz odziv od nekoliko milisekundi kada je reagens već unutar ćelije, što ih čini optimalnim izborom za vrlo brze promjene u elektroenergetskoj mreži. Još jedna prednost je što se baterije ne prazne automatski jer su elektroliti pohranjeni u posebnim spremnicima.

Samoiscjedanje i parazitski gubici, odnosno gubitak energije kroz toplinu, mogu se dogoditi samo ako su elektroliti smješteni unutar ćelijskih skupina. No, zbog toga su skupine ćelija postavljene na višoj razini od spremnika, omogućujući gravitaciji da vrati elektrolite. Ovo je posebno važno tijekom perioda mirovanja.



Slika 18 Shema rada vanadij redoks baterije [15]



Ova vrsta baterije ne pokazuje probleme s dubokim ciklusima pražnjenja i konstruirana je za 10.000 ciklusa punjenja i pražnjenja. Procjene ukazuju na životni vijek od oko deset godina za ovu vrstu baterija, ali to još uvijek nije potvrđeno s obzirom na to da se radi o novoj tehnologiji skladištenja. Jedan od nedostataka ovih baterija je veliki volumen spremnika elektrolita potreban za bateriju velikog kapaciteta (reda MWh). Snaga koju ove baterije mogu pružiti kreće se između 0,3 i 3 MW.

Trenutačne primjene ovih sustava za skladištenje energije uključuju integraciju obnovljivih izvora energije, regulaciju potrošnje energije i telekomunikacijske aplikacije. Kapaciteti pohrane aktivne energije kreću se između 50 i 1000 kW. Dva primjera sustava koji su trenutno u upotrebi su sustavi u Sjedinjenim Državama snage od 600 kW i kapaciteta od 3.600 kWh te sustavi u Japanu snage od 1 MW i kapaciteta od 5 MWh. [27]

Komponenta	Trajanje (Sati)						
	2	4	6	8	10	24	100
Baterija, \$/kWh	352	263	234	219	210	190	179
Popratne komponente, \$/kWh	70	53	47	44	42	38	36
DC-DC pretvarač, \$/kW	60	60	60	60	60	60	60
AC-DC pretvarač, \$/kW	73	73	73	73	73	73	73
EMS \$/kW	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8
Integracija sustava, \$/kWh	74	53	46	42	40	35	32
Projektiranje i izgradnja, \$/kWh	85	61	52	48	46	40	37
PD, \$/kWh	98	70	60	56	53	46	43
Spajanje na mrežu, \$/kW	25	25	25	25	25	25	25

**Tablica 5** Predviđeni troškovi komponenata 10MW sustava u ovisnosti o vremenu [5]

#### 2.4.10. Željezo-krom protočne baterije (Fe-Cr)

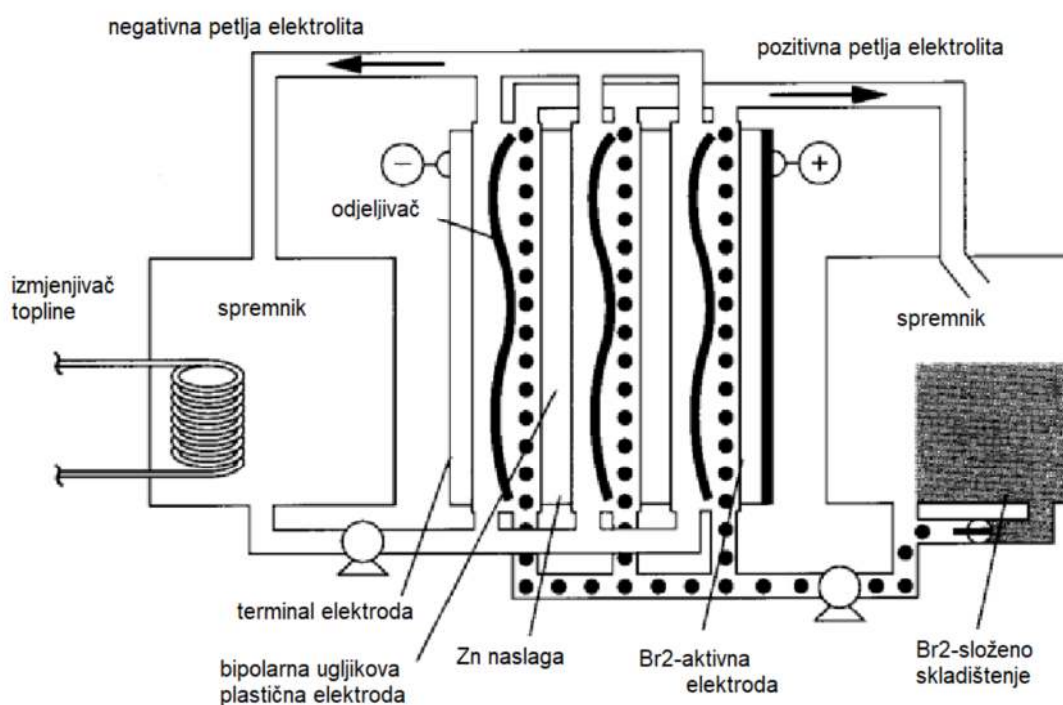
Željezo-krom baterije, spadaju u kategoriju protočnih baterija. Glavna prednost ovih baterija je jednostavnost izrade i principa rada, što rezultira relativno niskom cijenom proizvodnje. Koriste otopljene (tekuće) reaktante, što znači da se električni fenomeni događaju samo u određenom, malom dijelu volumena baterije. Sve ćelije su hidraulički balansirane.

Zahvaljujući upotrebi otopljenih reagensa, ne dolazi do promjene volumena ćelija (baterije) tijekom rada (ciklusa punjenja i pražnjenja), što je prednost u odnosu na konvencionalne spremnike baterija.

Željezo-krom protočne baterije trenutno su u fazi razvoja i istraživanja. Predviđene primjene ovih baterija uključuju regulaciju frekvencije u mreži ili uravnoteženje dnevne potražnje u mreži.

#### 2.4.11. Cink-brom protočne baterije (ZnBr)

Baterijska ćelija se sastoji od dvije elektrode (pozitivne i negativne) i dvije struje elektrolita (vodene otopine cinka i broma,  $ZnBr_2$ ), koje su odvojene mikro-poroznim separatorom. Iako oba elektrolita sadrže jednaku količinu iona cinka i broma, koncentracija elementarnog broma varira tijekom ciklusa punjenja i pražnjenja, što je omogućeno upotrebom separatora. Ćelije su povezane u nizu kako bi se povećao izlazni napon baterije.



**Slika 19** Shema cink-brom baterije [30]

Jedinstvenost ove baterije leži u upotrebi bipolarnih elektroda izrađenih od karbonske plastike (zbog korozivnih svojstava broma). Ovdje je jedna strana elektrode anoda, dok je druga strana katoda.

Samopražnjenje spremnika je ograničeno tako da se elementarni brom ne može miješati s negativnim elektrolitom, što je postignuto korištenjem mikroporozne membrane (separatora) s ionskom selekcijom. Međutim, često se koristi jeftinija alternativa neselektivne membrane zbog visoke cijene i niske trajnosti.

Elementarni brom se odvaja od pozitivne elektrode i pohranjuje u poseban spremnik kroz cirkulaciju elektrolita. Oba elektrolita mogu teći u istom ili suprotnim smjerovima, ovisno o modelu baterije. Ova cirkulacija također pomaže u održavanju toplinske ravnoteže unutar baterije.

Glavni nedostatak ove vrste baterija je korozivnost elementarnog broma, što dovodi do degradacije ćelija baterije, kao i toksičnost broma. Za razliku od tradicionalnih baterija koje ovise o broju ciklusa punjenja i pražnjenja, životni vijek ovih baterija ovisi o broju sati rada. [27]

### 3. PRIMJENA BESS-a U PRIJENOSNOJ MREŽI

S prelaskom na zelenu i ekološki prihvatljivu električnu energiju, energetska se sustava drastično mijenja. Upotreba obnovljivih izvora energije, poput vjetrova i sunca, čini proizvodnju električne energije promjenjivom, nestabilnom i ovisnom o vremenskim uvjetima. Kako vrijeme prolazi, energetska sustava postaje sve kompleksnija i uključuje brojne faktore koji mogu ugroziti njegovu stabilnost i sigurnost. To uključuje rastući broj korisnika, povećanu potrošnju energije, neregularnu potrošnju, porast broja električnih vozila i povećanje broja distribuiranih izvora s povremenom proizvodnjom.

Primjena skladištenja energije u baterijama (BESS) u prijenosnoj mreži i elektroenergetskom sustavu donosi mnoge prednosti, usluge i mogućnosti. To pomaže povećati fleksibilnost, pouzdanost i sigurnost prijenosne mreže i elektroenergetskog sustava. Više detalja o ovim prednostima bit će navedeno u sljedećem odjeljku.

#### 3.1. Minimizacija troškova rada sustava

Jedan od ključnih elemenata u izračunu operativnih troškova sustava je njegova učinkovitost. Ona se može gledati kao omjer između ulazne i izlazne energije. Smanjivanjem operativnih troškova, učinkovitost sustava se povećava. Učinkovitost sustava može se poboljšati smanjenjem operativnih gubitaka. Značajan izvor gubitaka pri radu prijenosne mreže su Jouleovi gubici. Jouleovi gubici se javljaju u svim komponentama prijenosne mreže kroz koje struja prolazi. Zbog električnog otpora u vodovima (žicama) i ostalim elementima prijenosne mreže, protok struje uzrokuje aktivne gubitke u prijenosu, tj. toplinske gubitke (Jouleove) u obliku topline. Količina Jouleove topline jednaka je proizvodu električnog otpora, kvadrata struje i vremena koje je proteklo. [35]

$$Q = I_2 \cdot R \cdot t \quad (10)$$

$Q$  - Jouleova toplina

$I$  - jakost struje

$R$  - otpor voda

$t$  - vrijeme

Primjenom BESS-a u prijenosnu mrežu moguće je ograničiti količinu električne energije koja cirkulira kroz vodove prijenosne mreže, čime se smanjuju toplinski gubici i povećava učinkovitost sustava. Ograničavaju struju u vodovima tako da dovode električnu energiju u mrežu tijekom vremena visokog opterećenja (ciklus pražnjenja). Tijekom razdoblja niske napunjenosti, baterija se puni (ciklus punjenja), koristi se za druge svrhe ili je u stanju mirovanja.

Međutim, zbog trenutno ograničenog razvoja tehnologije pohrane (baterije) i elektroničkih pretvarača, smanjenje gubitaka u mreži nadoknađuje samo najviše 50% unutarnjih gubitaka sustava pohrane, što dovodi do upitnosti trenutne isplativosti instalacije baterijskih sustava [1].

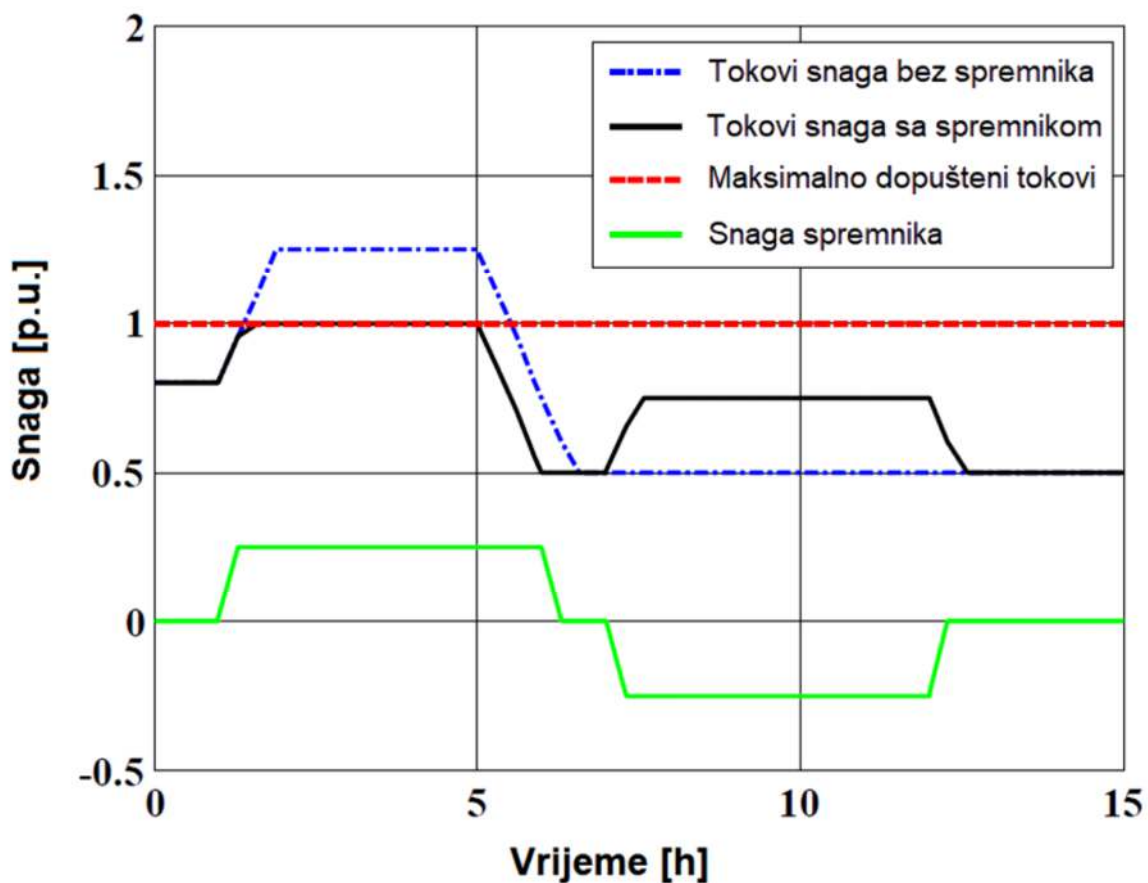
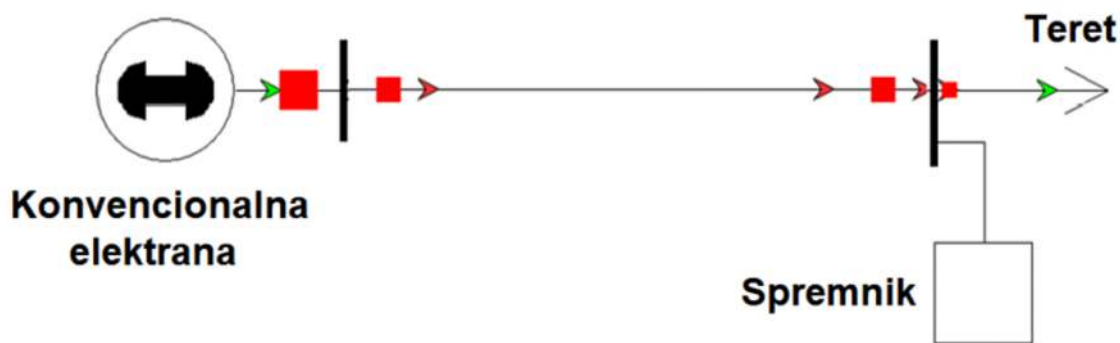
Jedna od potencijalnih prednosti skladištenja energije je njegova mogućnost kombiniranja s konvencionalnim elektranama. Budući da proizvodnja električne energije elektrane ovisi o potrošnji (opterećenju) mreže, vrijeme proizvodnje nije proizvoljno, kao ni troškovi proizvodnje (pogonski troškovi). Integriranjem pohrane energije u elektranu, vrijeme proizvodnje može se optimizirati kako bi se smanjili operativni (proizvodni) troškovi.

Direktiva 2003/87/EZ uspostavila je međunarodni sustav za trgovanje jedinicama emisija stakleničkih plinova, poznat kao EU ETS (Emissions Trading System). Ovim sustavom dodjeljuju se dozvole koje određuju maksimalnu količinu ispuštenih stakleničkih plinova. Ako se premaše količine emitiranih emisija, mora se platiti novčanu kaznu. [53]

### **3.2. Upravljanje zagušenjima u mreži**

Usko grlo u mreži nastaje kada jedna ili više komponenti (npr. nadzemni vodovi, kabeli ili transformatori) dosegnu svoju granicu opterećenja (preopterećenje). Preopterećenje nadzemnih vodova ili kabela uzrokovano je povećanjem struje iznad najveće dopuštene razine struje u kabelu, što rezultira maksimalnim toplinskim naprezanjem na vodu ili kabelu. U tom slučaju postoji mogućnost trajnog oštećenja vodiča i/ili izolacije ili prekomjernog otklona (smanjenje minimalne visine voda) zbog povećanja temperature zbog Jouleovih gubitaka. U većini slučajeva, kako bi se izbjeglo poplavlivanje, aktivira se zaštitni relej (obično protiv prekomjernih struja), koji izolira sekciju od rada i prenosi protok energije na preostale sekcije, dopuštajući domino efekt i progresivni kvar ostalih sekcija. (Prekid sustava). Kako bi se izbjeglo preopterećenje mreže, u sustav se može integrirati baterija za pohranu energije.

Mjesto postavljanja BESS može se odabrati ovisno o mjestu najveće potrošnje (onečišćenja). Ako je skladište energije instalirano na mjestu punjenja (ili u blizini), mjesto potrošnje se napaja preko kratke dionice dalekovoda, čime se izbjegava prijenos energije na velike udaljenosti na dalekovodima. Time se izbjegava zagušenje mreže jer je manje opterećenje transportne mreže. Zbog ograničenog kapaciteta skladišta energije, dovod energije iz skladišta u mrežu je vremenski ograničen.



**Slika 20** Upravljanje zagušenjima u mreži injektiranjem snage iz spremnika [1]

Zbog navedenog električna energija bi se praktički oslobađala samo u vrijeme uskih grla mreže. U drugim slučajevima, rezerve energije se ponovno pune, koriste za preostale svrhe ili ostaju neiskorištene. Prednost postavljanja spremnika na mjestu punjenja je smanjenje gubitaka džula u mreži zbog kraćih udaljenosti i manjih struja. Dodatna pogodnost je odgoda daljnjih ulaganja u prometnu mrežu. Naime, odgađa se gradnja novih vodova (dionica) dalekovoda koji bi inače morali biti izgrađeni radi osiguranja sigurnosti i stabilnosti sustava.

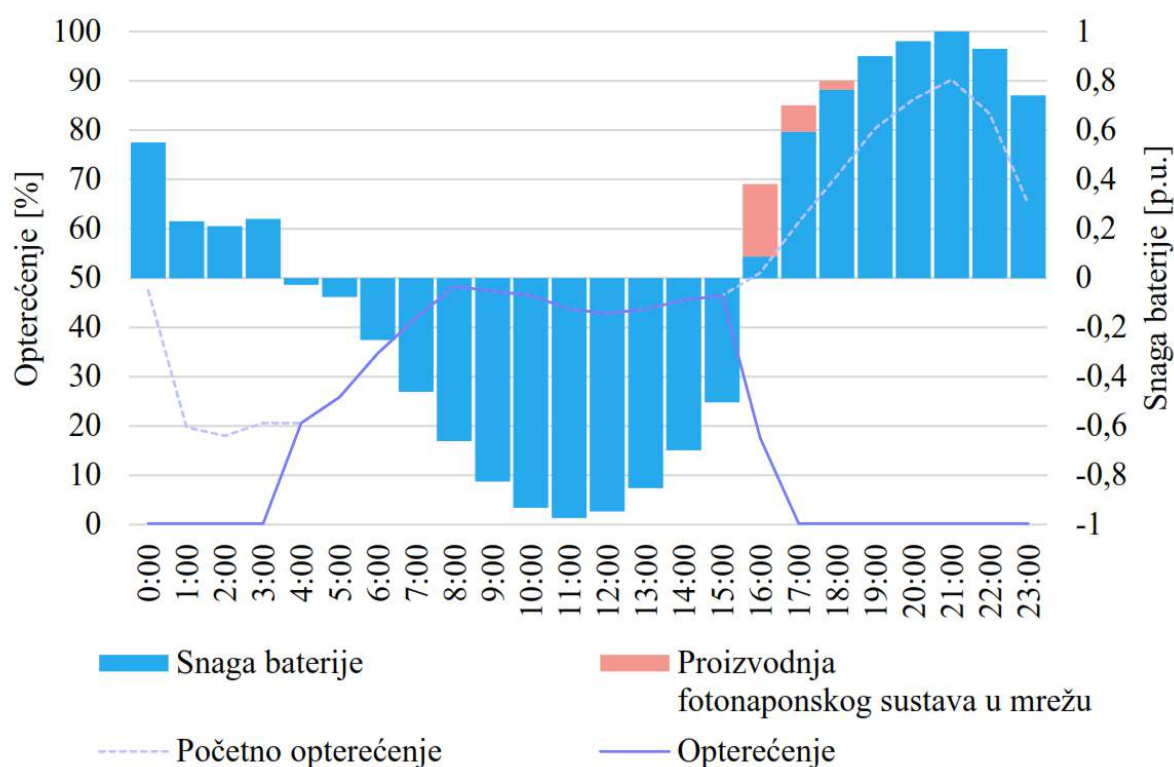
### 3.3. Uravnoteženje elektroenergetskog sustava

Prognoziranje u energetsom sektoru može biti izazovno zbog promjenjivog udjela opterećenja, koji može biti dnevni ili sezonski. Vršni dnevni tereti obično se javljaju u jutarnjim ili večernjim satima, dok su sezonski tereti obilježeni povećanjem potrošnje ljeti (zbog turističkog karaktera Hrvatske) i zimi (zbog povećanja potrošnje vezanog uz grijanje). Dodatna poteškoća u balansiranju sustava može nastati zbog obnovljivih izvora energije, čija proizvodnja može varirati ovisno o vanjskim vremenskim uvjetima.

Nepotvrđeni podaci preuzimanja energije u distribucijsku mrežu			
	iz prijenosne mreže	iz proizvodnih postrojenja na srednjem naponu	iz proizvodnih postrojenja na niskom naponu
Sat	E [MWh/h]	E [MWh/h]	E [MWh/h]
1	1.265	128	4
2	1.158	130	4
3	1.103	132	4
4	1.091	135	4
5	1.118	134	4
6	1.244	137	4
7	1.589	141	4
8	1.834	138	5
9	1.922	135	15
10	1.897	137	37
11	1.805	148	64
12	1.765	162	90
13	1.706	169	102
14	1.672	161	90
15	1.636	153	74
16	1.623	149	53
17	1.682	136	26
18	1.787	119	8
19	1.988	121	3
20	2.081	132	4
21	2.008	142	4
22	1.845	145	4
23	1.706	140	4
24	1.494	131	3
<b>Ukupno</b>	<b>39.019</b>	<b>3.355</b>	<b>614</b>

**Tablica 6** Tablica dnevnog opterećenja, HEP ODS [24]

Osim toga, baterijska pohrana energije može se koristiti za uravnoteženje sustava. Skladištenje baterije može se koristiti u dva najčešća scenarija. U scenariju s viškom električne energije u elektroenergetskom sustavu (prijenosnoj mreži), važno je osigurati siguran rad sustava uklanjanjem viška energije. Ovaj višak energije može se iskoristiti za punjenje uređaja za pohranu energije (baterija), što pruža dvije prednosti: mogućnost pohrane energije za buduću upotrebu i uklanjanje viška energije iz mreže. U drugom scenariju, kada postoji nedostatak energije u sustavu, moguće je koristiti energiju pohranjenu u sustavima za pohranu energije kako bi se pokrio deficit (pokrivanje potražnje) i time uravnotežio sustav. Primjenom skladišta energije moguće je izbjeći kupnju električne energije iz susjednih zemalja, što dovodi do smanjenja troškova i oslobađanja kapaciteta na linijama sa susjednim zemljama. U slučaju privatnih skladišta energije, vlasnici spremnika (koji su također sudionici na tržištu električne energije) mogu ih koristiti za privremeno raspoređivanje. To znači da se električna energija može kupiti po nižoj cijeni, a zatim prodati po višoj cijeni, čime se povećava dobit i skraćuje razdoblje povrata investicije. Na dijagramu ispod je prikazan primjer uravnoteženja sustava zbog nejednolike proizvodnje energije fotonaponskih sustava.



**Slika 21** Dijagram ravnoteže opterećenja mreže [52]

### 3.4. Naponska stabilnost

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

Pad napona u mreži, koji je uglavnom posljedica induktivnog karaktera vodova, u velikoj mjeri je određen tokom jalove snage [1].

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{RP+XQ}{U^2} \quad (11)$$

$R$  - otpor voda

$X$  - reaktancija voda

$P$  - radna snaga

$Q$  - jalova snaga

Promjene u uvjetima mreže često detektiraju korisnici mreže, bilo da se radi o promjenama opterećenja, promjenama u topologiji mreže ili neočekivanim događajima kao što su kvarovi mrežnih elemenata poput vodova ili transformatora. Konvencionalna regulacija napona postiže se trošenjem jalove energije na generatorskim jedinicama, reaktorima ili kondenzatorima za ravnotežu. Lokalna regulacija napona na nižim razinama također se do neke mjere postiže promjenom upravljačke sklopke transformatora, što rezultira promjenom prijenosnog omjera pri opterećenju transformatora. Ovo su ključni aspekti održavanja stabilnosti napona u elektroenergetskom sustavu.

Napon se ne može izravno regulirati pomoću baterija. Umjesto toga, regulacija napona postiže se kroz elektroničke pretvarače, kao što su ispravljači, koji su integrirani u bateriju i koji mogu upravljati jalovim energijama. No, ovaj pristup ima svoje slabosti. Jedna od njih je potreba za odgovarajućim odabirom elektroničkih pretvarača s obzirom na očekivanu jalovu snagu, što može dovesti do značajnih ulaganja u fazi implementacije. Ovo je jedan od ključnih izazova u primjeni tehnologija pohrane energije za regulaciju napona u elektroenergetskim sustavima. Za održavanje stabilnosti napona, brzoreagirajući spremnici postaju neophodni. Sve više se primjenjuju različiti oblici energetske spremnika s ugrađenim električnim uređajima, poput generatora, za ovu svrhu. Ovi generatori za spremanje energije, poput elektrana, mogu proizvoditi i apsorbirati jalovu snagu, čime se održava stabilnost napona. PHES i CAES te zamašnjaci su primjeri ovakvih energetske spremnika.



### 3.5. Crni start

“Crni start” je termin koji se koristi za opisivanje situacije kada se proizvodna jedinica, poput elektrane, može samostalno pokrenuti i sinkronizirati s mrežom bez vanjskog izvora napajanja. Ovaj proces započinje kada je proizvodna jedinica u stanju pripravnosti (isključena) i nije povezana s mrežnim naponom tijekom pokretanja (isključeno). Da bi se proizvodna jedinica mogla povezati s mrežom, mora biti spremna za sinkronizaciju. Nakon što se poveže s mrežom, proizvodna jedinica preuzima opterećenje. Crni start se obično događa nakon kvara na dijelu ili cijelom električnom sustavu. Koristi se za napajanje korisnika mreže nakon prekida.

Baterija za skladištenje energije može se koristiti za obnovu električnog sustava (ili njegovog dijela) ili kao aktivna rezerva energije tijekom pokretanja proizvodnih jedinica u crnom stanju. Energija pohranjena u bateriji može preuzeti dio opterećenja, olakšavajući i ubrzavajući ponovno pokretanje sustava. Kada se proizvodne jedinice sinkroniziraju i preuzmu opterećenje, sustavi za skladištenje energije prekidaju ciklus pražnjenja i prelaze na ciklus punjenja, stvarajući rezervu električne energije za buduće potrebe.

Da bi sustavi za skladištenje energije mogli sudjelovati u restrukturiranju elektroenergetske mreže, moraju zadovoljiti određene uvjete:

- Moraju biti sposobni riješiti prolazne pojave uzrokovane aktivacijom blokova opterećenja. Sustav za skladištenje energije mora biti u stanju osigurati najmanje 5-10% neto kontinuirane snage kada je to potrebno.
- Moraju biti sposobni stabilizirati odvojenu mrežu bez obzira na razinu snage opterećenja. Uređaji za skladištenje energije moraju biti u stanju raditi u širokom rasponu snage, posebno na niskim razinama snage, i održavati stabilan rad na tim razinama.
- Moraju biti sposobni održavati ravnotežu između proizvodnje i potrošnje dok ostaju unutar prihvatljivog frekvencijskog raspona. Sustav mora biti u mogućnosti pružiti referentnu frekvenciju vlastitoj mreži na zahtjev operatora prijenosnog sustava, pod uvjetom da ima dovoljnu rezervu snage.
- Moraju biti sposobni održavati stabilan rad bez stalnih fluktuacija napona i frekvencije. Sustav mora imati odgovarajuće kontrole brzine i napona.
- Moraju biti sposobni obraditi prenapone uzrokovane ponovnim spajanjem na drugi dio aktivne mreže.
- Moraju moći preživjeti do 12 preokreta napajanja tijekom konekcije između regionalnih vodova bez oštećenja. [1]

Dodatna korist od skladištenja energije je mogućnost njegove upotrebe u izoliranim uvjetima. Konkretno, skladištenje energije može se primijeniti kada je dio mreže odvojen (izoliran) od ostatka mreže. U takvim situacijama, skladište energije može funkcionirati kao glavni izvor energije (ako je opterećenje unutar kapaciteta skladištenja i ako je kapacitet skladištenja dovoljno velik) u kombinaciji s odgovarajućim obnovljivim izvorima energije poput solarnih elektrana ili jednostavno održavanje razine napona. Tijekom ovog načina rada, važno je da su sve razine zaštite aktivne (npr. aktivni zaštitni releji) kako bi se održala sigurnost pogona. Ovaj princip skladištenja energije nalazi svoju najveću primjenu nakon velikih oluja i katastrofa, gdje može osigurati izvor energije za osnovne potrebe stanovništva. [41]

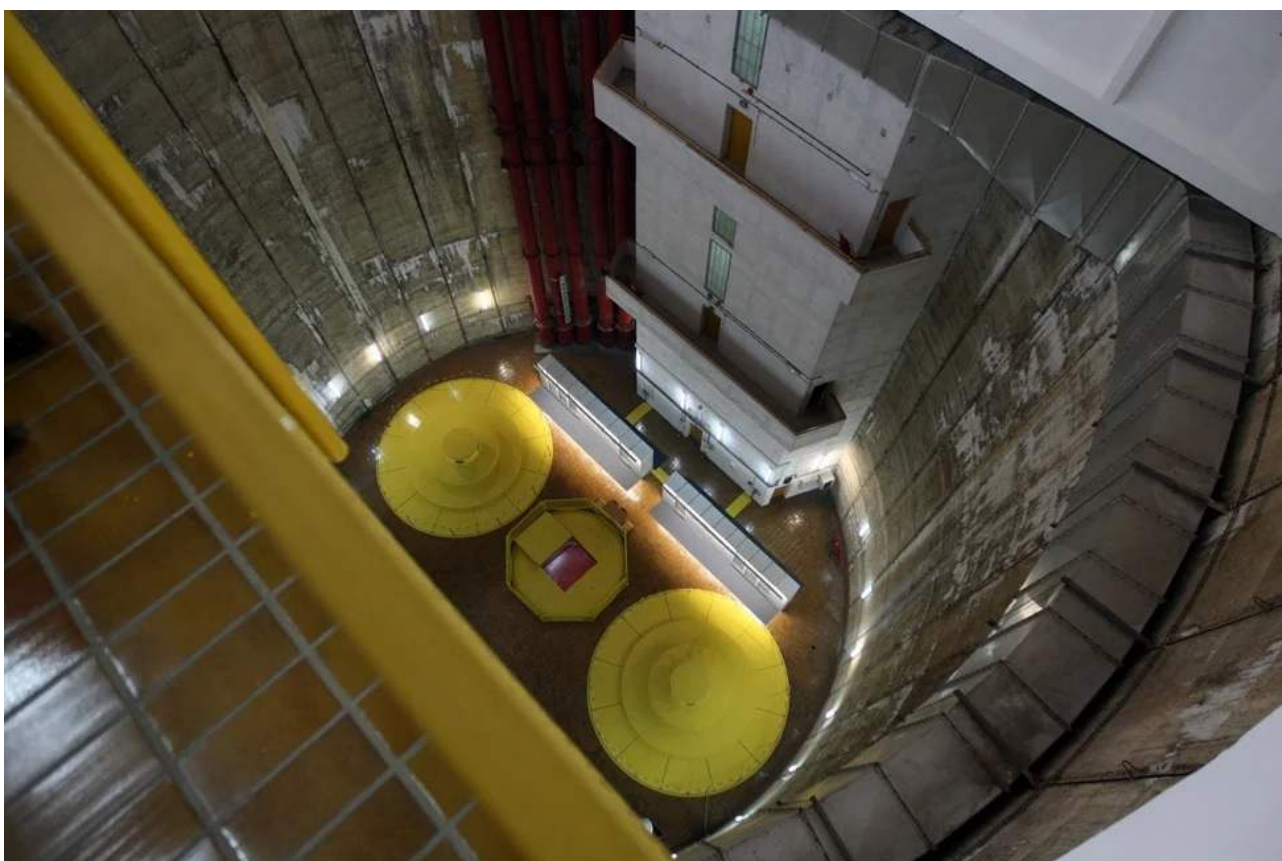
#### 4. PRIMJER SUSTAVA ZA POHRANU ENERGIJE U HRVATSKOJ

Reverzibilna hidroelektrana Velebit (PHES) je kompleks koji se sastoji od gornjih akumulacijskih jezera, iz kojih crpi vodu za rad i u koje gura vodu kada djeluje kao pumpa, tlačnog dovodnog cjevovoda, strojarnice s pratećim objektima i donjeg akumulacijskog jezera Razovac. Izgrađena između 1979. i 1985. godine, ova hidroelektrana koštala je nevjerojatnih 1,25 milijardi njemačkih maraka, što bi danas iznosilo više od 600 milijuna dolara. Snaga sustava je 276 MW pri generatorskom režimu rada i 240 MW pri motornom režimu rada. Gornje akumulacijsko jezero, poznato kao Štikada, nalazi se iza Velebita na Gračačkoj visoravni. Sve okolne vode ulijevaju se u ovo jezero, koje je povezano kanalom (rijeka Ričica) ili podzemnim tunelom dugim 2.825 m (rijeka Otuča). Voda iz jezera Štikada koristi se za proizvodnju električne energije u turbinskom radu, a u crpnom radu ta se ista voda pumpa natrag u gornje jezero. Prosječni godišnji dotok u ovo jezero iznosi 11,94 m<sup>3</sup>/s.



**Slika 22** Cijev reverzibilne elektrane [48]

Iz Štikade do strojarnice koja se nalazi s druge strane Velebita vodi betonski tlačni tunel i čelični tlačni cjevovod. Dovodni tunel ima promjer od 4,6 m i dužinu od čak 8.191 metara. Na kraju tog tunela nalazi se vodna komora iz koje izlazi tlačni čelični cjevovod koji vodi do strojarnice. Njegov promjer varira od 3,0 do 3,9 metara, a dužina mu je 2.108 metara. Visinska razlika između strojarnice i ove vodne komore iznosi čak 549,15 metara, što stvara ogroman energetski potencijal.



**Slika 23 Strojarnica [48]**

Strojarnica se nalazi pod zemljom, ispod razine mora, u betonskom bunaru dubokom 60 metara čiji je promjer čak 27 metara. Zanimljivo je da se ta rupa gradila tako da je napravljen čelični obruč s promjerom od 27 metara koji je postavljen okomito na mjesto gdje se sada nalazi rupa, te je on pod svojom težinom propao do te dubine.

Donje akumulacijsko jezero Razovac nastalo je izgradnjom brane preko doline rijeke Zrmanje i povezano je sa strojarnicom pomoću dva tunela. Služi kao akumulacijski prostor kada elektrana radi u crpnom režimu. Sama elektrana može raditi u tri različita pogona: turbinskom, crpnom i kompenzatorskom. Elektrana godišnje radi oko 4.000 do 4.500 sati, od čega pola vremena u turbinskom, tridesetak posto u crpnom, a ostatak vremena u kompenzatorskom pogonu. Elektrana je započela s radom 1984. godine, ali je tijekom Domovinskog rata radila ispod minimalne snage, pa je nakon rata bilo potrebno obnoviti je. Većinu opreme proizveo je Končar, a projekt je vodio Elektroprojekt iz Zagreba uz pomoć Projektnog Biroa iz Splita i Geoexperta iz Zagreba. Radove su izvodili Industrogradnja iz Zagreba, Konstruktor iz Splita, Hidroelektra iz Zagreba te Pomgrad i Geotehnika iz Splita. [8]

## 5. USPOREDBA SUSTAVA

### 5.1. Ekonomska usporedba

Stvarnu isplativost sustava najvjernije prikazuje LCOS - Specifična cijena spremnika energije (eng. Levelized Cost of storage).

LCOS se koristi za izračunavanje prosječnih troškova pohrane jednog kilovatsata (kWh) električne energije izraženih u neto sadašnjoj vrijednosti (NPV) kroz životni vijek samog skladišta energije. Preko LCOS-a možemo izračunati cijenu po kojoj bi se jedinica proizvedene energije iz skladišta trebala prodati da bi se pokrili svi troškovi projekta, uključujući poreze, troškove financiranja, održavanje te svi ostali troškovi. Nudi način sveobuhvatne usporedbe stvarnih troškova posjedovanja i rada skladišta.

Dominantna tehnologija skladištenja energije trenutno je PHES. Procjena ukupnih instaliranih troškova tog sustava je 263 \$/kWh za 10 satni sustav od 100 MW. Najznačajnije komponente troškova su rezervoar (76 \$/kWh) i pogon (742 \$/kW). Za 24-satni sustav, izvješća za 2023. godinu predviđaju smanjenje ukupnog troška na 143 \$/kWh

Baterijski sustavi, koji su doživjeli značajan rast u posljednjem desetljeću, predviđaju troškove u 2023. godini za 100 MW, 10-satne baterijske sustave:

Litij-ion - LFP (356 \$/kWh),

Litij-ion - NMC (405 \$/ kWh),

Vanadij redoks (385 \$/kWh),

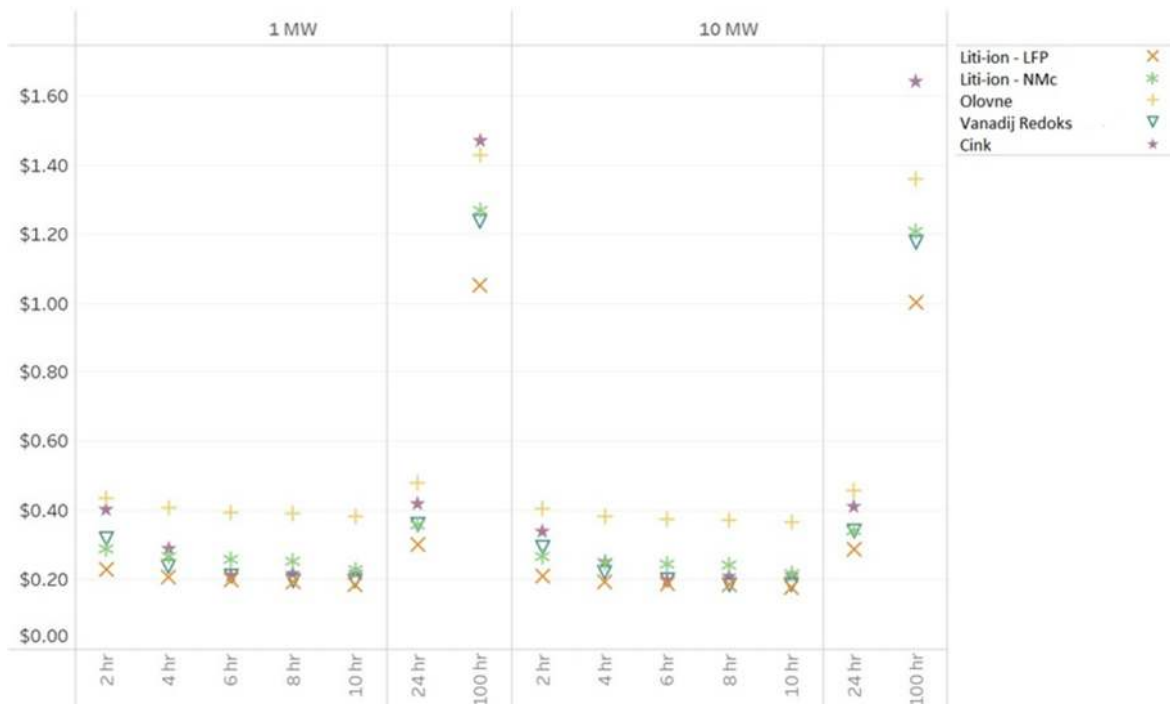
Olovne baterije (409 \$/kWh),

Sustavi na bazi cinka ne koriste se u snagama od 100 MW, te se trošak procjenjuje za 10 MW, 10-satni sustav, koji iznosi 449 \$/kWh.

CAES je najisplativija tehnologija skladištenja u trajanju  $\geq 4$  sata (122 \$/kWh za 100 MW, 10-satni sustav). To je zbog ovisnosti o smještaju na prirodno pogodnim područjima te korištenje prirodnih šupljina, koja smanjuju trošak

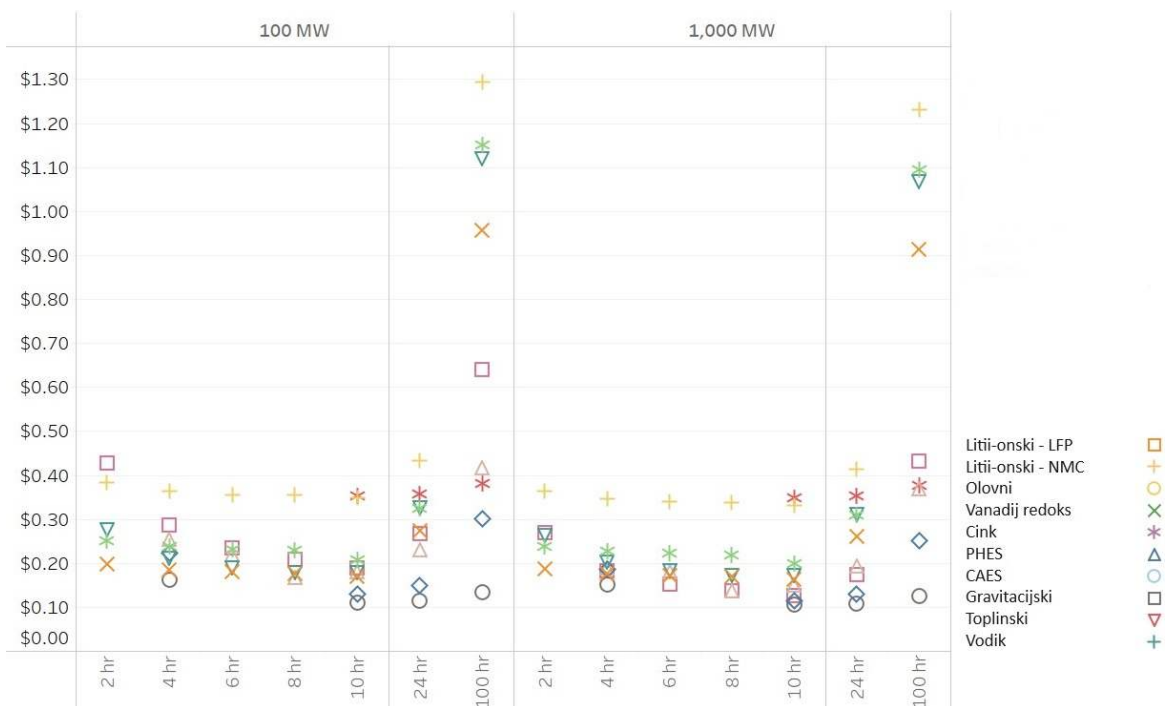
PHES je druga ili treća tehnologija po isplativosti za 10, 24 i 100 satne sustave.

LCOS za BESS sustave je u rasponu od 0,20 \$ do 0,40 \$/kWh za sustave od 10 sati ili manje. LFP kao najisplativiji, dok su Olovni najmanje isplativi. Za sustave od 24 do 100 sati troškovi rastu. [5]



Slika 24 LCOS troškovi (\$/kWh) u 2021. godini za 1-10MW sustave [5]

Pri većim kapacitetima snage (100 MW+), CAES se pokazuje najisplativiji u svim trajanjima za koje su procijenjene vrijednosti (0,10 \$/kWh za 1000 MW, 10 sati).



Slika 25 LCOS troškovi (\$/kWh) u 2021. godini za 100-1000MW sustave [5]

Projekcije ukupnih instaliranih troškova za 2030. godinu za 100 MW 4-satne sustave su slijedeći:

LFP (291 \$/kWh)  
 CAES (295 \$/kWh)

Kao što se može vidjeti, troškovi su jako slični.



**Slika 26** LCOS troškovi (\$/kWh) u 2030. godini za 1-10MW sustave [5]

## 5.2. Usporedba vijeka trajanja sustava

U tablici su prikazani podaci maksimalnog vijeka trajanja sustava. Kako možemo vidjeti, mehanički sustavi (PHES i CAES) imaju najdulji vijek trajanja koji je procijenjen na 60 godina. Sami životni vijek ne ovisi znatno na opterećenju samog sustava pa je puno lakše predvidjeti zahtjeve njihovog održavanja. Mana ovih sustava je vrijeme koje je potrebno za izgradnju, te njihova ovisnost o području na kojem će se instalirati.

Baterijski sustavi imaju najkraći vijek trajanja. Oni su ovisni o načinu korištenja te o opterećenju, pa njihov životni vijek varira od prosječnog do maksimalnog vijeka. Prosječan životni vijek im je od 10 do 15 godina, ovisno o tehnologiji baterije, dok im je maksimalni između 20 i 25 godina.

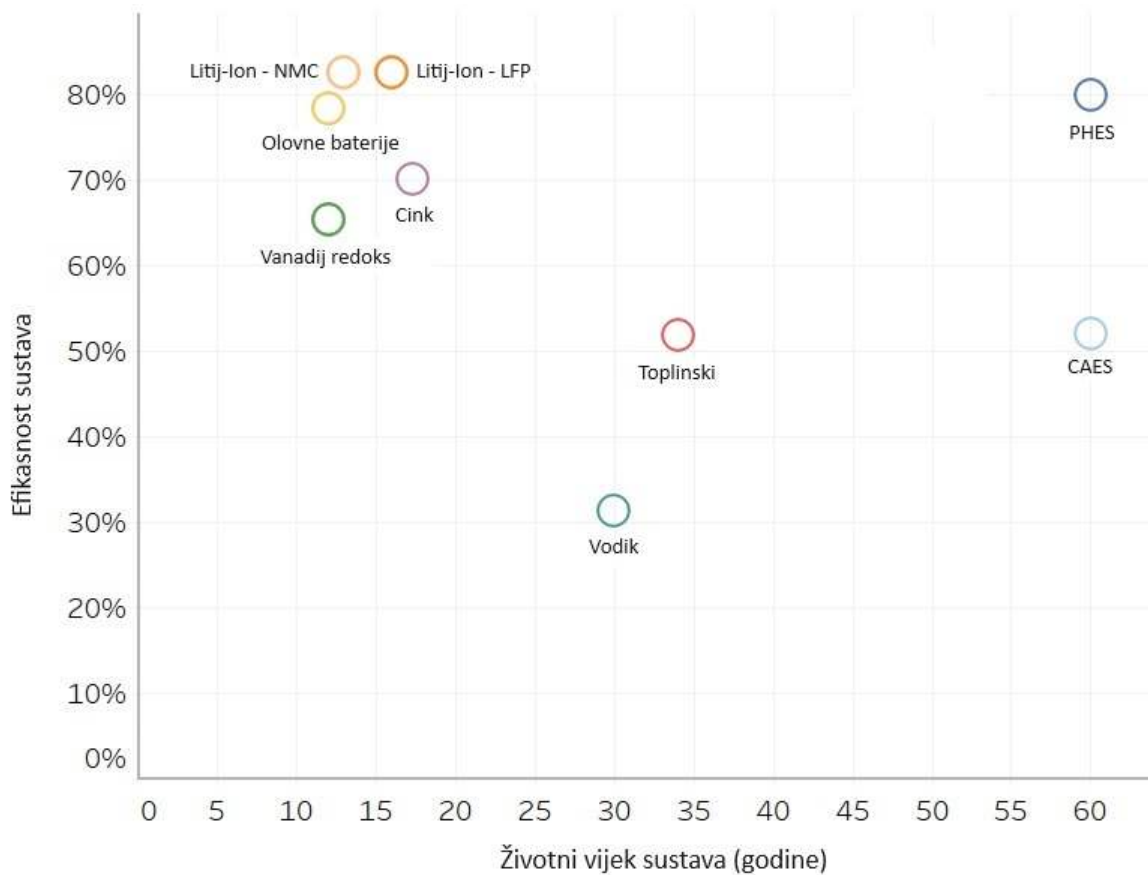
Tehnologija pohrane	Maksimalni životni vijek (Godina)	Vrijeme izgradnje (Godina)
Li-ion LFP	20-25	1
Li-ion NMC	20-25	1
Olovne baterije	20-25	1
Vanadij Redoks	24	1
Cink	20-25	1
CAES	60	3
Vodik	30	3
PHES	60	5

**Tablica 7** Usporedba životnog vijeka raznih sustava [5]



### 5.3. Usporedba efikasnosti u odnosu na životni vijek

Ovom usporedbom želimo prikazati koliko je sustav stvarno isplativ s obzirom na njegov životni vijek. Sustavi koji imaju najvišu efikasnost najčešće imaju najkraći životni vijek. Tako možemo vidjeti da baterijski sustavi imaju najvišu efikasnost, ali i najkraći životni vijek. Mehanički sustavi sa druge strane imaju nižu efikasnost, ovisno o tehnologiji i primjeni, ali im je životni vijek neusporedivo dulji u odnosu na ostale, kako je prikazano na slici ispod (slika 26):



**Slika 27** Usporedba efikasnosti i prosječnog životnog vijeka sustava [5]



## 6. LITERATURA

- [1] Robyns, B.; i dr.: “Energy Storage in Electric Power Grids“, Wiley-ISTE, 2015.
- [2] Renewable Energy Uptake and the Jamaican Grid: The 30% Journey to 2030 - Deju Nation, Kahlil Smith, 2016
- [3] <https://sinovoltaics.com/learning-center/storage/isothermal-caes/>
- [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](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] Energy Storage Grand Challenge Cost and Performance Assessment 2022,
- [6] 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.
- [7] Rufer, A.: “Energy Storage: Systems and Components”, CRC Press, 2017.
- [8] Obnovljivi.com - <https://www.obnovljivi.com/obnovljivi-izvori-energije-u-regiji/271-reverzibilna-hidroelektrana-velebit?showall=1>
- [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] Milić, Matej: “Isplativost tehnologija za skladištenje energije u pokrivanju energetske potrebe Grada Dubrovnika iz obnovljivih izvora energije” Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2017
- [12] Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja: hrvatska strategija za vodik do 2050. Godine, Zagreb, ožujak 2022. godine
- [13] Komarnicki, P.; Lombardi, P.; Styczynski, Z.: “Electric Energy Storage Systems: Flexibility Options for Smart Grids”, Springer, 2017.

- [14] Horvat, I.; i dr.: “Power to Gas sustav (P2G)“, s Interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Power\\_to\\_Gas\\_sustav\\_%28P2G%29](https://hr.wikipedia.org/wiki/Power_to_Gas_sustav_%28P2G%29), 06. lipnja 2022.
- [15] Ivan Dokozić: Primjena spremnika energije u prijenosnim mrežama, Sveučilište u Rijeci, 2022
- [16] FSEC®: “Liquid Hydrogen Storage“, s Interneta, <https://energyresearch.ucf.edu/research/hydrogen/liquid-hydrogen-storage/>, 14. lipnja 2022.
- [17] <https://electronics360.globalspec.com/article/17021/fundamentals-of-superconducting-magnetic-energy-storage-systems>
- [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] <https://www.teriin.org/blog/why-battery-energy-storage-key-renewables-growth>
- [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] HEP Proizvodnja: “Dnevni dijagram opterećenja“, s Interneta, <https://www.hep.hr/ods/opskrbljivaci/pravila-primjene-nadomjesnih-krivulja-opterecenja/dnevni-dijagram-opterecenja/627>, 4. rujna 2023.
- [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/](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](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](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] Ilija Beljan: Litij-ionske baterije, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u osijeku, fakultet elektrotehnike, 2021

- [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] Sanja Renka: Gelovi ionskih tekućina (ionogelovi) i njihova primjena, Laboratorij za funkcionalne materijale, Institut Ruđer Bošković, Zagreb, 2020.
- [48] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana\\_Velebit](https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana_Velebit)
- [49] A. Komljenović: „Modeliranje i regulacija baterijskih i ultrakondenzatorskih sustava za pohranu električne energije“, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2013.
- [50] Ana-Marija Klasić: „Solarni punjač za akumulator“, Završni rad, Sveučilište Sjever, Stručni studij elektrotehnika, 2016
- [51] Mihael pongrac: „Utjecaj temperature na rad baterije mobitela“, Završni rad, Grafički fakultet Zagreb, 2018
- [52] Mario Vrhovac: „Primjena sustava za pohranu energije u elektroenergetskom sustavu“, Diplomski rad, fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, Osijek, 2021
- [53] DIREKTIVA 2003/87/EZ EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA od 13. listopada 2003, o uspostavi sustava trgovanja emisijskim jedinicama stakleničkih plinova unutar Zajednice i o izmjeni Direktive Vijeća 96/61/EZ