

# Optimalna alokacija baterijskih spremišta energije u distributivnim mrežama s distribuiranom proizvodnjom

---

**Kereta, Matija**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:851425>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-05**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I

INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Sveučilišni diplomski studij

**OPTIMALNA ALOKACIJA BATERIJSKIH SPREMIŠTA  
ENERGIJE U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA S DISTRIBUIRANOM  
PROIZVODNJOM**

Diplomski rad

Matija Kereta

Osijek, 2021.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit

Osijek, 22.02.2021.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

Ime i prezime studenta:	Matija Kereta
Studij, smjer:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D-1104, 03.10.2017.
OIB studenta:	92811467874
Mentor:	Izv. prof. dr. sc. Marinko Barukčić
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	Izv.prof.dr.sc. Tomislav Barić
Član Povjerenstva 1:	Izv. prof. dr. sc. Marinko Barukčić
Član Povjerenstva 2:	Toni Varga
Naslov diplomskog rada:	Optimalna slokacija baterijskih spremišta energije u distributivnim mrežama s distribuiranom proizvodnjom
Znanstvena grana rada:	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
Zadatak diplomskog rada:	U radu je potrebno opisati ukratko tehnologije baterijskih spremišta energije koje su koriste u distributivnim mrežama. Istražiti u literaturi i prikazati mogućnosti primjene i utjecaja baterijskih spremišta na električne prilike u mreži. Ukratko opisati metaheurističke metode optimizacije. Za primjere mreže iz literature obaviti simulacije i određivanje optimalne lokacije i veličine baterijskih spremišta energije u distributivnoj mreži. Preporuka: kao simulacijski alat koristiti OpenDSS, a za provedbu optimizacije koristiti gotove alate (neku od metaheurističkih metoda) dostupne u programskim paketima u PYTHON (preporuka) ili MATLAB okruženju. Tema rezervirana za: Matija Kereta
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	22.02.2021.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 15.05.2021.

Ime i prezime studenta:

Matija Kereta

Studij:

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

Mat. br. studenta, godina upisa:

D-1104, 03.10.2017.

Turnitin podudaranje [%]:

16

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Optimalna alokacija baterijskih spremišta energije u distributivnim mrežama s distribuiranom proizvodnjom**

izrađen pod vodstvom mentora Izv. prof. dr. sc. Marinko Barukčić

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

## Sadržaj

1. Uvod .....	6
2. Distribuirana proizvodnja električne energije .....	8
2.1 Prednosti distribuirane proizvodnje .....	9
2.2 Nedostaci distribuirane proizvodnje .....	10
2.3 Tehnologije distribuiranih izvora .....	10
2.3.1 Vjetroelektrane .....	12
2.3.2 Fotonaponski sustavi .....	14
3. Sustavi za pohranu električne energije .....	16
3.1 Mehanički sustavi za pohranu električne energije .....	17
3.2 Električni sustavi za pohranu električne energije .....	20
3.3 Kemijski sustavi za pohranu električne energije .....	21
3.4 Termički sustavi za pohranu električne energije .....	21
4. Elektrokemijska pohrana električne energije .....	22
4.1 Sekundarne baterije .....	22
4.2 Sustavi baterijskih spremišta energije .....	25
4.2.1 Olovno-kiselinska baterija .....	27
4.2.1.1 VRLA baterije .....	29
4.2.1.2 Olovno-kiseli ugljici .....	30
4.2.2 Litij-ionske baterije .....	32
4.2.3 Natrij-sumporne baterije .....	34
4.2.4 Nikal-kadmij i nikal-metal-hidrid baterije .....	35
4.2.5 Redoks protočne baterije .....	36
5. Evolucijski algoritam .....	38
5.1 Diferencijalna evolucija .....	43
6. Opis optimizacijskog problema .....	47
7. OpenDSS simulacijski alat .....	49
7.1 Primjena OpenDSS programa .....	50
8. Rješavanje problema optimizacije pomoću Pythona .....	53
8.1 Opis izvornog Python koda .....	54
8.2 Rezultati simulacije i analiza rezultata .....	57
9. Zaključak .....	67
Literatura .....	68

Popis slika .....	72
Popis tablica .....	74
SAŽETAK .....	75
ABSTRACT .....	75
ŽIVOTOPIS .....	76
PRILOG I – Python kod korišten za optimizaciju .....	77

## 1. Uvod

U nezaustavnoj modernizaciji svijeta, povećala se upotreba izvora električne energije koji pretvaraju obnovljive izvore energije u električnu. Dan danas, scenario se i dalje mijenja i sve je veći broj distribuiranih izvora. Izraz distribuiran izvor energije se odnosi na produkciju električne energiju iz obnovih izvora energije i potrošnju te energiju blizu mjesta potrošnje te energije [6]. Energija iz distribuiranih izvora energija se naziva distribuirana energija i može se izravno pretvoriti u električnu energiju ili se koristi u kogeneraciji, postupku koji istovremeno stvara električnu i toplinsku energiju.

Distribuirani izvori su većinom manjih snaga i rasuti su po cijelom području mreže, što čini elektroenergetski sustav manje centraliziranim. Povećanjem broja distribuiranih izvora, dođe se do problema da postoji velik broj izvora energije koji imaju malu ili nikakvu kontrolu nad upravljanjem proizvedene snage. Iako se prije debatiralo o potrebi i korištenju spremišta električne energije, stvara se sve veća potreba za spremanje te energije zbog opterećenja, vremenske promjenjivosti, promjenjivog intenziteta energenata distribuiranih izvora i nepredvidljive prirode konzumiranja električne energije.

U svrhu što boljeg iskorištenja energije iz obnovljivih izvora, potrebno je koristiti baterijska spremišta energije (BES) da se postigne što povoljnija tehnička i ekonomska slika u mreži. Baterijska spremišta energije nisu samo primjenjiva kod obnovljivih izvora kao vjetroelektrane ili fotonaponske ćelije, kod kojih se očekuju periodi kada se proizvodi malo ili nimalo energije, nego su primjenjiva i kod distribuiranih izvora s konstantnom izlaznom snagom kao hidroelektrane i bioelektrane. Proizvodnja električne energije ne može stati po noći jer nema dovoljno potrošača, što stvara priliku da se baterijska spremišta energije iskoriste za preuzimanje te energije i puštanje nazad u mrežu kada je potrebno tijekom dana, izbjegavajući u procesu preopterećenje stalnog pogona.

Zbog toga je namjera ovog rada da se napravi “pametno” baterijsko spremište koje ne zahtjeva kontrolu čovjeka da radi ispravno u distributivnoj mreži. Za takvo baterijsko spremište je potrebna optimizacija da se može prilagoditi mreži. Pošto je svaka distributivna mreža drugačija, potrebna je velika količina ručnog rada da se dizajnira idealno baterijsko spremište. Iako je potrebno puno rada da se karakteristike baterije odrede, lokaciju treba uzeti u obzir što povećava količinu rada.

Trenutno je literatura o kosimulacijama slaba na hrvatskom, ali i na engleskom. Pošto su korišteni programi besplatni i veoma razvijeni, literatura i metode neće više biti ekskluzivni samo tvrtkama koje su u mogućnosti platiti programe i vršiti proračuna na razini mreže. Iako je korištena virtualna mreža, ne primjer stvarne mreže, cilj je napraviti program koji je prilagodljiv svakoj distributivnoj mreži, uz male preinake.



## 2. Distribuirana proizvodnja električne energije

Distribuirana proizvodnja (*ukratko* DP) je relativno novi pristup u elektroenergetskoj industriji na globalnoj razini i s vremenom se povećava uloga i značaj takvog tipa proizvodnje električne energije u mrežama. U prošlosti su konvencionalne elektrane kao termoelektrane, hidroelektrane i nuklearne elektrane naveliko prevladavale u elektroenergetskim sustavima. One šalju velike količine električne snage preko transformatora u visokonaponsku prijenosnu mrežu koje su preko velikih udaljenosti služile kao transport snage do distribucijskih transformatora koji bi spustili napon iz visokonaponske prijenosne mreže na srednjenaponsku i niskonaponsku distribucijsku mrežu prema potrošačima.

Navedene klasične elektrane jedino su mogle biti sagrađene blizu resursa s kojima bi proizvodile električnu energiju, što smanjuje broj mogućih elektrana i raznolikost izvora električne energije. Naime, to nisu jedini razlozi zašto se stvorila potreba za distribuiranom proizvodnjom električne energije. 2005. godine stupio je na snagu Kyoto protokol, međunarodni sporazum koji obvezuje većinu zemalja UN-a na smanjenje emisije stakleničkih plinova. Zbog očuvanja okoliša mogu se dobiti naknade za tehnologije koje su prihvatljivije za očuvanje okoliša da se motivira više poduzetnika na korištenje tih tehnologija. Ako se promatra cijena bazirana po kWh električne energije, DP je skuplja od proizvodnje električne energije pomoću konvencionalnih goriva, ali takav pristup ne uzima u obzir dodatne troškove koji se vežu uz konvencionalna goriva u ukupnoj računici.

Prije nego što se predstave prednosti i nedostaci, potrebno je objasniti što zapravo znači distribuirana proizvodnja električne energije. Prema [6], DP je proizvodnja električne energije blizu mjesta konzuma i za proizvodnju koje se koriste obnovljivi izvori energije, kao vjetar, sunčeve zrake, plima i oseka, valovi, geotermalna toplina i biomasa. Drugi izvori [3] [17] tvrde da je definicija složenija, zato jer su se konvencionalne elektrane uvijek spajale na visokonaponsku mrežu, dok DP se spaja na distributivnu mrežu koja je na srednjonaponskoj i niskonaponskoj razini. Zbog spajanja na distributivnu mrežu, distribuirana proizvodnja ima takav naziv. Prije nego što su se stručnjaci donedavno složili za naziv distribuirana proizvodnja, postojali su drugi nazivi koji ukazuju na složeniju definiciju. Prema [17] jedna od karakteristika DP je decentralizirana proizvodnja što je ujedno bio i naziv prije dogovorenog. Razlog za takav naziv je bio zbog postupka planiranja i rasporeda proizvodnje distribuiranih izvora [3]. Pošto distribuirani izvori

nisu centralizirani, instalirana snaga ne može biti na razini konvencionalnih elektrana i dispečer ne može upravljati distribuiranim izvorima unutar elektroenergetskog sustava.

Ukratko, distribuirana proizvodnja električne energije obilježena je sljedećim odrednicama[3]:

- Postupak planiranja distribuiranih izvora nije centraliziran
- Raspored proizvodnje distribuiranih izvora nije centraliziran
- Distribuirani izvori uobičajeno su priključeni na distribucijsku mrežu
- Veličina izgradnje distribuiranih izvora manja je od 100-150 MW

## **2.1 Prednosti distribuirane proizvodnje**

Prednosti distribuiranih izvora su[3] [18] [19] [20]:

- Manje štetan utjecaj na okoliš
- Nema ovisnosti o skupim primarnim gorivima
- Smanjivanje gubitaka u prijenosnom sustavu zbog neposredne blizine potrošačima
- Postrojenja za DP imaju znatno niže investicijske troškove u usporedbi s velikim centraliziranim proizvodnim objektima
- Mogućnost povezivanja distribuiranih izvora u pametnu mrežu
- U kombinaciji sa sustavima za pohranu električne energije omogućuje prikupljanje energije iz više izvora i poboljšavaju sigurnost opskrbe
- Potrošači mogu biti aktivni sudionici u mreži
- Povećanje tržišta za masovnu proizvodnju manjih uređaja u odnosu na proizvodnju velikih uređaja u malim serijama
- Lakše je pronaći lokaciju za instalaciju postrojenja
- Brža instalacija i puštanje u pogon. Znatno kraće vrijeme potrebno za ishođenje potrebnih dozvola
- Visoka učinkovitost koja se postiže u kogeneracijskim postrojenjima smanjuje pogonske troškove i omogućuje korištenje otpadne topline
- Mogućnost iskorištavanja CO<sub>2</sub> iz konvencionalnih elektrana za proizvodnju energije.
- Dozvoljava više igrača na tržištu što stvara više prilika u industriji

- Pouzdaniji od centralizirane proizvodnje zato jer postoji manja šansa da padne više manjih distribuiranih izvora nego jedna velika konvencionalna elektrana.

## 2.2 Nedostaci distribuirane proizvodnje

Nedostaci distribuiranih izvora su[3] [19] [20]:

- Uvođenje nereguliranih i neupravljivih generatora u distribucijsku mrežu
- Distribuirani izvori kao vjetroelektrane i fotonaponski sustavi su nepredvidljivi zbog vremenskih uvjeta
- Nemogućnost upravljanja distribuiranim izvorima od strane dispečera
- Čine elektroenergetski sustav veoma složenim i analizu težom
- Gleda ih se isključivo kao proizvođače energije zbog tehničkih svojstava distribuiranih izvora
- Distribuirani izvori općenito ne sudjeluju u regulaciji napona
- Vjetroelektrane uzrokuju poteškoće u regulaciji frekvencije
- Fotonaponski sustavi i vjetroturbine proizvode samo aktivnu snagu i trebaju izvor reaktivne snage u mreži
- U Hrvatskoj nije isplativa izgradnja distribuiranih izvora kao u naprednijim zemljama zbog problema otkupa viška električne energije

## 2.3 Tehnologije distribuiranih izvora

Ulomak će se usredotočiti na tehnologije distribuirane proizvodnje koje proizvode električnu energiju korištenjem varijabilnih obnovljivih izvora energije. Vjetroelektrane i fotonaponski sustavi smatraju se varijabilnim izvorima energije jer ovise o vremenskim prilikama koje su nepredvidljive prirode, što čini navedene dvije tehnologije neupravljivim izvorima energije. Zbog te neupravljivosti nije moguće kontrolirati proizvodnju da se uskladi s traženom električnom energijom u mreži. Dodatan problem s neupravljivosti je što u periodima kada je potražnja niska a proizvodnja veća, višak energije nije iskorišten ako se ne spremi ili pusti u mrežu.

Oba problema, neupravljivost proizvodnje i višak energije, mogu se riješiti dodavanjem baterijskih spremišta energije. Prihvatljivi investicijski troškovi i dostupnost na razini distribucijske i niskonaponske mreže za krajnje korisnike ih čini idealnim rješenjima za navedene probleme.

Pokraj toga mogu energiju spremati na duži vremenski period, mogu biti instalirani na udaljenim lokacijama i mogu se modularno povećavati po potrebi.

U Hrvatskoj se fotonaponski sustavi i vjetroelektrane mogu postaviti na udaljene i izolirane lokacije kao otoke koji su zbog mediteranske klime idealne lokacije. Čak zimi kada je manje sunca, ima više vjetra što može osigurati trajnu, čistu energiju tokom cijele godine. Ako nema puno lokalnih potrošača, spremljeno je dovoljno energije i prognoza vremena izgleda povoljno, energija se može prodati kada je viša cijena. Kao i sama baterijska spremišta, fotonaponski sustavi i vjetroelektrane mogu se modularno povećavati po prilici i potrebi.

Donedavno su vjetroelektrane i fotonaponski sustavi spadali samo pod vršne elektrane, elektrane koje pokrivaju promjenjivu potrošnju gdje je učestala promjena snage. Međutim zbog napredaka u tehnologiji, materijalima i dizajnu danas mogu spadati pod temeljne elektrane, one elektrane koje pokrivaju potrošnju konstantnog iznosa sa sporom promjenom snage. Da varijabilni obnovljivi izvori energije spadaju pod temeljne elektrane moraju minimalno biti reda veličine nekoliko desetaka MW i ne moraju nužno imati pohranu el. energije. U otočnom radu takve elektrane moraju imati sustav za pohranu el. energije kao oblik osiguranja, međutim ako se spoje na mrežu, elektrane koje mogu kontrolirati iznos snage služe kao osiguranje da se pokrije vršna potrošnja.

Pošto je cijena baterija i dalje visoka, može se smanjiti potreban broj baterija dodavanjem još jednog izvora energije u autonomni sustav. Pokraj fotonaponske elektrane se mogu dodati gorive ćelije ili vjetroagregati. Prednost dodavanja vjetroagregata je što se energija može pohranjivati tijekom noći kada fotonaponska elektrana ne proizvodi, a opterećenje je veoma nisko.

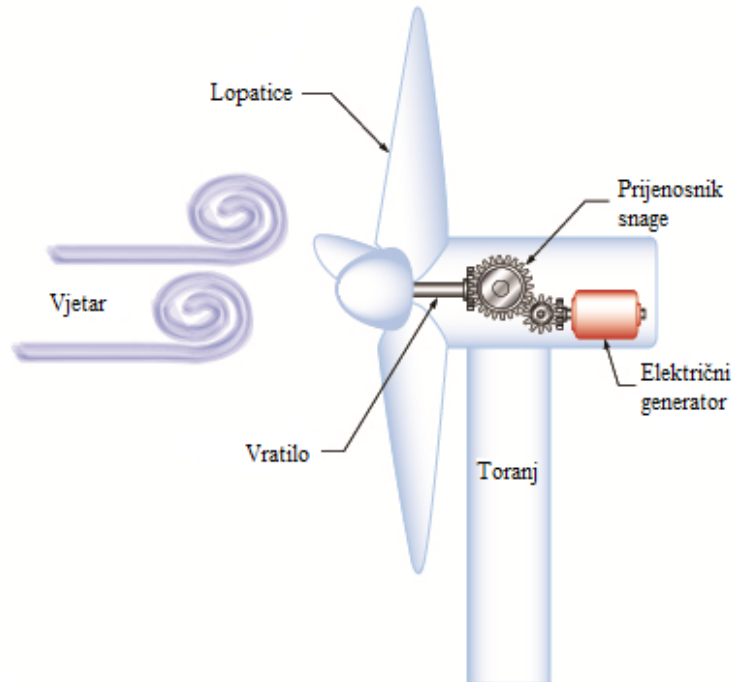
### 2.3.1 Vjetroelektrane

Vjetroagregat je pogonski stroj koji preko rotirajuće vjetroturbine pretvara kinetičku energiju vjetra u mehaničku energiju koja se zatim preko vratila pretvara u električnu energiju preko električnog generatora. Skup vjetroagregata koji su blisko smješteni se nazivaju vjetroelektranom. Vjetroagregati se mogu podijeliti na nekoliko načina prema slijedećim kriterijima [37]:

1. Prema osi vrtnje se mogu podijeliti na vjetroagregate s okomitom osi vrtnje i vjetroagregate s vodoravnom osi vrtnje
2. Prema snazi se mogu podijeliti na vjetroagregate malih, srednjih i velikih snaga
3. Prema vrsti generatora se mogu podijeliti na vjetroagregate s istosmjernim, vjetroagregate sa sinkronim i vjetroagregate sa asinkronim generatorima
4. Prema brzini vrtnje se mogu podijeliti na vjetroagregate sa stalnom brzinom vrtnje i vjetroagregate s promjenjivom brzinom vrtnje
5. Prema lokaciji instalacije se mogu podijeliti na vjetroagregate na kopnu i vjetroagregate na pučini

Jednostavan presjek vjetroagregata je prikazan na slici 2.1 gdje se može vidjeti da se kinetička energija vjetra prenosi na lopatice vjetroagregata koja pogoni sporookretno vratilo spojeno s prijenosnikom snage. Lopatice zajedno s glavčinom čine rotor vjetroturbine. Prema [37] uloga prijenosnika snage je da poveća brzinu vrtnje sporookretnog vratila s oko 30 – 60 o/min na oko 1200 – 1500 o/min brzoookretnog vratila. Veća brzina vrtnje brzoookretnog vratila je nužna za stvaranje električne energije za većinu generatora.

Cijeli pogonski sustav vjetroagregata se nalazi u kućištu čija je uloga da štiti generatorski sustav sa svim komponentama od okolišnih utjecaja i da štiti okoliš od buke generatorskog sustava. Kućište je smješteno na stupu koji je najčešće izveden kao cjevasta konstrukcija karakterizirana visokom čvrstoćom i visokim otporom na vibracije. U slučaju da je brzina vjetra veća od predviđene mora postojati sustav koji bi rasteretio dinamičko opterećenje i održao projektnu brzinu vrtnje konstantnom. Za to služi kočnica koja je smještena na sporookretnoj osovini prije prijenosnika snage ili na brzoookretnoj osovini generatora. Osim upravljačkog i nadzornog sustava i opreme za zakretanje, zadnji značajan element je anemometar, mjerni instrument čija je uloga mjerenje brzine strujanje zraka i jačine vjetra.



Slika 2.1: Jednostavan presjek vjetroagregata [38]

Prema [37] vjetroagregat ne može iskoristiti maksimalnu snagu vjetra tako da je njezina snaga uvijek manja od snage vjetra. Snaga koju rotor vjetroagregata može ostvariti iz snage vjetra jednaka je razlici kinetičkih snaga mase zraka ispred i iza lopatica vjetroelektrane. Maksimalna učinkovitost rotora vjetroelektrane je 59,3 % i naziva se Betzovim limitom. Snaga vjetra se ne može potpuno iskoristiti zato jer bi brzina vjetra nakon vjetroagregata pala na nulu i ako se vjetar zaustavi na izlazu iz vjetroagregata tada svježi vjetar ne može više ući zato jer bi bio blokiran. Da bi se vjetar nastavio kretati kroz turbinu, s druge strane strane mora biti nekakvo kretanje vjetra bez obzira na brzinu.

Uz maksimalnu učinkovitost rotora u maksimalan stupanj djelovanja cijele vjetroelektrane još treba uzeti u obzir i učinkovitost pogonskog mehanizma i generatora [37].

Snaga vjetroelektrane na priključnicama generatora onda je:

$$P = 0.5\rho Av^3 C_p \eta_m \eta_e [W]$$

Gdje je:

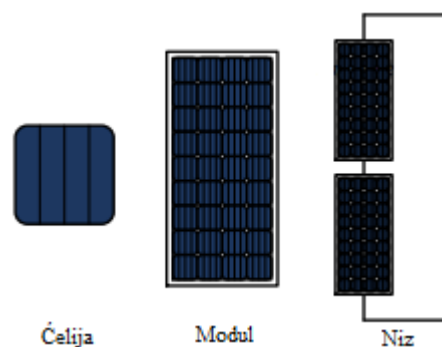
- $\rho$  – gustoća zraka [ $\text{kg/m}^3$ ]
- $A$  – površina koju opisuju lopatica rotora [ $\text{m}^2$ ]

- $v$  – brzina vjetra [m/s]
- $C_p$  – učinkovitost rotora vjetroelektrane
- $\eta_m$  – ukupni mehanički stupanj korisnog djelovanja pogonskog mehanizma
- $\eta_e$  – stupanj korisnog djelovanja električnog generatora

### 2.3.2 Fotonaponski sustavi

Fotonaponski sustavi predstavljaju integriran skup fotonaponskih modula i ostalih komponenata, projektiran tako da primarnu Sunčevu energiju izravno pretvara u konačnu električnu energiju kojom se osigurava rad određenog broja istosmjernih i/ili izmjeničnih trošila, samostalno ili zajedno s pričuvnim izvorom [39]

Temeljni gradivni blok fotonaponskog sustava je fotonaponska ćelija. Ćelija se sastoji od dva ili više sloja poluvodičkog materijala, od koji je najčešći silicij. Slojevi su debljine između 0,001 i 0,2 mm i dopirani su kemijskim elementima kako bi stvorili “p” i “n” spojeve. Kada je sloj silicija izložen sunčevoj svjetlosti i apsorbira dovoljno energije, elektroni iz materijala se uzbude i napuštaju sloj da putuje prema sloju s manje naboje što potiče proticanje struje. Jedna ćelija proizvodi samo 1 ili W, uz napon od oko 0,6 V, što je premalo za većinu primjena, ali se ćelije mogu spajati u serije i paralele da se postignu napon i struja dovoljno veliki da se mogu primjeniti. Električno povezane fotonaponske ćelije nazivamo modulom i više modula se može povezati da se napravi niz, što se može vidjeti na slici 2.2 [6] [39].



Slika 2.2: Prikaz FN ćelije, modula i niza [39]

Fotonaponski niz sam po sebi ne tvori fotonaponski sustav. Moramo također imati [39]:

- strukturu za postavljanje
- tragač maksimalne snage i uređaje za regulaciju
- komponente koje prihvaćaju istosmjernu struju proizvedenu od uređaja. Baterije, punjač ili
- ako potrošači zahtijevaju izmjeničnu struju ili je sustav spojen na mrežu, u sustavu je potreban i pretvarač tj. izmjenjivač
- eventualne dodatne izvore električne energije kod hibridnih sustava, s npr. vjetroagregatima, dizel agregatima ili vodikovim ćelijama.

Ovisno o prirodi poluvodičkog materijala koji se koristi u proizvodnji, postoje tri različite vrste komercijalnih fotonaponskih ćelija: monokristalne, polikristalne i amorfne [6].

Tablica 2.1: Performansa različitih vrsta solarnih ćelija [6]

Materijal	Učinkovitost u laboratorijskim uvjetima	Učinkovitost u uvjetima masovne proizvodnje
Monokristalni silicij	24 %	14 – 17 %
Polikristalni silicij	18 %	12 – 15 %
Amorfni silicij	13 %	5 – 7 %

Maksimalan stupanj djelovanja fotonaponske ćelije je ograničen na oko 35 % zbog ukupnih gubitaka fotonaponske pretvorbe koji iznose minimalno 65 %

Izlazna snaga fotonaponskog niza se može izraziti matematički [6]:

$$P = \eta I S_n [W]$$

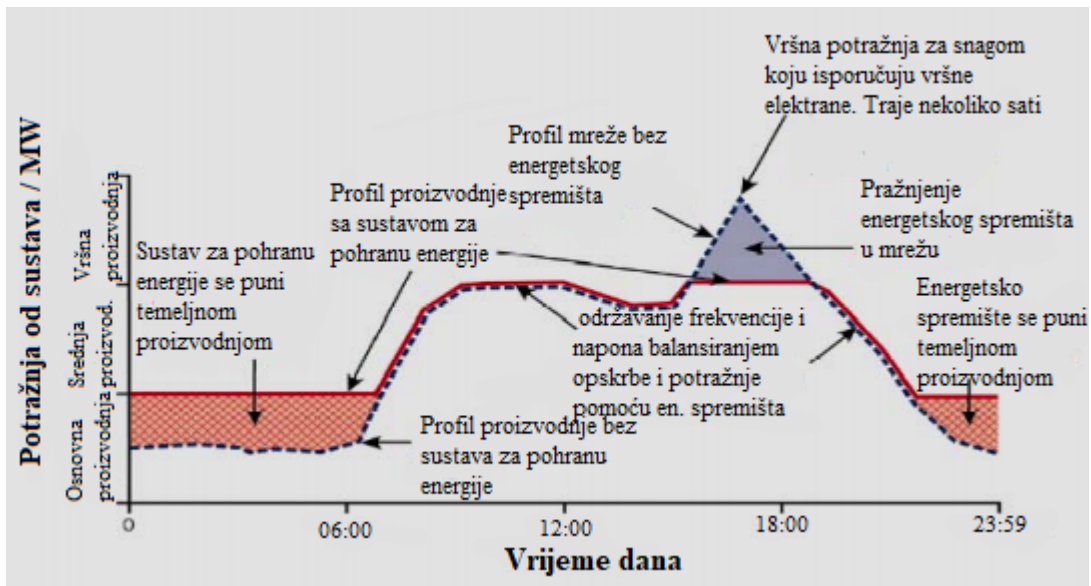
Gdje je:

- $\eta$  – učinkovitost fotonaponskog niza
- $I$  – insolacija (snaga proizvedena po jedinici kvadratnog metra ploče)
- $S_n$  – broj modula u nizu



### 3. Sustavi za pohranu električne energije

Sustav za pohranu električne energije je naziv za svaki sustav koji ima sposobnost pohranjivanja raznih oblika energije koji se po potrebi može pretvoriti u električnu energiju i obratno. Svojstvo koje razlikuje sustave za pohranu električne energije od sustava za pohranu energije je reverzibilnost. Za primjer, fosilna goriva su jednostavan i drevan oblik sustava za pohranu energije, međutim čim se izgaranjem oslobodi unutrašnja energija nije moguće vratiti pretvorenu energiju u isto energetske stanje kao kod npr. baterije. Bitan faktor sustava za pohranu električne energije je što se može puniti u dijelu dana kada je osnovna proizvodnja temeljnih elektrana veća od potrošnje i taj višak električne energije se može spremati u nekoliko oblika energije. Skupljen višak energije se može pustiti nazad u mrežu u obliku električne energije za vrijeme vršnih opterećenja tj. visoke potražnje u kasnim popodnevnim satima da se ne moraju pokretati vršne elektrane. Navedeni proces se može vidjeti na slici 3.1:



Slika 3.1: Krivulja potražnje energije u danu [11]

U električnom sustavu je potrebno trenutno i kontinuirano uskladiti proizvodnju i potrošnju električne energije. Ako nije postignuta ravnoteža uzrokuju se promjene frekvencije što dovodi do odstupanja od zadane vrijednosti i smanjenja kvalitete napajanja. Stoga su svi operatori elektroenergetskog sustava dužni održavati dovoljnu količinu djelatne snage u rezervi za vanredna stanja.

Jednostavan način za razvrstavanje sustava za pohranu električne energije je razvrstanje prema obliku energije u koje se električna energija pretvori, kao na slici 3.2:

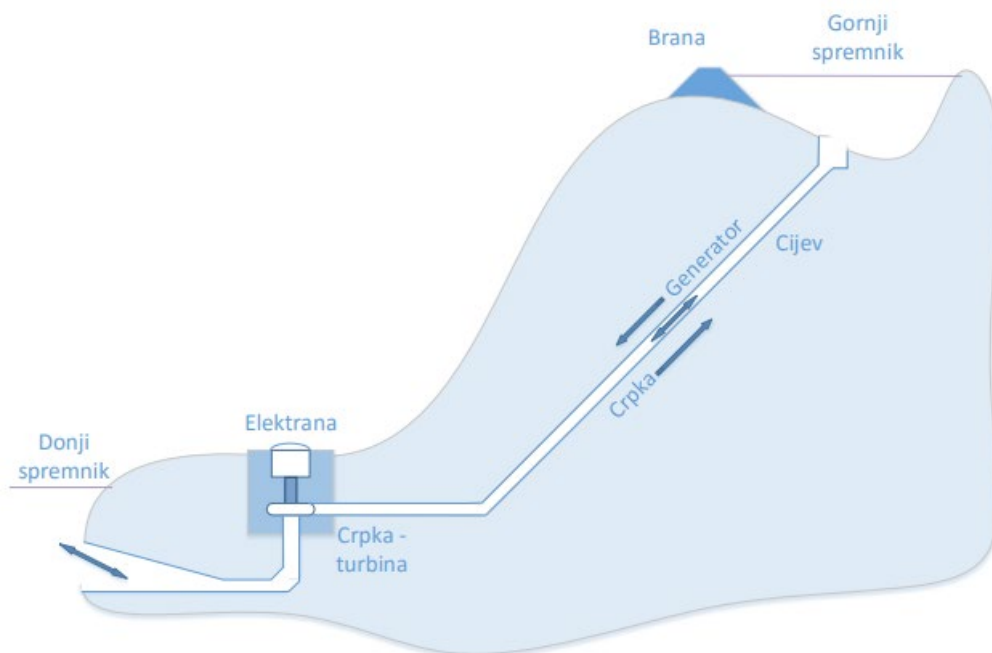


Slika 3.2: Podjela sustava za pohranu električne energije po obliku energije u koje se električna energija pretvori [10]

Elektrokemijski sustavi za pohranu energije biti će obrađeni u zasebnom ulomku pošto baterijska spremišta energije spadaju pod elektrokemijske sustave.

### 3.1 Mehanički sustavi za pohranu električne energije

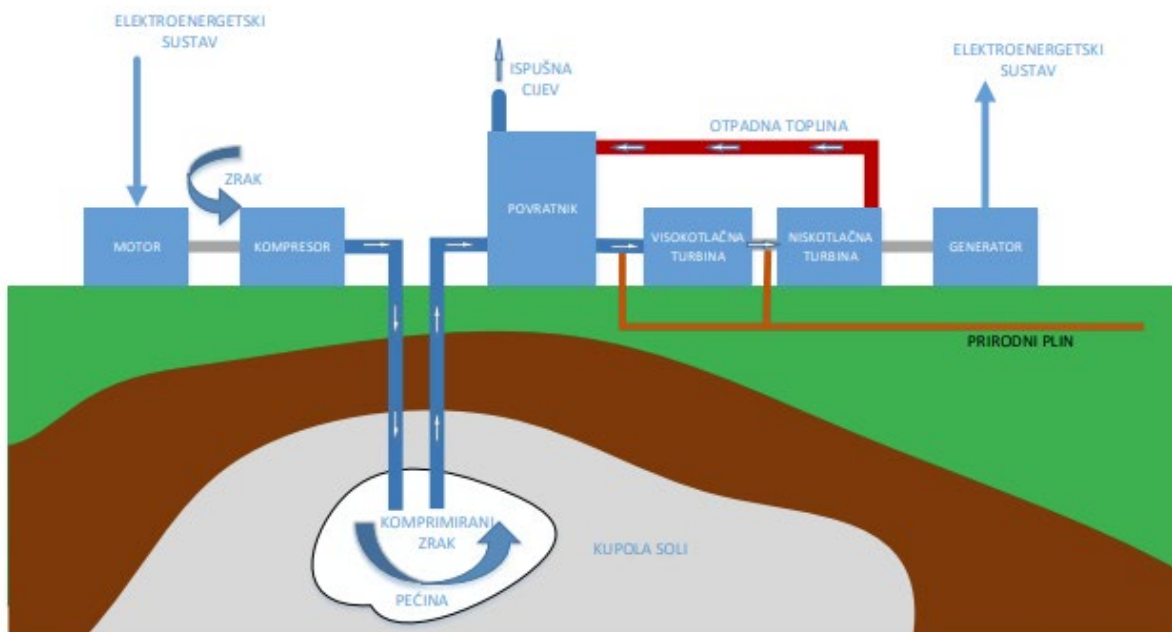
Najstarija korištena tehnologija za pohranu električne energije, prema [11], je reverzibilna ili crpno-akumulacijska hidroelektrana i spada pod mehanički sustav za pohranu električne energije. Tipična reverzibilna hidroelektrana se sastoji od dva rezervoara koji su izgrađeni na dvije različite visine i viši rezervoar sadrži energiju u obliku potencijalne energije vode. Električna energija se proizvodi kada se pusti voda iz višeg rezervoara u niži rezervoar, dok voda prolazi kroz hidraulične turbine koje proizvode električnu snagu reda veličine do 1 GW.



Slika 3.3: Princip rada reverzibilne hidroelektrane [10]

Prednost reverzibilnih hidroelektrana je što su već razvijena tehnologija, mogu upravljati s proizvedenom energijom, imaju rezervu i najisplativi su oblik pohrane trenutno. Naime ograničenja su što su veoma geografski ograničena, lokacija postrojenja je velik izazov, visoki su ukupni troškovi projekta i utjecaj na okoliš i život u vodi može bit poprilično štetan [11].

Drugi mehanički sustav za pohranu električne energije je skladištenje energije komprimiranim zrakom. Slično reverzibilnim hidroelektranama, sustavi za skladištenje energije komprimiranim zrakom za vrijeme niske energetske potrošnje u mreži preko kompresora šalju komprimiran zrak u rezervoar, koji je često velika podzemna struktura kao špilja. Kada dođe vrijeme visoke potražnje za električnom energijom, zrak se može ali ne mora pomiješati s prirodnim plinom i ako je dovoljno topao ide u plinsku turbinu gdje expandira [10], vrti rotirajuće lopatice koje zavrte generator koji proizvodi električnu energiju. Proces se može vidjeti na slici 3.4



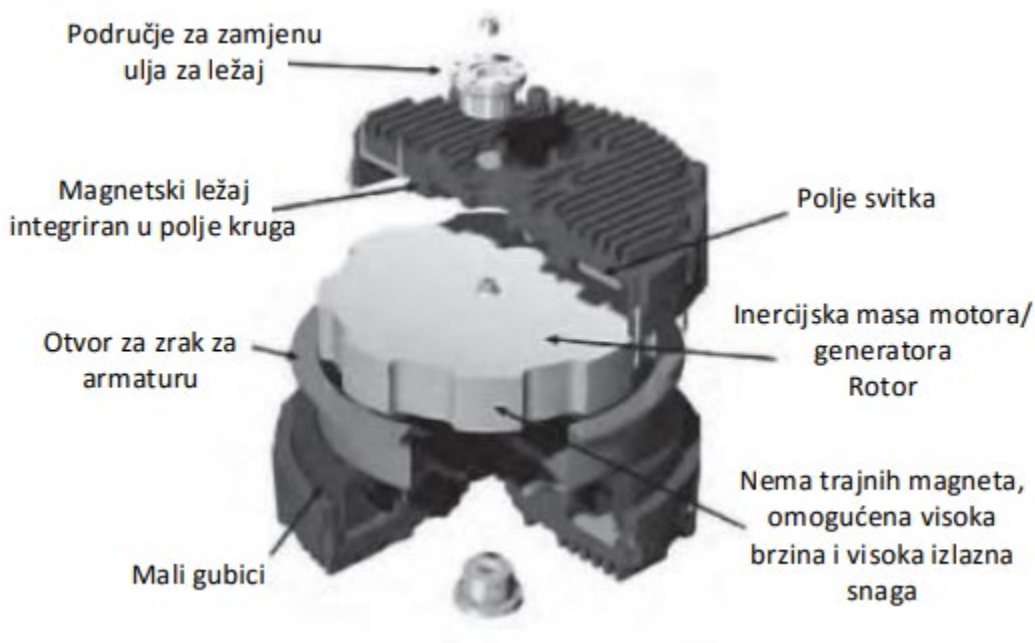
Slika 3.4: Sustav za skladištenje energije komprimiranim zrakom [10]

Nedostaci su niža učinkovitost, sporije vrijeme odziva u usporedbi s baterijama, potreba za velikim spremnikom ili strukturom što stvara geografska ograničenja i ima loš utjecaj na okoliš [9]. Uz to kompresija zagrijava zrak, što dovodi do nepoželjnog povećanja temperature koje može smanjiti učinkovitost procesa i uništiti dijelove sustava [13]. Prednosti tehnologije su velik kapacitet, integracija obnovljivih izvora, mogućnost pohranjivanja energije na duže vremenske periode, manji troškovi održavanja, rotirajuća rezerva i rješenja za vršna opterećenja [9] [11].

Zadnji mehanički sustav za pohranjivanje električne energije koji se koristi je zamašnjak, iako u manjoj mjeri u usporedbi s dva navedena mehanička sustava za pohranu električne energije. Električna energija je kod zamašnjaka pohranjena kao rotacijska energija pomoću rotirajućeg cilindra na osovini koji se vrti visokim brzinama. Može raditi kao motor i pohraniti energiju, ali i može raditi kao generator i pretvoriti tu rotacijsku energiju nazad u električnu kada je potrebno pomoću istog uređaja za prijenos koji je doveo električnu energiju. Veoma su korisni za regulaciju frekvencije, stabilnost i mogućnost odgovora na vršna opterećenja zbog brzog odziva i visoke vršne snage. Zamašnjaci mogu primiti i predati 700 kW za 5 sekundi.

Njihov dug životni ciklus i visoka učinkovitost uz navedene prednost ih čini veoma privlačnima u primjeni za poboljšanje kvalitete električne energije. Naime, veliki problem je što imaju gubitke energije do 20 % po satu što znači da im je vrijeme za pohranu energije veoma ograničeno. Može

se pohraniti više energije povećanjem brzine rotacije, ali se dođe do ograničenja zbog vlačne čvrstoće rotora.



Slika 3.5: Presjek zamašnjaka [10]

### 3.2 Električni sustavi za pohranu električne energije

Ultrakondenzatori, poznati kao i superkondenzatori, su ukratko kondenzatori visokog kapaciteta. Funkcionalno spadaju između elektrolitskih kondenzatora i punjivih baterija. U praksi to znači da se pune brže od baterija, da mogu pohraniti više energije od elektrolitskih kondenzatora i da im je životni vijek između dvije tehnologije. Trenutno se najviše primjenjuju u javnom prijevozu i stabilizaciju snage [14].

Prednosti su: širok raspon radne temperature, iznimno brzo punjenje, visoka učinkovitost, lako se recikliraju i životni vijek im je između sto tisuća i milijun ciklusa [9].

Veliki nedostatak ultrakondenzatora je dugoročna pohrana energije. Mogu izgubiti čak do 10-20 % svog naboja dnevno zbog samopražnjenja [14]. Dodatni problemi su što se linearno smanjuje izlazni napon kroz životni vijek i trenutno su previsoki troškovi za širu primjenu [9]

Drugi električni sustav za pohranu električne energije je supravodljivi magnetski svitak. Supravodljivi svitak se održava na temperaturi nižoj od njegove kritične temperature dok kroz njega prolazi istosmjerna struja koja stvara magnetsko polje u kojem je pohranjena energija [10]. Zbog uvjeta rada supravodljivog svitka, potreban je rashladni sustav i dodatno napajanja za rad.

Prednost je što može dati vrlo visoku snagu gotovo trenutno i energija može biti pohranjena dugoročno sve dok radi sustav rashladni sustav [9]. Problem je taj što pouzdanost i vrijeme pohrane energije ovise o rashladnom sustavu.

### **3.3 Kemijski sustavi za pohranu električne energije**

Svrha kemijskog sustava za pohranu električne energije je da koristi višak električne energije za elektrolizu vode, čime se dobije vodik. Može se koristiti sam čisti vodik kao energent i može se stvoriti metan iliti sintetički prirodni plin kao reakcija između vodika i ugljičnog dioksida ( $\text{CO}_2$ ). Električna energija se dobije elektrokemijskom reakcijom koja je obrnuta od elektrolize i odvija se u gorivoj ćeliji u kojoj reakcija kisika i vodika stvara vodu i toplinu. Kisik se ne pohranjuje kao i vodik, nego se uzima iz zraka. Kemijski sustav za pohranu energije je jedini koncept koji omogućuje pohranu energije u TWh, što mogu i na duže vremensko razdoblje. [9]

Iako je tehnologija relativno nova, pokazuje potencijal zbog fleksibilne prirode vodika kao energenta i mogućnost integracije u već postojeću infrastrukturu. Gorive ćelije nisu jedini način da se proizvede električna energija pošto se čisti vodik može mješati s plinom do određene koncentracije zbog ogrjevne vrijednosti, što znači da su plinski motori, plinske turbine i kombinacija plinskih i parnih mogu izbor za proizvodnju električne energije [9]

Nedostaci su: toplinski gubici u elektrolizi i slaba ogrjevna moć vodika. Metan ima nižu učinkovitost od vodika zbog dodatnih toplinskih gubitaka u metanizaciji, ali ima veću gustoću energije. Veći problem za metan predstavlja dostupnost  $\text{CO}_2$  što znači da je isplativiji bliže izvoru  $\text{CO}_2$ .

### **3.4 Termički sustavi za pohranu električne energije**

Za razliku od ostalih sustava za pohranu električne energije, termički se čini najmanje isplativ zato jer je toplina najniži oblik energije i koristi se kod solarne termoelektrane da opet ugrije paru za

parnu turbinu. Princip pohrane velike količine topline dolazi od materijala kao rastaljenih soli koje mogu sadržati veliku količinu energije tijekom promjene iz jednog agregatnog stanja u drugo.

## **4. Elektrokemijska pohrana električne energije**

Pod elektrokemijske sustave za pohranu električne energije spadaju sekundarne i protočne baterije. Primarne baterije su jednokratne i ne spadaju pod sustave za pohranu električne energije zbog toga. Tehnologije u elektrokemijskoj pohrani el. energije sadrže elektrokemijske ćelije koje čine bateriju. Prema [25], sposobne su pomoću električne energije izazvati kemijske reakcije pohraniti energiju i generirati električnu energiju dobivene preko kemijske energije iz kemijskih reakcija. U većini slučajeva, generirana električna energija je razlika u kohezivnim ili veznim energijama metala i oksida ili molekula koje prolaze elektrokemijsku reakciju. U ulomku će se obraditi tehnologije sekundarnih baterija koje se koriste u električnom sustavu, s redoks baterijama.

Napredak baterijskih spremišta energije buknuo je u 21. stoljeću zbog velike količine komercijalno dostupnih proizvoda. Proizvodi kao električni automobili i smartphoni - prva su asocijacija na električne baterije, međutim postoji veliki spektar proizvoda koji su postali dostupniji zbog razvitka. U usporedbi s drugim tehnologijama za pohranu električne energije, baterije trenutno imaju najširi raspon primjene. Vrsta i količina primjene baterijskih tehnologija se neprestano širi u područjima: skladištenje energije u elektroenergetskom sustavu, električna i električna hibridna vozila, prijenosna elektronika i skladištenje električne energije proizvedene u obnovljivim izvorima poput fotonaponskih elektrana i vjetroelektrana. Zato se baterije proizvode u velikom rasponu kapaciteta, od kapaciteta manjih od 100 W do modularnih konfiguracija kapaciteta nekoliko MW

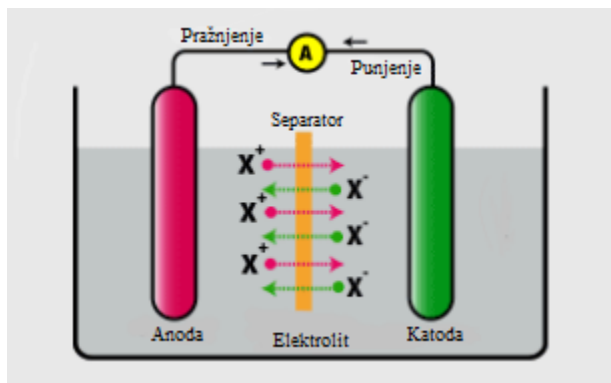
Prema [21] oko 90 % baterija na tržištu su jednokratne i smatraju se ekološki štetnom tehnologijom zato jer postanu štetan otpad čim se isprazne i zahtjevaju odvojeno odlaganje. Osim toga, energija potrebna da se proizvede baterija je oko 50 puta veća od energije koju sadrži. Iz tog razloga više nije ekonomski isplativo koristiti jednokratne baterije u bežičnim uređajima koji su sve dostupniji i zato dolaze sastavljeni s punjivim baterijama.

### **4.1 Sekundarne baterije**

Sekundarne baterije su definirane svojim povratnim kemijskim reakcijama u usporedbi s nepovratnim kemijskim reakcijama primarnih baterijama.

Prema [25] sekundarne baterije sadrže elektrokemijske članke koji mogu raditi kao galvanski ili voltni članci i kao elektrolitička ćelija. Galvanski članak proizvodi električnu energiju iz kemijskih reakcija. U elektrolitičkoj ćeliji potreban je vanjski izvor električne energije da se inducira kemijska reakcija redoksa u kojoj se kroz proces elektrolize koristi struja da se napravi kemijska promjena koja inače ne bih. Redoks reakcija karakterizirana je prijenosom elektrona između kemijskih spojeva u kojima jedan spoj gubi elektrone a drugi dobiva, dakle proces redukcije-oksidacije od kojih je nastala riječ redoks kombinacijom prvih slova obje riječi.

Pošto sekundarne baterije imaju povratne kemijske reakcije, potreban je punjač koji gura istosmjernu struju kroz bateriju. Pokraj toga se preko punjača mogu kontrolirati napon ili struju prema baterijama i da ne dopusti prekomjerno punjenje. Punjač je eksterni uređaj i neophodan dio sekundarnih baterija, međutim sekundarne baterije se u principu sastoje od istih dijelova kao i primarne: anode, katode, elektrolita i separatora.



Slika 4.1: Načelo rada sekundarne baterije [22]

Na slici 4.1 je pokazan pojednostavljen princip rada sekundarnih baterija. Anoda i katoda su uronjene u elektrolit koji čini bateriju provodljivijom pružanjem ionima bolje kretanje od katode do anode pri punjenju, a pri pražnjenju bolje kretanje od anode do katode. Punjenje kreće od katode zato jer se u njoj događa kemijska reakcija redukcije, dok se oksidacija događa u anodi i zbog toga pražnjenje dolazi od anode.

Baterija mora sadržavati elektrolit i separator koji služi kao porozna membrana. U bateriji funkcija elektrolita je da dozvoli električki nabijenim ionima da prenose električni naboj između katode i anode čime se omogućava prolaz istosmjerne struje kroz bateriju, zatvarajući strujni krug. Elektrolit također služi i kao katalizator, što znači da povećava stopu kemijskih reakcija bez da



sam prođe trajnu kemijsku promjenu. U modernim baterijama elektrolit može biti tekućina kao kiselina ili lužina, gel, rastopljena sol, pasta i kruta tvar.

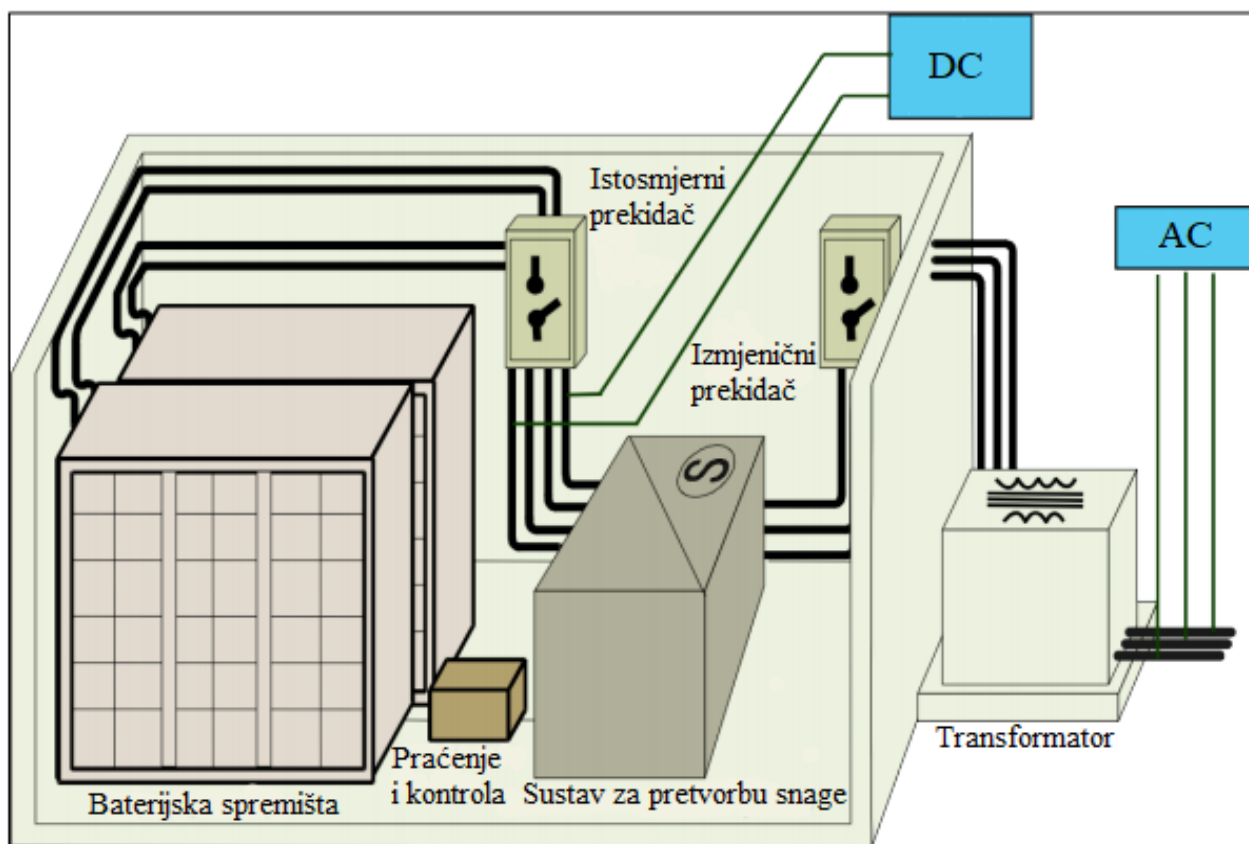
Zadnji dio baterije je separator, čiji značaj u bateriji ovisi o elektrolitu. Separator odvaja anodu od katode sprječavajući kratki spoj dok dopušta kretanje iona kroz ćelije. Iako nisu električno provodljivi, male količine istosmjernje struje mogu proći kroz separator i zbog toga dolazi do samopražnjenja u baterijama, samo u različitim stopama ovisno o tehnologiji baterije. Separatori imaju izniman značaj u baterijama i općenito njihova svojstva i struktura imaju utjecaj na performansu baterije.

Tablica 4.1: Razlika primarnih i sekundarnih baterija

	Primarne baterije	Sekundarne baterije
1.	Ne mogu se puniti kada se isprazne	Mogu se puniti periodično ako nisu već napunjene
2.	Nepovratne kemijske reakcije	Povratne kemijske reakcije
3.	Mogu se koristiti samo jednom	Mogu se koristiti više puta
4.	Kraći vijek trajanja	Duži vijek trajanja
5.	Niža stopa samopražnjenja	Veća stopa samopražnjenja kod starijih tehnologija
6.	Velik unutarnji otpor	Niži unutarnji otpor
7.	Jeftine	Inicijalno skuplje, ali isplativije
8.	Koriste se kod jeftinijih uređaja koji zahtjevaju manje el. energije (daljinski uređaji, svjetiljke, satovi, itd...)	Koriste se kod skupljih uređaja kod kojih nije isplativo često mjenjat baterije (baterijska spremišta energije, el. auti, smartphoni, akumulatori, itd...)
9.	Ograničeni na specifične primjene	Sveukupno ima svestranije primjene
10.	Ne zahtjevaju održavanje	Zahtjevaju redovito održavanje
11.	Spreme za korištenje	Potrebno napuniti prije korištenja
12.	Mogu jedino dati slabiju struju	Mogu pružiti slabu i jaku struju
13.	Nisu prikladne za velike terete i veće brzine pražnjenja	Velike brzine pražnjenja pri velikim opterećenjima

## 4.2 Sustavi baterijskih spremišta energije

Sustav za baterijsko spremište energije (engl. *battery energy storage system*) ili ukratko BESS spada pod elektrokemijske sustave za pohranu električne energije jer su glavni dio baterije koje se spajaju u nizove serija i paralela da se dobije veće baterijsko spremište energije sa željenom izlaznom strujom i naponom koje omogućuje skladištenje energije na duže vrijeme, od 10 minuta do nekoliko mjeseci.



Slika 4.2: Shema sustava za baterijsko spremište energije

Baterijska spremišta prikazana na slici 4.2, povezana su sa sustavom za pretvorbu snage i sustavom za praćenje i kontrolu. Sustav za praćenje i kontrolu općenito služi da se postignu što bolji uvjeti za baterijska spremišta i time osiguraju duži životni, što veći kapacitet, itd. Mogu se pratiti i regulirati stvari kao: količina elektrolita u baterijama s tekućim elektrolitom, ispušteni plinovi, temperatura baterija, energetska kapacitet, unutarnji otpor ali i parametri kao efikasnost baterija, izlazna snaga, vrijeme odziva i ostale vrijednosti da se ispune ugovorno važne obveze.

Istosmjerni i izmjenični prekidači služe za zaštitu dijelova sustava. Slika ne uključuje ventilacijske sustave, opremu za održavanje baterija i elektrolitskih materijala.

Sustav za pretvorbu snage (engl. *power conditioning system*) prema [11] obrađuje električnu energiju prema i iz baterija. Sadrži u sebi energetske pretvarače kao ispravljачe i izmjenjivače tako da može istosmjernu struju iz baterija promjeniti u izmjeničnu i obratno. Obrada električne energije nije samo za promjenu istosmjernu i izmjenične struje, nego uključuje podešavanje struje i napona za maksimalnu izlaznu snagu, zaustavljanje protoka struje u slučaju kvara i prilagođavanje pretvorene izmjenične struje kriterijima izmjenične električne mreže. Za razdoblja velikih opterećenja, sustav za pretvorbu snage treba svoj rashladni sustav.

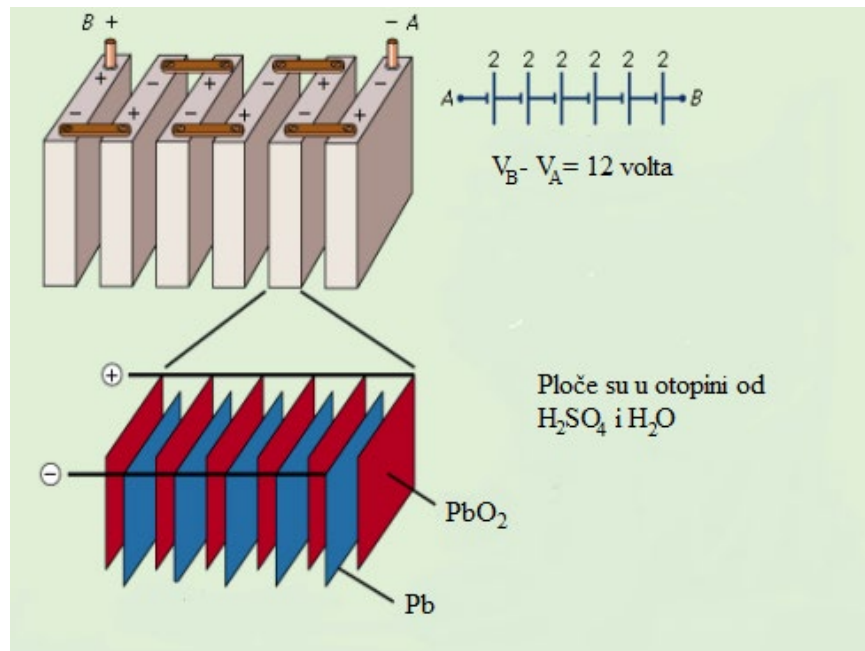
Kasnije tu se može napisati gdje se koriste BESS-ovi, iako je očito. Možda koje tehnologije su češće i gdje. Možda koja se za sta koristi.

Van troškova, bitne karakteristike BESS-ova su:

- Specifična energija/masena energija [Wh/kg], [J/kg]
- Gustoća pohranjene energije [Wh/L], [J/m<sup>3</sup>], [kWh/m<sup>3</sup>]
- Efikasnost punjenja i pražnjenja [%]
- Prosječan životni vijek ili broj ciklusa [npr. 10 godina pri predviđenom korištenju ili 200-300 ciklusa]
- Očekivan broj ciklusa pri određenoj dubini pražnjenja [npr. 1000 ciklusa pri 70 % dubine pražnjenja]
- Stopa samopražnjenja [%/mjesec]
- Radna temperatura – temperatura tokom punjenja i pražnjenja

### 4.2.1 Olovno-kiselinska baterija

Olovno-kiselinske baterije su izumljene sredinom 19. stoljeća i zbog su poznate kao najstarija vrsta punjivih baterija. Iako je tehnologija preko 150 godina stara, razvijene su sofisticiranije verzije koje su proširile primjenu. U tipičnoj olovnoj bateriji elektrolit je vodena otopina s oko 35 % sumporne kiseline kada je baterija potpuno napunjena. Negativna elektroda je plosnata ploča napravljena od legure olova s ili antimonom ili kalcijem s mogućim dodatkom selena, kositra, kadmija ili arsena da se poboljšaju električna svojstva i zato jer je olovo premekano. Pozitivna elektroda je također ploča od olovnog dioksida  $PbO_2$  i kao i negativna elektroda je vrlo porozna da se poveća površina [31].



Slika 4.3: Unutrašnjost olovno-kiselinske baterije [26]

Olovno-kiselinske baterije mogu biti prilagođene radu u elektroenergetskom sustavu podebljavanjem aktivnih materijala, da pružaju nižu struju ali kontinuiranu stabilnu snagu. Takva verzija baterije se naziva baterija dubokog ciklusa, premda uz dubinu pražnjenja od 80 % ima kraći životni vijek u rasponu od 200-300 ciklusa prema [49], što je znatno manje od drugih modernih baterija. Sa specifičnom gustoćom energije od 30-50 Wh/kg i najsporijom brzinom punjenja u trajanju do 16 sati, olovno-kiselinske baterije imaju slabija svojstva u usporedbi s modernim tehnologijama.

Olovno-kiselinske baterije trenutno su najzrelija tehnologija sekundarnih baterija i potrebni materijali za proizvodnju su veoma dostupni. Visoka stopa zrelosti odražava se i u visokoj stopi recikliranja i već postojećoj industriji zbog kojih je cijena niža u usporedbi s novijim i boljim tehnologijama sekundarnih baterija. Bitan razlog zašto se koriste, pokraj niže cijene, je i niska stopa samopražnjenja između 3-5 % pohranjene energije mjesečno.

Mogu naći primjenu kod krajnjih potrošača za akumuliranje energije iz fotonaponskog sustava i kao neprekidni izvor napajanja u bolnicama i telekomunikacijskim centrima. U mreži se koriste kao pripravan sustav ako nema čestog punjenja i pražnjenja.

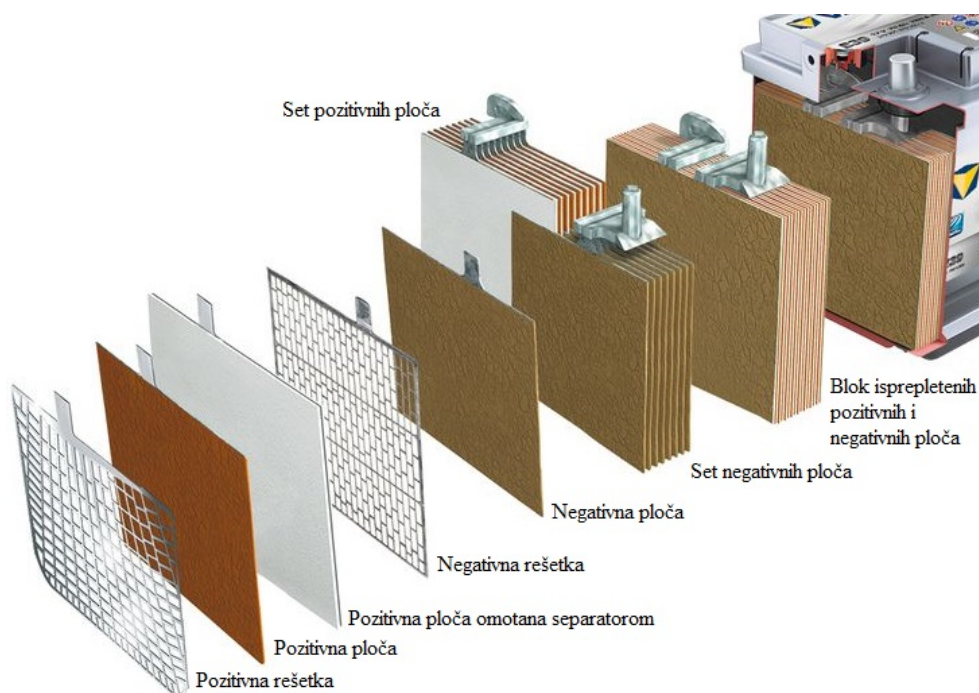
Jednostavnije konvencionalne poplavljene olovno-kiselinske baterije moraju uvijek biti stacionarne zato jer nisu zapečaćene. Zapečaćene ili ventilom regulirane olovno-kiselinske baterije (engl. *VRLA ili SLA*) imaju jednosmjerne ventile pomoću kojih se ispušta vodik i zadržava voda. Vodik sam po sebi nije toksičan, ali u višim koncentracijama postaje veoma eksplozivan.

Tehnologije olovno-kiselinskih baterija su slijedeće:

- Konvencionalne poplavljene olovno-kiselinske baterije
- Zapečaćene ili ventilom regulirane olovno-kiselinske baterije (engl. *VRLA ili SLA*)
  - AGM akumulatori
  - Gelirani akumulatori
- Olovno-kiselinske baterije s ugljikom

### 4.2.1.1 VRLA baterije

VRLA baterije okarakterizirane su elektrolitom u drugačijem obliku i jednosmjernim ventilima. Dije se na AGM (engl. *absorbent glass mat*) i gelne olovno-kiselinske baterije. AGM baterije imaju na pozitivnoj ploči namotan upijajući stakleni „tepih“ koji se sastoji od mikrostaklenih vlakana, sposobnih da „upiju“ sumpornu kiselinu s kojom čine elektrolit, ali po prirodi su vlakna separatori. Kiselina ne utječe na vlakna i vlakna zapravo ne upijaju kiselinu, nego ju drže u porama što dozvoljava AGM materijalu da služi kao elektrolit i separator. AGM materijal dopušta bateriji da radi u bilo kojem položaju i u dinamičnim uvjetima kao kod motornih vozila.



Slika 4.4: Presjek AGM akumulatora [33]

Što ih čini poželjnima za pokretanje motornih vozila je njihov nizak unutarnji otpor koji dozvoljava visoku izlaznu struju i pri temperaturi od  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Uz to im se mogu stisnuti ploče zajedno zato jer je elektrolit ujedno i separator koji je mehanički jak. Takvom konstrukcijom se povećava energetska gustoća baterije i može se još povećati ako se ploče zamotaju u cjevasti oblik. Cjevasti dizajn ploča može biti primjenjen kod svih tehnologija olovnih baterija.

Druga tehnologija VRLA baterija su gel olovno-kiselinske baterije, kojima je dodana prašina silicijevog dioksida u elektrolit da postane gel. Zbog elektrolita u obliku gela bolje odvede toplinu

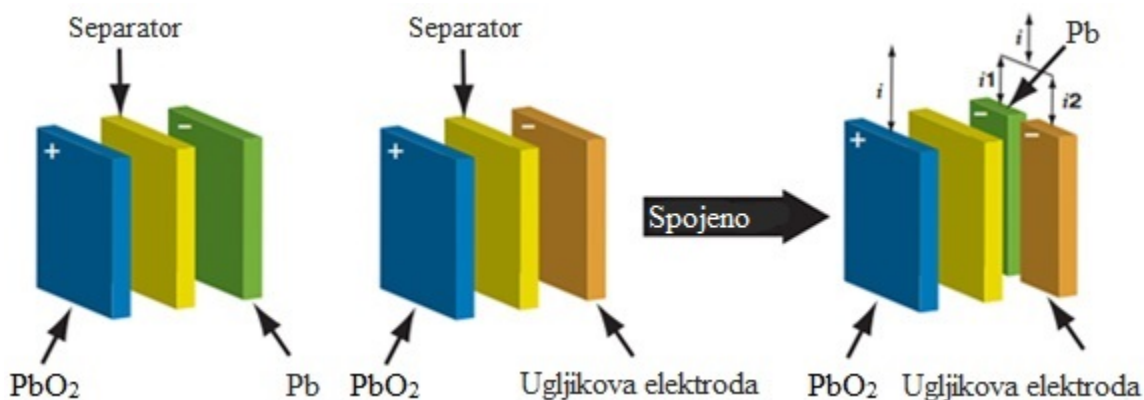
i najbolje podnose rad pri višim temperaturama. Dodatna prednost geliranog elektrolita je što baterija može sadržavati više elektrolita od AGM baterija i time povećati broj ciklusa sa zamjetnom dubinom pražnjenja od oko 70 %, ovisno o verziji gelirane baterije. Bolje podnose zloupotrebu od AGM baterija i slabije se suše, održavajući duži životni vijek.

Obje VRLA tehnologije imaju prednost jer zahtjevaju manje održavanja od poplavljenih olovnih baterija. Razlog za to su jednosmjerni ventili i manji gubici vode tijekom elektrolize zbog elektrolita.

Općenito je velik nedostatak olovno-kiselinskih baterija njihovo veoma sporo punjenje, koje traje između 12-16 sati za praznu bateriju. Poplavljena verzija baterija zahtijeva održavanje u obliku dolijevanja i ventilacije, ali imaju prednost što s hidrometrom mogu mjeriti količinu vode i odrediti jesu li se pravilno punile zbog povećanog gubitka vode tijekom prečestog punjenja.

#### 4.2.1.2 Olovno-kiseli ugljici

Slijedeći velik korak u dizajnu olovno-kiselinskih baterija je dodatak ugljika. Slika 4.5 pokazuje da se ugljik spaja s negativnom elektrodom od olova u kompozit. Ugljik se može spojiti s obje elektrode, ali su koristi na pozitivnoj elektrodi minimalne. Što čini olovno-kiselinske baterije posebnima je što se mogu veoma brzo prazniti, ali moraju biti posebno dizajnirane za brže punjenje koje i dalje nije kompetitivno s brzinom punjenja nekih tehnologija.



Slika 4.5: Dodatak ugljika u olovno-kiselinsku bateriju[34]

Spajanjem olova i ugljika u kompozit smanjuje se sulfacija kada je baterija ostavljena djelomično puna i smanjuje koroziju na pozitivnoj elektrodi, što poboljšava životni ciklus. Dodatna prednost

je što ugljik poboljšava prihvaćanje naboja negativne elektrode čime se poboljšava i brzina punjenja. Slabo prihvaćanje naboja na negativnoj elektrodi za vrijeme punjenja povezano je s lošom provodnosti olovnog sulfata. Prema [27] proces punjenja i pražnjenja nije potpuno reverzibilan na negativnoj elektrodi i zato se olovni sulfat se počinje nakupljati do razine na utječe na rad baterije. Ako se pokuša ubrzati punjenje višak elektrona nema gdje ići i stvara se više vodika dok se gubi voda.

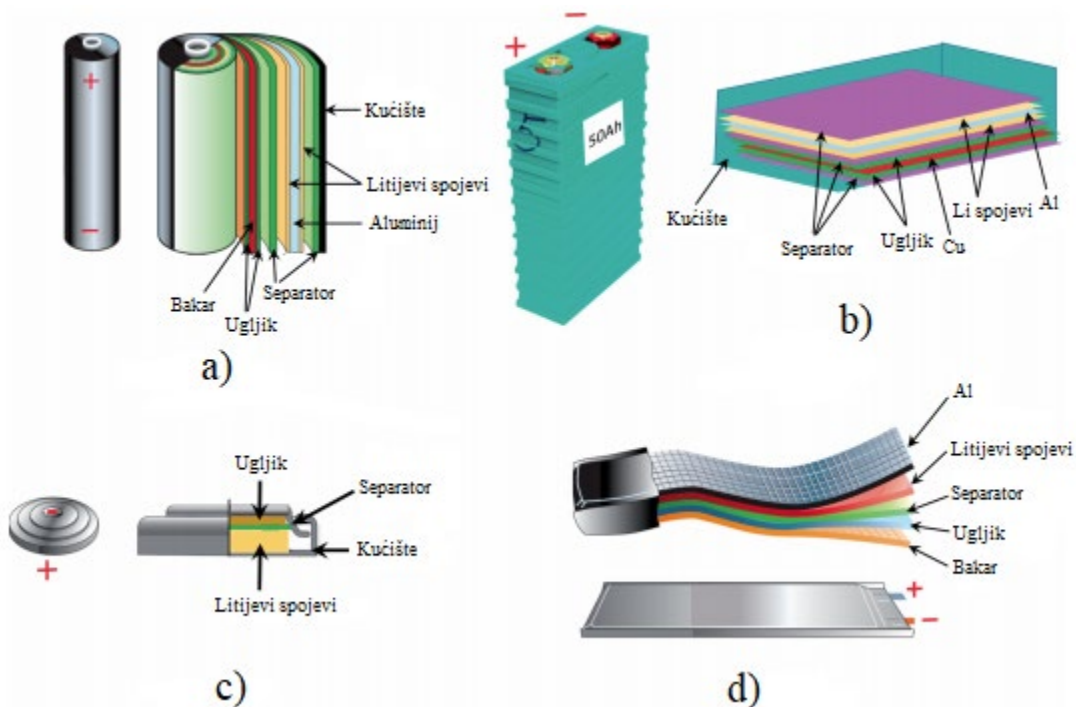
Izvedbe olovno-kiselinskih baterija s ugljikom mogu postati hibrid između baterija i superkondenzatora, postižući što prijašnje tehnologije tih baterija nisu mogle, više plićih punjenja i pražnjenja bez rizika da utječe na performansu baterije.

Dodavanje ugljika čini bateriju skupljom ali prema [33] ugljik čini samo 1-2 % težine i manje od 1 % cijene cijele baterije. Krhka priroda ugljika je učinila proizvodnju baterije s materijalima od ugljika većim problemom trenutno.



## 4.2.2 Litij-ionske baterije

Tehnologija litij-ionskih (*ukratko* Li-ion) baterija u usporedbi s olovno-kiselinskom je relativno nova i tijekom skoro 30 godina korištenja u prenosivim elektroničkim uređajima i električnim autima postala je jednom od bitnijih i brzorastućih tehnologija skladištenja energije. Premda ih se zove litij-ionskim baterijama, postoji više tehnologija u kojoj svaka vrsta baterija ima malo drugačiji kemijski sastav, a time i primjenu. Svaka vrsta Li-ion tehnologije sadrži litij, najlakši metal od svih metala, koji pripada grupi veoma reaktivnih metala koji se nazivaju alkalijskim metalima. Zbog tih svojstava ima veliki elektrokemijski potencijal i daje najveću specifičnu energiju po težini. Katode u Li-ion baterijama su od litijevih-metalnih oksida, dok su anode od grafitnog ugljika. Aluminij i bakar služe za skupljanje struje na katodi i anodi. U usporedbi s drugim baterijama imaju visoku gustoću energije (150- 260 Wh/kg) i visoku učinkovitost (95-98 %). Ovisno o kemijskom sastavu mogu imati i visok broj ciklusa, naime to ovisi o dubini pražnjenja, opterećenju i temperaturi. Uz navedene prednosti imaju i niži unutarnji otpor, nisko samopražnjenje i brzo punjenje.



Slika 4.6: Oblici Li-ion baterija [35]

Kao što je prikazano na slici 4.6, Li-ion baterije po obliku mogu biti:

- a) cilindrične ili valjkaste
- b) prizmatične
- c) gumbaste
- d) vrećasta

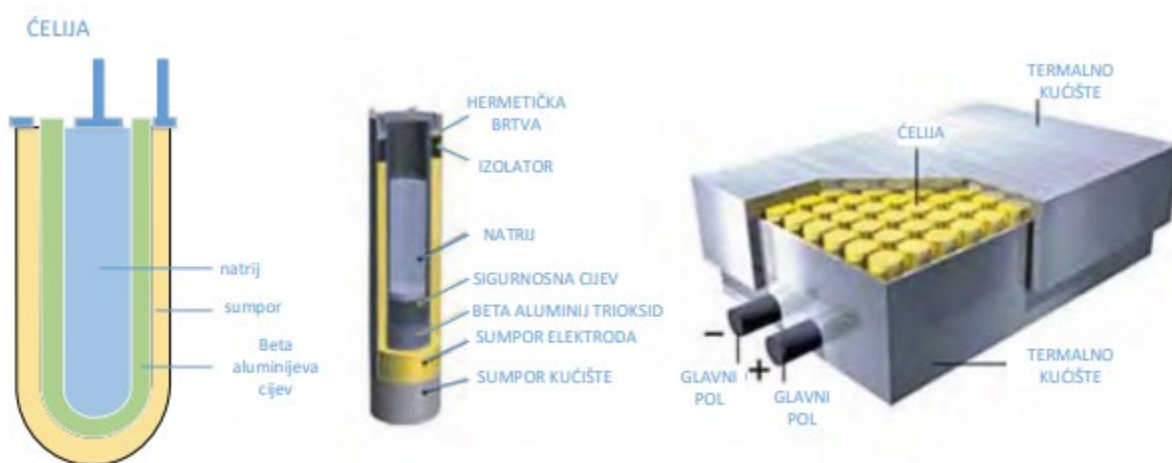
Tablica 4.2: Sažetak najkorištenijih litij-ionskih baterija [47]

Kemijski sastav	Litij-kobalt-oksidi	Litij-mangan-oksidi	Litij-nikal-mangan-oksidi	Litij-željezo-fosfat	Litij-nikal-kobalt-aluminij-oksidi	Litij-titan-oksidi
Skraćenica	LiCoO <sub>2</sub>	LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	LiNiMnCoO <sub>2</sub>	LiFePO <sub>4</sub>	LiNiCoAlO <sub>2</sub>	Li <sub>2</sub> TiO <sub>3</sub>
Nazivni napon	3,6 V	3,7 – 3,8 V	3,6 – 3,7 V	3,2 – 3,3 V	3,6 V	2,4 V
Specifična energija	150-200 Wh/kg	100-150 Wh/kg	150-220 Wh/kg	90-120 Wh/kg	200-260 Wh/kg	70-80 Wh/kg
Životni vijek u ciklusima	500-1000	300-700	1000-2000	1000-2000	500	3000-7000
Tipično pakiranje	18650, prizmatično i vrećasto	prizmatično	18650, prizmatično i vrećasto	26650 i prizmatično	18650	prizmatično
Primjena	Mobilni telefoni, tableti, laptopi, kamere	Električni alat, medicinski uređaji, pogonski sklopovi	Električna vozila električni bicikli, medicinski i industrijski uređaji	U stacionarnim sistemima gdje su potrebne visoke struje	U medicini, industriji i električnim vozilima	Neprekidni izvor napajanja, električna vozila, ulična rasvjeta

Nedostaci Li-ion baterija povezani su sa sigurnosti baterije i temperaturom. Brže se razgrađuju pri višim temperaturama i ako se čuvaju pod visokim naponom. Pri višim temperaturama povećava se mogućnost termalnog odbjega i zbog toga zahtijevaju zaštitu i jedinicu za praćenje. Posebno pakiranje i zaštite podižu cijenu baterije, što je trenutno glavna prepreka. Reaktivni i toksični materijali čine Li-ion baterije veoma zapaljivim u svim veličinama i oblicima, tako da se zaštita stavlja na prvo mjesto. Zbog visokog potencijala se Li-ion tehnologije i dalje razvijaju, radi boljih svojstava i nižih cijena.

### 4.2.3 Natrij-sumporne baterije

Natrij-sumporne baterije (*ukratko* NaS) su okarakterizirane krutim elektrolitom i tekućim elektrodama. Kao pozitivna elektroda služi tekući odnosno otopljeni sumpor, dok je negativna elektroda rastopljeni tekući natrij. Elektrode su odvojene krutim elektrolitom od beta-aluminijeve keramike. Na sobnoj temperaturi su obje elektrode krutine, što znači da se baterija u tom stanju može čuvati preko 50 godina. Baterija je aktivirana toplinskim izvorom da bi se elektrode otopile i pretvorile u tekućine. Potrebno je održavati temperaturu između 300 – 350 °C da elektrode ostanu tekuće i da baterija može ostati u pogonu. Jedna baterija se sastoji od barem 20 modula koji sami od sebe nisu praktični i ne mogu se koristiti.



Slika 4.7: Presjek NaS baterije i modula [9]

NaS baterije imaju životni vijek od 4500 ciklusa pri nazivnom kapacitetu što predviđa životni vijek od 15 godina uz održavanje. Imaju gustoću pohranjene energije oko  $170 \text{ kWh/m}^3$ , uz efikasnost od 75 % u izmjeničnim sustavima [31]. Što ih čini zanimljivom tehnologijom u elektroenergetskom sustavu je niska potreba za održavanjem, vrijeme odziva od nekoliko milisekundi i dugo pražnjenje koje može trajati 6-7 sati. Zbog takvih svojstava se mogu ekonomično koristiti za kvalitetu snage i smanjenje vršnih opterećenja [10].

NaS baterije predstavljaju opasnost jer sadrže čisti natrij, koji u kontaktu sa zrakom i vlagom počne naglo goriti, stoga se moraju zaštititi od takvih uvjeta pomoću kućišta i slojem pijeska. Drugi nedostatak je visoka radna temperatura i održavanje te temperature, ali se ne koristi vanjski izvor topline nego baterija koristi vlastitu pohranjenu energiju za održavanje temperature i time se smanjuje njena učinkovitost.

#### **4.2.4 Nikal-kadmij i nikal-metal-hidrid baterije**

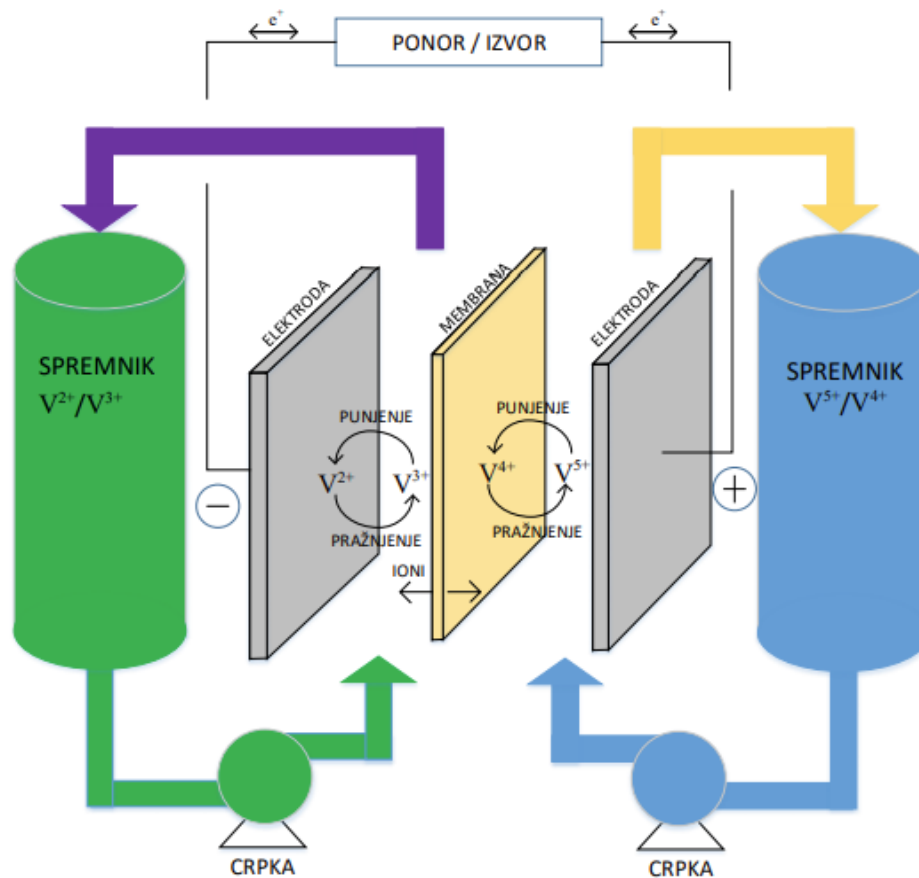
Nikal-kadmij (*ukratko* NiCd) baterije nastale su početkom 20. stoljeća, kada im je jedina konkurencija od sekundarnih baterija bila olovno-kiselinska baterija. Sredinom prošlog stoljeća, kada je nađen način da se upiju plinovi stvoreni punjenjem, postale su odabir za prijenosne uređaje kao električni alat, profesionalne kamere, svjetiljke, itd. Korištene su zbog mogućnosti rada pri veoma niskim temperaturama i sposobnosti za potpuno pražnjenje u periodu od sat vremena i manje. Međutim materijali su skuplji od onih u olovno-kiselinskoj bateriji i stopa samopražnjenja je 10 % u mjesec dana. Razvitkom novih baterijskih tehnologija NiCd baterije se pokazalo da imaju nisku specifičnu energiju, niski napon ćelije od 1,2 V i da trebaju više održavanja od drugih baterija, jer ih treba prazniti s vremenom da ne izgube kapacitet. Glavni razlog za smanjenje u korištenju je toksičan metal kadmij, čiji utjecaj na okoliš je toliko štetan da je komercijalno zabranjen za prodaju. Iako je zabranjen smije se isporučiti samo za neke medicinske uređaje i kao zamjena za postojeće sustave.

Nikal-metal-hidrid (*ukratko* NiMH) baterije su u početku razvijene kao zamjena za NiCd baterije. Prema [10] NiMH baterije imaju sva pozitivna svojstva NiCd baterija sa izuzetkom maksimalnog nazivnog kapaciteta koji je i dalje deset puta manji od kapaciteta NiCd baterije, ali po težini imaju mnogo veću gustoću energije. Kao negativnu elektrodu koriste hidridnu slitinu koja nije toksična s vodikom i može ga apsorbirati. Pozitivna elektroda je kao i kod NiCd baterija, nikal.

Velika mana NiMH baterija se ističe pri njihovom punjenju. Nakon punjenja je samopražnjenje u prva 24 sata oko 20 % s 10 % po svakom mjesecu nakon. Zbog stopa punjenja i pražnjenja teško je odrediti učinkovitost baterija, koja prema [48] iznosi između 66 i 92 %. Broj ciklusa ovisi o materijalima u slitini koji mogu smanjiti stopu samopražnjenja i koroziju, ali smanjuju specifičnu energiju, pa je maksimalan broj ciklusa oko 2000. Gustoća energije u rasponu od 140-300 kWh/m<sup>3</sup> je relativno visoka i parira s nekim tehnologijama Li-ion baterija. Zbog niskog unutarnjeg otpora mogu pružati visoku struju bez gubitaka u kapacitetu. Ako se uzme u obzir njihova robustnost i sigurnost, mogu zamjeniti Li-ion baterije u uređajima prijenosni električni uređaji i hibridni auti.

#### 4.2.5 Redoks protočne baterije

Redoks protočne baterije se razlikuju od navedenih baterija po tome što sadrže pumpe čija je uloga pumpati tekuće elektrolite, koji sadrže ione otopljenih metala, kroz porozne elektrode u spremnike kako je prikazano na slici 4.8.



Slika 4.8: Tipična redoks protočna baterija [9]

Najrazvijenija protočna baterija je vanadij protočna baterija koja koristi metal vanadij kao elektrolit koji prolazi kroz pozitivnu i negativnu elektrodu. Vanadij ima sposobnost da može postojati u otopini u četiri različita stanja oksidacije, što znači da baterija ima samo jedan elektroaktivan element, umjesto dva.

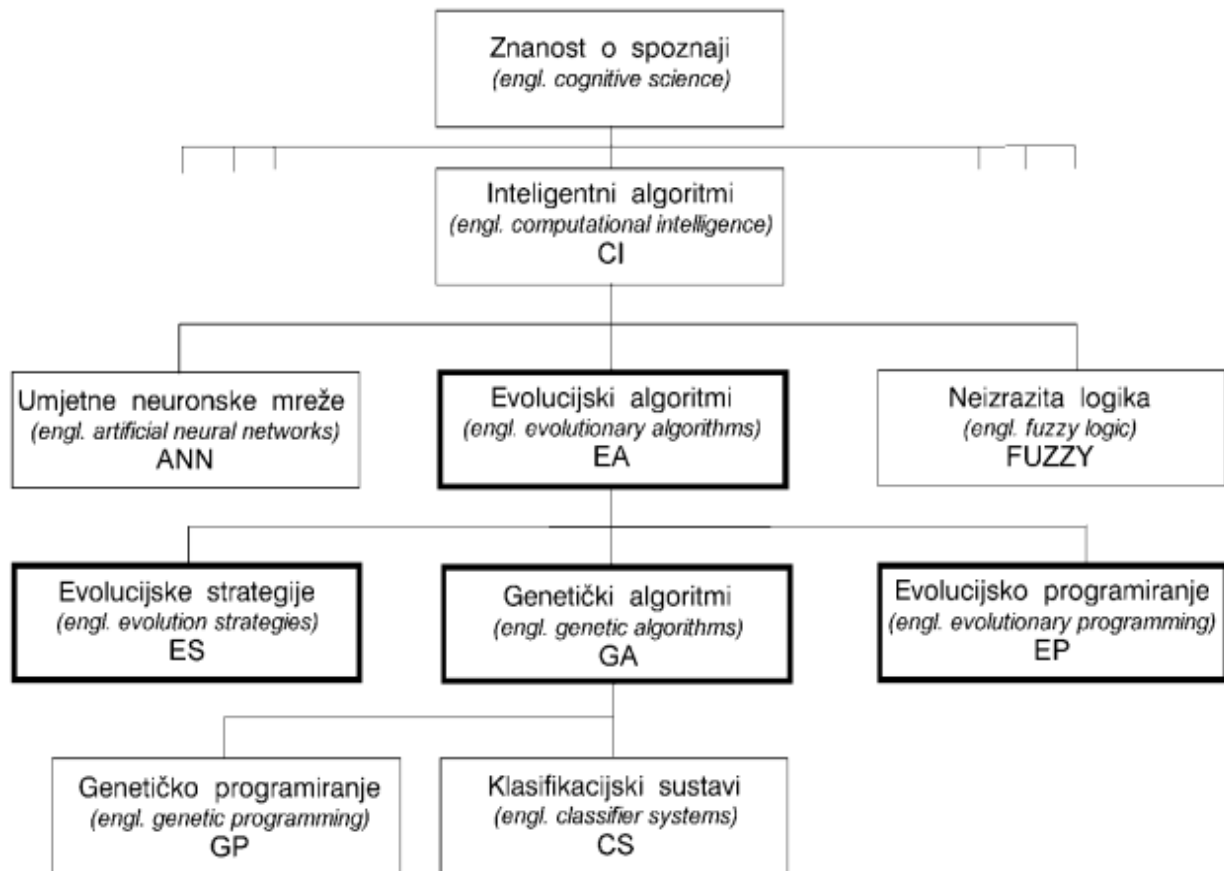
Zato jer protočne baterije koriste spremnike, mogu imati energetski kapacitet s kojim nijedna tehnologija ne može parirati. Zbog spremnika baterija se može ostaviti prazna na duže vrijeme bez ikakvih posljedica. Snaga baterije je direktno povezana s površinom poroznih elektroda. Dodatne prednosti su što imaju dubinu pražnjenja preko 90 %, više od Li-ion i NaS baterija, i što imaju životni vijek duži od bilo koje suhe, krute baterije u rasponu od 15000 do 2000 ciklusa.

Zbog iznimno niske gustoće energije od oko 20 kWh/m<sup>3</sup> su potrebni veliki spremnici i količine elektrolita da budu korisne. Jedino se mogu koristiti ako su stacionarne jer ih tekući elektrolit u tolikoj količini čini veoma teškima. Niska gustoća energija ih čini nepraktičnima za npr. električna vozila, ali pokraj ranije navedenih prednosti su dobro prilagođene za pohranjivanje velikih količina energije koja se može koristiti kod vršna opterećenja i ravnoteže opskrbe i potražnje.

## 5. Evolucijski algoritam

Evolucijski algoritmi su metaheuristički optimizacijski algoritmi bazirani na populaciji koji koriste mehanizme inspirirane biologijom kao: mutacija, križanje, prirodni odabir i opstanak najjačih da bi iterativno poboljšali skup kandidata za rješenje [4].

Prema [5] se može reći da je to skup stohastičkih metoda pretraživanja koji oponašaju prirodni tijek biološke evolucije. Kao što je u prirodi prilagođavanje okolini i uvjetima ključ za preživljavanje neke vrste, tako je svrha evolucijskih algoritama da pokušaju imitirati mehanizam pomoću kojeg se obavlja selekcija.



Slika 5.1: Podjela inteligentnih algoritama [15]

Iz slike 5.1 se može vidjeti da evolucijski algoritmi dolaze iz inteligentnih algoritama i općenito se dijele na četiri područja [5] :

- Genetičke algoritme
- Genetičko programiranje
- Evolucijske strategije
- Evolucijsko programiranje

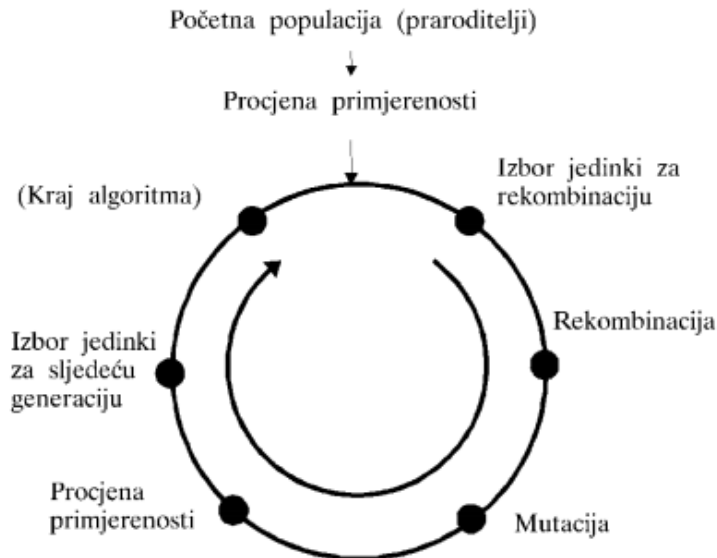
Pošto su evolucijski algoritmi podjeljeni u skupine, prema [5] je često teško odrediti granice i znati gdje jedan algoritam počinje a drugi završava. Pošto granice nisu strogo određene dozvoljeno je raditi promjene s ciljem dobivanja boljeg i bržeg rješenja.

Premda se evolucijski algoritmi temelje na teoriji biološke evolucije i dalje vrijede opće prihvaćene pretpostavke [15]:

1. Započinje se sa naraštajem ili populacijom (*eng.* population) koja može stvarati potomke. U jednom naraštaju je potrebno više jedinki za razmnožavanje da osnovni mehanizam evolucije može funkcionirati. Nije samo bitno da postoji više jedinki, nego da te jedinke imaju različite značajke.
2. Populacija stvara potomke razmnožavanjem ili rekombinacijom (*eng.* recombine). Novi naraštaj jedinki nastaje razmnožavanjem već postojeće populacije i pri tome novi naraštaj nasljeđuje značajke prethodnog naraštaja.
3. Značajke od prethodnog naraštaja se jedino mogu mijenjati mutacijom, slučajnom promjenom značajki kod jedinke koja nastaje pri nasljeđivanju značajki. Zbog mutacije potomci mogu imati značajke koje nisu imali njihovi predci.
4. Mogu se razmnožavati samo neke, nikako sve jedinke. U biologiji se pretpostavlja da će preživjeti one jedinke koje su najbolje prilagođene okolišu i to se naziva prirodni izbor (*eng.* natural selection) ili opstanak najsposobnijih (*eng.* survival of the fittest). Pod preživljavanjem se podrazumijeva prosljeđivanje nasljednih značajki u sljedeći naraštaj. Kod evolucijskih algoritama, okoliš je zadaća koja se rješava.
5. Postupak nastanka novog naraštaja se ponavlja i cijeli postupak je iterativan. Kao i u biologiji, stvaranje novih vrsta i promjene značajki cijele populacije nastaje tijekom mnogo



generacija. Kod evolucijskih algoritama postupak razmnožavanja, mutacija i prirodni izbor se ponavlja sve dok se ne postigne rješenje za postavljeni zadatak ili ne zadovolji neki kriterij za završetak algoritma.



Slika 5.2: Iteracijska petlja evolucijskog algoritma [15]

Na slici 5.2 se mogu vidjeti koraci koje svaki naraštaj jedinki prođe, uključujući procjenu primjerenosti. Primjerenost je značajka jedinke koja opisuje njezinu prilagođenost okolišu i kod evolucijskih algoritama opisuje kvalitetu rješenja zadaće uporabom te jedinke. Na engleskom se koriste izrazi performance index i fitness [15].

Iako postoji više verzija evolucijskih algoritama svi se mogu predstaviti pseudokodom [15]:

$t = 0;$

initialize  $P(t);$

evaluate  $P(t);$

while not terminate do

$P'(t) = \text{variation } [P(t)];$

evaluate  $[P'(t)];$

$P(t+1) = \text{select } [P'(t) \cup Q(t)];$

$t = t+1;$

gdje je:

$t$	$t \in \mathbb{N}$ , oznaka generacije (iteracije);
$P(t)$	populacija generacije $t$ ; skup koji ima $\mu$ jedinki u iteraciji $t$ (skup roditelja);
$P'(t)$	populacija potomaka generacije $t$ potekla iz populacije $P(t)$ , skup koji ima $\lambda$ jedinki u iteraciji $t$ (skup potomaka);
$Q(t)$	$Q(t) \subseteq P(t)$ , skup jedinki roditelja koje mogu biti birane za sljedeću generaciju (samo neke jedinke populacije $P(t)$ mogu biti birane kao roditelji sljedeće populacije $P(t+1)$ );
Initialize	operator stvaranja početne populacije;
Evaluate	operator procjene primjerenosti jedinki populacije;
Terminate	uvjet završetka algoritma;
Variation	operator promjene genotipa jedinki (genotip je informacija na temelju koje se može zaključiti o značajkama jedinki)
Select	operator izbora jedinki za sljedeću generaciju.

Pojedine vrste evolucijskih algoritama razlikuju se uglavnom u [15]:

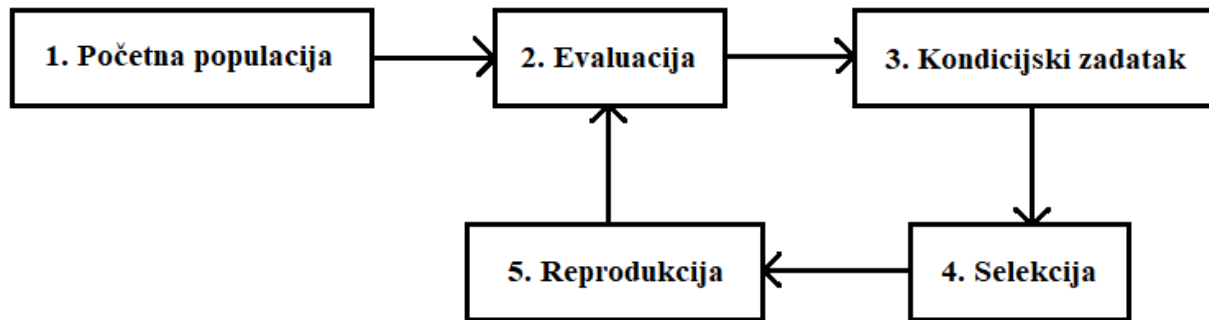
- Predodžbi jedinki
- Operatorima initialize, variation i select

Kod evolucijskih algoritama, prema [15], jedinka populacije predočena je neovisnim matematičkim objektom, primjerice: realnim brojem, višedimenzijskim vektorom ili uređenim nizom znakova. Izbor predodžbe jedinke bitno utječe na djelotvornost algoritma ili čak na mogućnost pronalaženja zadovoljavajućeg rješenja. Četiri su glavne skupine predodžbi jedinke:

1. Predodžba jedinke prilagođena zadatku. Polazi se od pretpostavke da predodžba jedinke terba biti što primjerenija za zadatak koji se rješava
2. Predodžba jedinke prilagođena evolucijskom algoritmu. Algoritam je neovisan o zadatku.
3. Posebna predodžba kod koje rješenje zadatke nije moguće prikazati brojčanom vrijednosti. Takva zadaća ima za rješenje određeni raspored znakova ili određenu kombinaciju stanja.

4. Prilagodljiva predodžba jedinke. Predodžba koja se mijenja tijekom algoritma.

U petlji na slici 5.2 operator variation je raščlanjen na više operadora i svaki od njih donosi element moguće promjene značajki budućeg naraštaja. Ti operatori su: operator izbora jedinke za rekombinaciju, operator rekombinacije i operator mutacije.



Slika 5.3: Pojednostavljen ciklus evolucijskog algoritma [4]

Iteracijska petlja na slici 5.2 se može jednostavnije pokazati kao na slici 5.3 i ukratko, koraci u evolucijskim algoritmima se mogu na sljedeći način objasniti:

1. Početna populacija – stvaranje početne populacije koja sadrži nasumične individue
2. Evaluacija – izračunati objektivne vrijednosti kandidata za rješenje
3. Kondicijski zadatak – koristiti objektivne vrijednosti koje predstavljaju tražene karakteristike da se odredi sposobnost svih individua i stvori red od najtraženijih do manje traženih individua
4. Selekcija – izbor najsposobnijih kandidata za reprodukciju
5. Reprodukcija – izabrani kandidati stvaraju potomke koji sadrže tražene karakteristike dobivene varijacijom ili kombinacijom karakteristika od „roditelja“

Stvoreni potomci se kao i njihovi predaci izdižu iz populacije da ih integriramo i prenesemo u sljedeću populaciju. Proces se ponavlja i konstantno se stvaraju nove populacije od odabranih individua sve dok nije zadovoljen uvjet da se zaustavi evolucijski proces.

## 5.1 Diferencijalna evolucija

Diferencijalna evolucija, ili ukratko DE, je jednostavna metoda globalne optimizacije, izumljena 1997. godine od R. Storn-a i K. Price-a. Prema [16] Diferencijalna evolucija je zasnovna na populaciji mogućih rješenja nad čijim se članovima primjenjuju varijacijski operatori i selekcija. Struktura DE je identična strukturi drugih evolucijskih algoritama. Koristi varijacijske operatore kao križanje i mutaciju za stvaranje novih rješenja. Križanje i mutacija se primjenjuju nad populacijom potencijalnih rješenja, koja se kod DE nazivaju vektori. Drugi evolucijski algoritmi nazivaju članove populacije jedinke ili kromosomi.

Inicijalizirana populacija se može opisati kao slijed (engl. *sequence*)  $P = (v^{1,g}, \dots, v^{NP,g})$  i svaki element  $v^{j,g} = (v^{j_1}, \dots, v^{j_d}) \in \mathbb{R}^d$  trenutne generacije ili iteracije  $g$  je  $d$ -dimenzionalni vektor koji predstavlja moguće rješenje za problem. Stvorena inicijalizirana populacija je najčešće popunjena nasumičnim rješenjima koja su generirana unutar prostora pretrage koji je ograničen rasponima koje pojedini parametri koje opisuju problem mogu poprimiti. Kroz svaku generaciju se prelazi na generiranje novih rješenja, odnosno vektora, pomoću spomenutih operatora mutacije i križanja [16].

Ključna razlika između DE i ostalih evolucijskih algoritama je karakteristična mutacija. Mutacija kod DE je drugačija zato jer se koristi razlikama članova trenutne populacija za generiranje perturbacija. U ovom kontekstu, perturbacije su male promjene veličina ili specifičnije male razlike između vektora. Zbog takvog načina generiranja perturbacija, gubi se potreba za posebnim razdiobama vjerojatnosti čija je svrha postizanja perturbacija. Gubljenjem potrebe za navedenim razdiobama se postiže samostalna prilagodba perturbacija jer su ovisne o strukturi populacije koja se mjenja [16].

```

Postavi vrijednosti parametara algoritma;
Inicijaliziraj populaciju  $\mathcal{P} = (\mathbf{v}^{1,0}, \dots, \mathbf{v}^{NP,0})$ ;
g := 0;
% Glavna petlja
ponavljaj
    % Prolazak kroz sve vektore populacije, redom
    za j := 1, ..., NP čini
        % Stvaranje novih vektora
        Mutacijom stvori mutanta/donora  $\mathbf{u}^{j,g}$ ;
        Križanjem  $\mathbf{u}^{j,g}$  i  $\mathbf{v}^{j,g}$  stvori pokusni vektor  $\mathbf{t}^{j,g}$ ;
        % Selekcija naredne generacije – usporedba u smislu funkcije cilja
        ako  $\mathbf{t}^{j,g}$  bolji ili jednak  $\mathbf{v}^{j,g}$  onda
            |  $\mathbf{v}^{j,g+1} := \mathbf{t}^{j,g}$ ;
        inače
            |  $\mathbf{v}^{j,g+1} := \mathbf{v}^{j,g}$ ;
        kraj
    kraj
    g := g+1;
dok uvijek završetka nije zadovoljen;

```

Slika 5.4: Način rada diferencijalne evolucije [16]

Kao što je prikazano na slici 5.4, za svaki vektor trenutne populacije, mutacijom se generira privremeni vektor  $\mathbf{u}^{j,g}$  kojeg se križa s  $\mathbf{v}^{j,g}$ , stvarajući novi vektor  $\mathbf{t}^{j,g}$ . Nakon stvaranja novog vektora je potrebno odrediti hoće li on biti korišten u sljedećoj iteraciji algoritma odnosno narednoj generaciji, pošto će novi vektor  $\mathbf{t}^{j,g}$  jedino preći u narednu generaciju  $g+1$  ako je bolji ili jednak u odnosu na vektor  $\mathbf{v}^{j,g}$ .

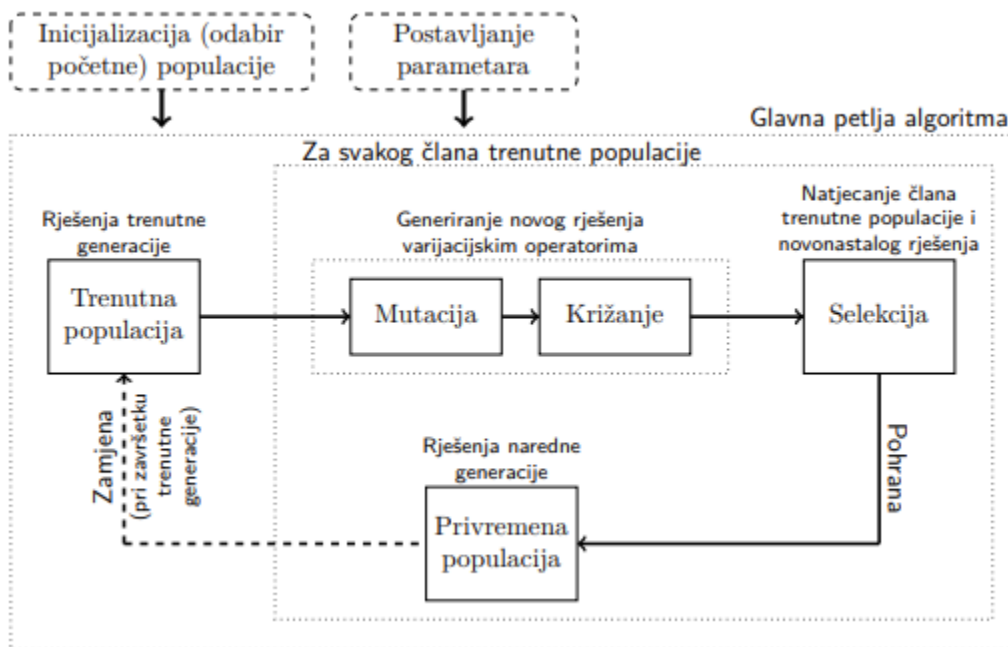
Vektor mutacije stvoren je kombinacijom individua, u obliku vektora, iz trenutne populacije. Postoji nekoliko načina u kojima se mutantni vektori mogu proizvesti u DE i način koji je korišten u optimizaciji je slijedeći izraz [50]:

$$\vec{S}_g^j = \vec{S}_g^{r1} + F \cdot (\vec{S}_g^{r2} - \vec{S}_g^{r3}) + F \cdot (\vec{S}_g^{r4} - \vec{S}_g^{r5}) \quad (5-1)$$

$$r1 \neq r2 \neq r3 \neq r4 \neq r5$$

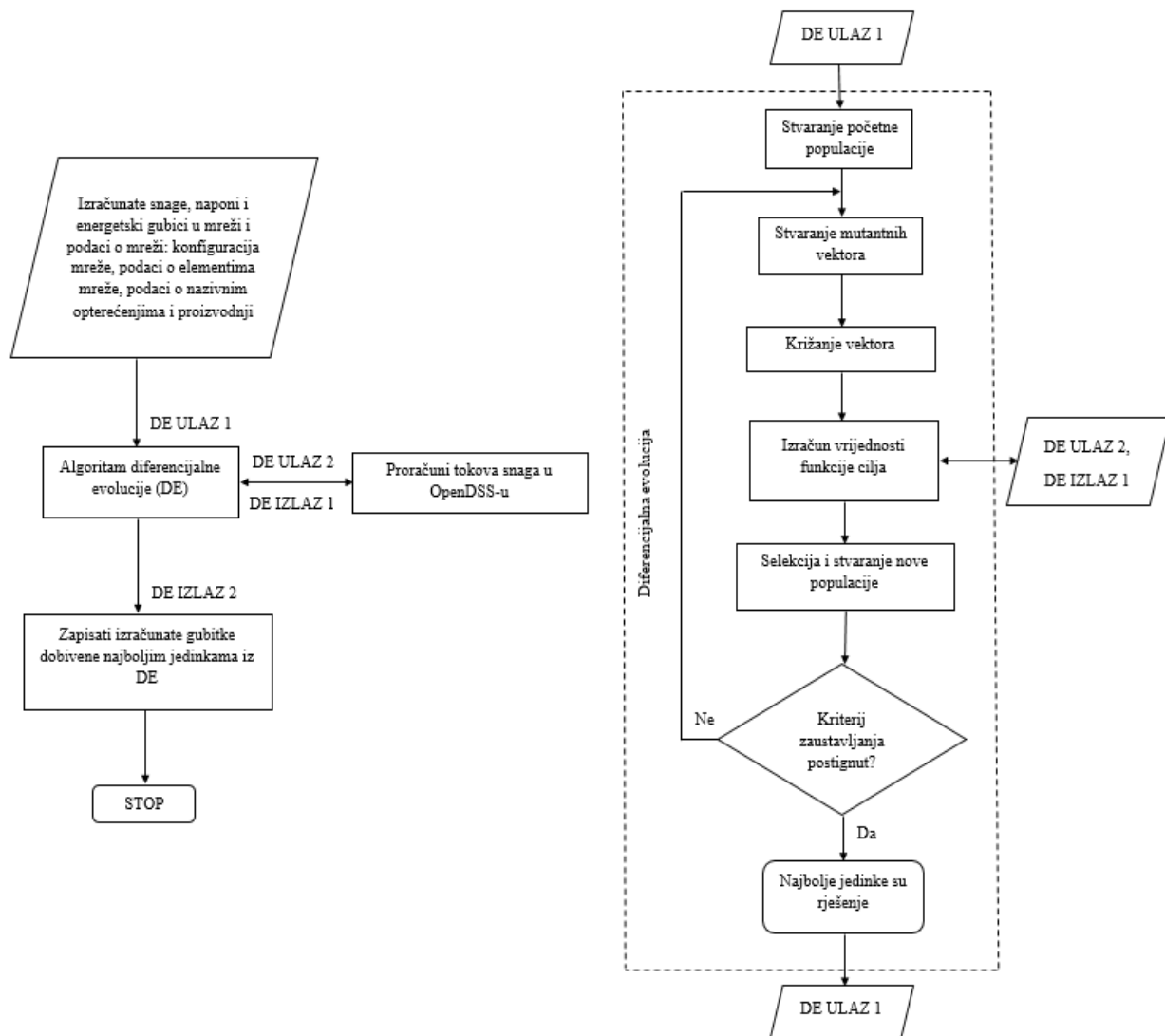
Vektor mutacije je  $\vec{S}_g^j$ , osnovni vektor je  $\vec{S}_g^{r1}$ , a diferencijalni vektori su  $\vec{S}_g^{r2}, \vec{S}_g^{r3}, \vec{S}_g^{r4}, \vec{S}_g^{r5}$ . Osnovni vektor može biti odabran na nekoliko načina. Može biti nasumično odabran iz populacije ili se može dobiti kao linearna kombinacija raznih vektora ili može bit odabran jer je najbolji vektor u populaciji. U izrazu simbol  $F$  je paramater DE, koji predstavlja faktor mutacije čija je uloga kontrolirati pojačanje razlika između individua i može iznositi između [0.1, 2]. Diferencijalni vektori su nasumično izabrani jednom po osnovnom vektoru i po njima metoda dobiva svoj naziv, jer se faktor mutacije množi s razlikom diferencijalnih vektora. Broj mutantnih vektora je jednak veličini populacije odnosno broju individua u populaciji.

Proces stvaranja i unapređivanja novih rješenja se ponavlja dok se ne zadovolji postavljen uvjet za završetak, koji je općenito izvršavanje zadanog broja generacija ili dosezanje zadanog broja vrednovanja funkcije cilja.



Slika 5.5: Glavna petlja algoritma DE [16]

Na slici 5.5 se može vidjeti da algoritam koristi dvije populacije da se izbjegne međudjelovanje vektora trenutne populacije i novonastalih vektora mutacijom i križanjem. Vektori koji prođu selekciju se pohranjuju u privremenu populaciju i na kraju generacije zamjenjuju vektore trenutne populacije.



Slika 5.6: Dijagram toka DE u Python-u s OpenDSS-om [50]

Dijagram toka na slici 5.6 pokazuje kako DE unutar Python-a uzima podatke iz OpenDSS programa i s njima raspoláže. Ulazi predstavljaju unos podataka iz OpenDSS-a u svoj algoritam dok izlazi predstavljaju obrađene podatke iz DE za vrijeme i nakon optimizacije.

Diferencijalna evolucija je originalno stvorena kao jednostavan i učinkovit način za rješavanja problema kontinuirane ili numeričke optimizacije i pokazala se kao veoma učinkovita i pouzdana metoda optimizacije.

## 6. Opis optimizacijskog problema

Glavna zadaća optimizacije je smanjiti ukupne energetske gubitke u mreži dok se održava kvaliteta električne energije prema normi EN 50160. Optimizacijski problem proizlazi iz potrebe da se što bolje iskoristi proizvodnja distribuiranih izvora dodavanjem baterijskog spremišta energije. Obnovljivi izvori energije kao vjetroelektrane i fotonaponske elektrane spadaju pod neupravljive izvore energije što dovodi do problema uravnotežavanja proizvodnje i potrošnje električne energije. Kao rješenje je smišljeno baterijsko spremište koje prilikom niske potrošnje preuzima višak proizvedene električne energije i predaje nazad u mrežu u periodima visoke potrošnje, smanjujući ukupne gubitke u procesu dok se bolje iskorištava proizvedena energija distribuiranih izvora.

Opis optimizacijskog problema će se predstaviti kao jednociljni problem optimizacije, dakle rješenje evolucijske strategije je jedna funkcija cilja s ciljem minimiziranja ukupnih energetskih gubitaka:

$$f_1 = E_{gub} \quad (6-1)$$

Ukupni energetski gubici se računaju u OpenDSS programu proračunom tokova snaga u mreži, stoga je ravnoteža opterećenja na trošilima i sabirnicama već zadovoljena i nije potrebno provjeravati i penalizirati u optimizacijskog problemu.

Cilj optimizacije je pronaći vrijednosti varijabla odluke koje će dati minimalnu ili optimalnu vrijednost funkcije cilja. Kao varijable odluke se koriste:

- kWrated – nazivna snaga baterijskog spremišta energija
- Bus1 – lokacija sabirnice u kojoj baterijsko spremište ima najveći utjecaj
- Loadshape – krivulja koja diktira spremištu postotak nazivne snage kojom bi se spremište punilo ili praznilo za svaki sat u danu.

Pošto varijabla odluke „Loadshape“ sadrži 24 znamenke u vrijednosti između -1.0 i 1.0, u optimizaciju se šalje 26 varijabli odluke. Te varijable odluke daju optimizaciji rezultat koji ide u funkciju cilja. Rezultati optimizacija se uspoređuju i ona funkcija cilja koja daje najmanje ukupne gubitke je odabrana kao rješenje optimizacije.



Ograničenja korištena u optimizacijskom problemu su granice napona u srednjenaponskoj mreži prema Europskom Standardu EN 50160:

$$V_{\max} \leq 1.1 \text{ p.u.} \quad (6-2)$$

$$V_{\min} \geq 0.9 \text{ p.u.}$$

Jednociljni optimizacijski problem se onda može zapisati u sljedećem obliku:

$$JC(v_0) = [E_{\text{losses}}] \rightarrow \min$$

podložno:

$$V_{\max} \leq 1.1 \text{ p.u.} \quad (6-3)$$

$$V_{\min} \geq 0.9 \text{ p.u.}$$

## 7. OpenDSS simulacijski alat

OpenDSS je besplatan programski paket kojeg je 1997. godine razvio Electric Power Research Institute, Inc. da služi kao sveobuhvatni alat za simulaciju električnih sustava u distribucijskim sustavima električne energije. Izvorno je većina značajki u programu namjenjena da ispuni potrebe za analizu distribuirane proizvodnje, no u međuvremenu je postao program otvorenog koda (engl. *Open Source*) što znači da se može neograničeno proširivati tako da se s modifikacijama može prilagoditi budućim potrebama. Modernija verzija programa sadrži alate za analizu energetske učinkovitosti isporučene energije, analizu harmonika i primjenu pametnih mreža [40].

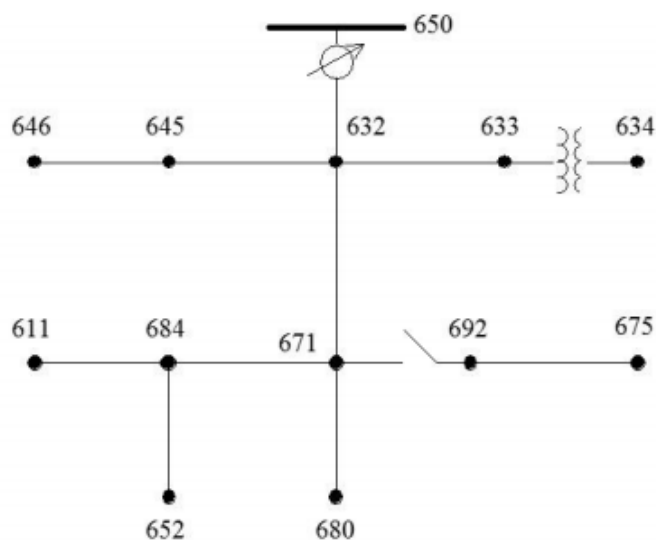
OpenDSS je korišten za [40]:

- Planiranje i analizu distribucije
- Modeliranje spremišta
- Simulaciju zaštitnih sustava
- Simulaciju fotonaponskih sustava
- Simulaciju vjetroturbina
- Procjenu stanja distribucije
- Struje izazvane geomagnetskim utjecajima
- Analizu harmonijskih i interharmonijskih izobličenja
- Generalna analiza multi-faznih izmjeničnih krugova
- Impulsna opterećenja
- Analizu neobičnih konfiguracija transformatora
- Simulacije godišnjeg opterećenja i proizvodnje
- Studije planiranja distribucije temeljene na riziku
- Dodaj nešto ili napiši i tako dalje

Iako je OpenDSS napravljen kao samostalan izvršani program za planiranje, proračune i izvršavanje analiza za razne scenarije u distributivnim električnim mrežama, mogućnosti programa su proširene ako se koristi u kosimulaciji s programskim jezicima kao C++, MATLAB i Pythonom, koji je korišten u ovom radu. U slučaju kosimulacije OpenDSS se koristi kao alat za proračun i simulaciju virtualne mreže, dok programski jezik vrši optimizaciju s podacima iz OpenDSS-a.

## 7.1 Primjena OpenDSS programa

OpenDSS se razlikuje od programa kao EasyPower i DIgSILENT, koji su korišteni na laboratorijskim vježbama brojnih kolegija, po tome što koristi tekstualno sučelje preko kojeg se unose elementi sustava, za razliku od grafičkih sučelja navedenih programa u kojima su elementi prikazani ikonama. Tekstualni način unosa naredbi čini mrežu manje preglednom, ali dopušta bržu obradu podataka i laganu integraciju s programskim jezicima u kosimulaciju. U radu nije korištena originalna mreža, nego primjer mreže koji dolazi s instalacijom programa i može se naći pod testnim slučajevima (engl. *IEEE Test Cases*) u direktoriju gdje je instaliran program. Ime mreže koja je korištena u radu je 13Bus ili IEEE13Node zato jer sadrži 13 sabirnica na koje su spojeni nadzemni i podzemni vodovi, regulacijski transformator, dva kondenzatora i 9 tereta od kojih je većina nesimetrična. Mreža je prikazana na slici 7.1 i služi za analizu i testiranje distributivnog sustava.



Slika 7.1: 13Bus distributivna mreža [51]

Početak svake mreže počinje sa stvaranjem sabirnice koja predstavlja izvor ili nadomjesnu mrežu s kojom je spojena korištena mreža:

```
new circuit.IEEE13Nodeckt  
~ basekv=115 pu=1.0001 phases=3 bus1=SourceBus
```

Prvo je definirano ime kruga ili mreže s „new circuit.IEEE13Nodeckt“ s baznim naponom od 115 kV, p.u. (engl. *per-unit*) od 1.0001, definirane 3 faze i ime busa koji služi kao izvor „SourceBus“.

Za definiranje izvora nije potrebno mnogo informacija, ali se može dodatno modelirati sa snagom kratkog spoja, otporima, reaktancijama i drugim parametrima. Naredbe za transformatore, vodove i kondenzatore nisu mjenjane u optimizaciji, tako da će druge naredbe biti objašnjene. Za korištenje OpenDSS-a u kosimulaciji potrebno je znati specifične naredbe jer su mreže koje dolaze s programom već dobro definirane i smišljene s namjerom da ih se koristi u pokusima. Bitno je naglasiti da se koristi promjenjena verzija mreže, pošto je dodano baterijsko spremište, energymeter i dva generatora koja predstavljaju distribuiranu proizvodnju. Lokacija i veličina distribuiranih izvora korištenih u simulaciji su dani u tablici 7.1

Tablica 7.1: Lokacija i veličina distribuiranih izvora

	Lokacija (sabirnica)	Broj faza	P [kW]	Q [kVAr]
DI 1	634	3	200	± 65
DI 2	675	3	150	± 50

Također su promjenjeni režimi rada trošila i spremišta, što će biti pokazano u poglavlju 8.2, dok su kondenzatori uklonjeni iz originalne verzije mreže.

**Set Mode=daily number=24 stepsize=1h**

**Solve**

Prikazane naredbe određuju način rada mreže pomoću “mode” naredbe koja može biti podešena na npr. “daily i yearly” ili dnevni i godišnji način rada koji određuje vremenski period u kojem je obračunat proračun. Naredba “number=24” pokreće naredbu “Solve” 24 puta s vremenskim razmacima u računici od 1 sata koji su definirani naredbom “stepsize=1h”. Naredba “Solve” će se izvršavati preko Python-a u simulaciji, tako da ju je bitno isključiti u OpenDSS skripti, ali je bitno naglasiti da postoje razni načini rješavanja. Podešavanje načina rješavanja je bitno u simulaciji da sljedeća naredba može ispravno raditi i dati ispravni proračun:

**New Loadshape.L1 npts=24 interval=1.0 Pmult=(0.1 0.1 0.1 0.1 0.3 0.4 0.3 0.3 0.4 0.3 0.6 0.5 0.8 0.7 0.9 0.8 0.9 1 0.7 0.7 0.3 0.4 0.2 0.2)**  
**New Loadshape.BL1 npts=24 interval=1.0 Pmult=(-0.3 -0.3 -0.3 -0.3 0.3 0.4 0.3 0.3 0.4 0.3 0.4 0.4 0.3 0.4 0.5 0.6 0.5 0.6 0.5 0.5 0.3 0.4 -0.2 -0.2)**

Prikazana „New Loadshape“ naredba služi da elementi kao trošila i spremišta prate krivulju koja može predstavljati režim rada objekata u stvarnosti. Naredba „npts=24“ je očekivana maksimalna

veličina niza koja će biti korištena pod „Pmult“ naredbom, dok „interval=1.0“ naredba podešava fiksni vremenski interval od 1 sata između svakog podatka u nizu. Spomenuta „Pmult“ naredba sadrži u zagradi niz od 24 broja između -1 i 1 koji su odvojeni razmakom i služe kao vrijednosti s kojima se množi nazivna snaga trošila ili spremišta. Spremišta mogu imati negativan predznak koji označava period kada se baterija puni i vuče iz mreže snagu jednaku svojom nazivnom snagom pomnoženu s negativnom vrijednosti, za razliku od pozitivnih vrijednosti koji označavaju da baterija daje energiju u mrežu i ponaša se kao generator, ne trošilo. U simulaciji se naredba „New Loadshape.L1...“ ne mijenja jer predstavlja krivulju potrošnje električne energije u tipičnoj distributivnoj mreži, dok je druga naredba „New Loadshape.BL1 ...“ varijabla odluke korištena u rješavanje problema optimizacije.

Izvorni podaci svih trošila nisu mijenjani, ali je na kraj linije koda dodana naredba „daily=L1“

**New Load.671 Bus1=671.1.2.3 Phases=3 Conn=Delta Model=1 kV=4.16 kW=1155 kvar=660 daily=L1**

Svrha te naredbe je da trošila prate određen režim rada praćenjem krivulje i da se pozove spomenuta „Mode=daily“ naredba.

Modeliranje baterijskog spremišta električne energije postiže se s naredbom „New Storage“. Naredbe koje su izmjenjene su „kWrated=2000“,

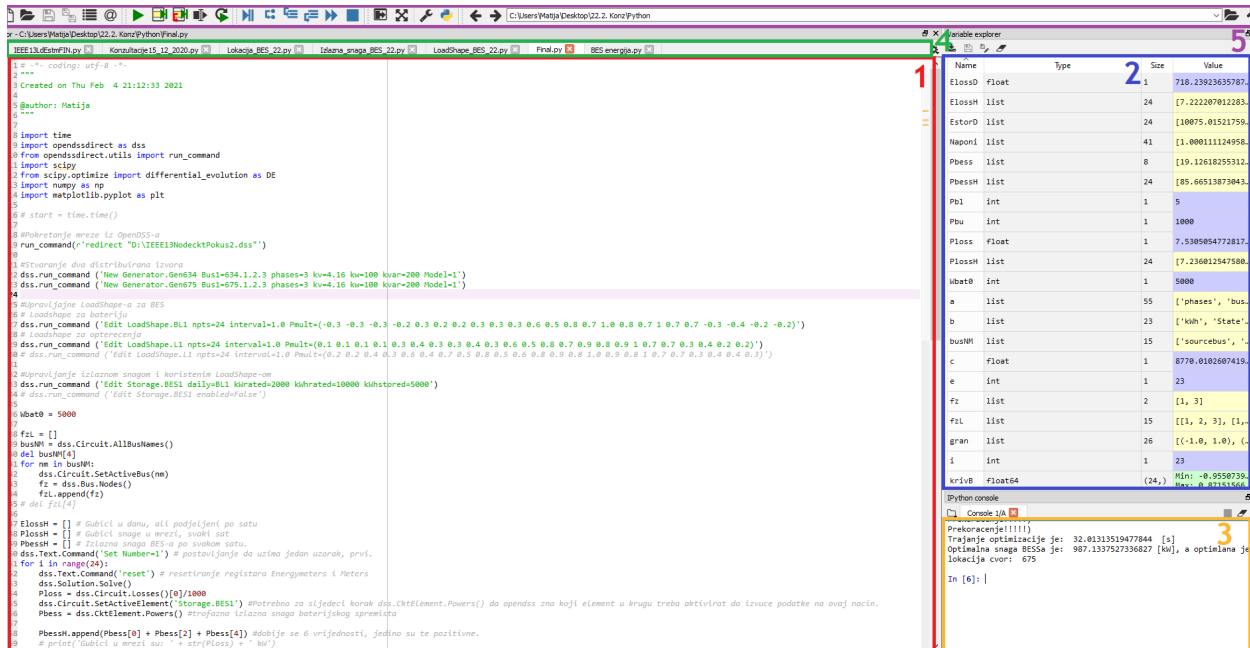
Nazivna snaga baterijskog spremišta je predstavljena „kWrated“, „kWhrated“ zadaje nazivni kapacitet spremišta u kWh, dok „kWhstored“ i „%stored“ naredbe zadaju trenutnu količinu uskladištene energije u kWh.

**New Storage.BES1 Bus1=632.1.2.3 DispMode=FOLLOW Phases=3 State=Charging daily=BL1 kWrated=1000 kWhrated=8000 %stored=40**

Režim punjenja i pražnjenja baterije određen je vanjskim kontrolerom ili u našem slučaju naredbom „Dispmode“. Ako se naredba postavi na „DispMode=Default“, potrebno je dodati naredbe „ChargeTrigger“ i „DischargeTrigger“ koje služe kao okidači za punjenje i pražnjenje, po kojima spremište prati „Loadshape“ krivulju i prazni/puni nazivnom snagom kada vrijednosti u „Loadshape“ prekorače vrijednosti zadane u „ChargeTrigger“ i „DischargeTrigger“. Korišten način rada je „DispMode=Follow“ jer se nazivna snaga spremišta množi s vrijednostima u aktivnom Loadshape-u i jedino pozitivni i negativni predznaci određuju kada se spremište puni ili prazni. Takav način rada omogućuje bolju prilagodbu spremišta prema mreži i ne zahtjeva dobro poznavanje te mreže kao što „DispMode=Default“ naredba zahtjeva.

## 8. Rješavanje problema optimizacije pomoću Pythona

Razvijen u kasnim 1980.-tima, Python je postao jedan od najpopularnijih programskih jezika jer je besplatan, relativno lagan za naučiti, veoma pregledan i čitak jezik sa širokim područjem namjene koji dopušta programeru da koristi više stilova programiranja: objektno, strukturalno i aspektno orijentirano programiranje. Zbog svoje sveobuhvatne standardne knjižnice Python dolazi s mnogo dodatnih knjižnica ili paketa koji ga čine moćnim alatom, naročito kada su knjižnice uključene uz platforme koje nastoje pojednostaviti korištenje Pythona. Platforma koja distribuira Python za znanstveno programiranje je Anaconda, besplatna platforma s raznim programima za specifične grane znanosti među koje spada i program korišten u radu, Spyder. Spyder je vrlo pregledan što se može vidjeti na slici 8.1 i sadrži sve pakete koji su potrebni za rad.



Slika 8.1: Sučelje Spyder-a [42]

Pregledno korisničko sučelje Spydera je prikazano na slici 8.1 i dijelovi su:

1. Uređivač teksta. Prostor za pisanje koda
2. Preglednik varijabli iz koda.
3. Python konzola, mjesto na kojem su traženi rezultati prikazani
4. Svaki kod ima svoju karticu (engl. *tab*) što dozvoljava više otvorenih kodova u isto vrijeme.

## 5. Alatna traka za izvršavanje koda, upravljanje datotekom i postavke

### 8.1 Opis izvornog Python koda

Naredba „import“ služi za uvoz knjižnice da se može pristupiti njenim modulima, Python datotekama koje definiraju varijable, funkcije i klase i same po sebi su kod. Komanda „import scipy“ uvozi knjižnicu SciPy koja dolazi s programom Spyder i prema [43] sadrži module za optimizaciju, linearnu algebru, integrale, obradu digitalnih slika i signala, Fourier-ove transformacije, interpolaciju itd.

```
1     import time
2     import scipy
3     from scipy.optimize import differential_evolution as DE
4     import numpy as np
5     import matplotlib.pyplot as plt
7     import opendssdirect as dss
8     from opendssdirect.utils import run_command
```

Za optimizaciju će se koristiti diferencijalna evolucija, algoritam za globalnu optimizaciju koji se pomoću naredbe „from scipy.optimize import differential\_evolution as DE“ uvozi iz SciPy knjižnice preko optimize modula. Naredbom „import time“ je uvežen modul s kojim se može pratiti vrijeme u kodu i korišten je za provjeru trajanja optimizacije, dok „import numpy as np“ nije korištena u završnoj verziji, ali se koristila povremeno. Uvoženjem „import matplotlib.pyplot as plt“ dobijemo knjižnicu za crtanje grafova. Zadnja knjižnica je stara tek koju godinu i služi za izravnu komunikaciju s OpenDSS-om pomoću naredbe „import opendssdirect as dss“. Uvoženjem modula pomoću „from opendssdirect.utils import run\_command“ se OpenDSS skripte mogu lakše i direktno mjenjati. Dodatna prednost su podmoduli s izvorne stranice OpenDSSDirect [44] pomoću kojih se mogu izvući podaci o stanju mreže i njenim trošilima.

Uvoženjem „run\_command“ naredbe omogućava se direktna komunikacija s OpenDSS skriptom i korištena je već na početku da se locira OpenDSS skripta s željenom mrežom.

```
10     run_command(r'redirect "D:\IEEE13NodecktPokus4.dss"')
```

Sljedeći blok naredbi briše sabirnicu 634 s liste sabirnica zbog preniskog napona u distributivnoj mreži. Pošto su sabirnice već pozvane i stavljene u listu u Pythonu, imena sabirnica se ne moraju više pozivati iz OpenDSS-a

```
14     fzL = []
15     busNM = dss.Circuit.AllBusNames()
16     del busNM[4]
17     for nm in busNM:
18         dss.Circuit.SetActiveBus(nm)
19         fz = dss.Bus.Nodes()
20         fzL.append(fz)
```

Nakon izvršavanja svakog proračuna u OpenDSS-u, potrebno je vratiti određene elemente na početno stanje jer njihovo stanje ostane zapamćeno u OpenDSS-u nakon svakog proračuna. Regulacijske transformatore s početnim kapacitetom baterije je iznimno važno vratiti u početno stanje jer utječu na buduće proračune. Dodatna naredba “dss.Solution.DblHour(0)” služi da proračuni kreću od nule, a ne nakon već izračunata 24 sata. Potrebno je jer proračuni mogu dati rezultate za dva odvojena dana.

```
36     dss.Text.Command('Transformer.Reg1.tap=1')
37     dss.Text.Command('Transformer.Reg2.tap=1')
38     dss.Text.Command('Transformer.Reg3.tap=1')
39     dss.Text.Command('Storage.BES1.%stored=40')
40     dss.Solution.DblHour(0)
```

Funkcija cilja u Python-u sadrži varijable odluke objašnjenje u 6. poglavlju. U Python-u je zapisana na način da za vrijeme optimizacije u DE, Python prepisuje vrijednosti u OpenDSS-u, koje su unutar određenih granica, i OpenDSS vrši proračune za sve upisane vrijednosti i vraća nazad ukupne gubitke u mreži koji su postavljeni kao funkcija cilja.

Naredba za implementaciju diferencijalne evolucije u originalnom obliku „scipy.optimize.differential\_evolution(func, bounds, ...)“ može biti skraćena direktnim uvoženjem iz knjižnice na početku. Ispred zadane kratice DE, rezultat optimizacije se stavlja pod izabrano ime objekta koje sadrži funkciju cilja i rezultate.



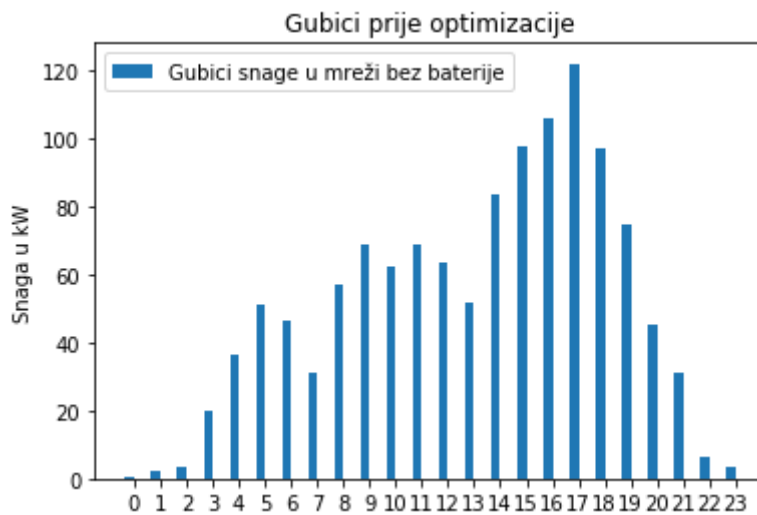
```
123 result=DE(fc,gran,strategy='best1bin', maxiter=1000, popsize=150, mutation=(0.6,  
1.1), recombination=0.5, polish=True)
```

Prvi parametar u zgradi je funkcija cilja, kojoj algoritam diferencijalne evolucije nastoji naći globalni minimum. Funkcija cilja je jedini parametar koji nije opcionalan jer se nad tom funkcijom vrši algoritam da se minimizira, dok je svaki drugi parametar opcionalan. U literaturi [46] postoji oko 20 parametara, ali korišteni su slijedeći parametri:

- bounds – granice za varijable u funkciji cilja. Postoje dva načina za određivanje granica varijable  $x$ : 1. način je u obliku  $a \leq x \leq b$ . 2. način ima oblik para (min, max) za svaku varijablu.
- strategy – Strategija koju diferencijalna evolucija koristi. Koristi se zadana 'best1bin' strategija.
- maxiter – maksimalan broj iteracija koji u kontekstu evolucijskog algoritma znači maksimalan broj generacija kroz koje populacija može evoluirati.
- popsize – množitelj za određivanje ukupne veličine populacije.
- mutation – u literaturi [46] poznato kao diferencijalna težina, konstanta mutacije. Raspon mutacije je (0, 2). Povećavanjem konstante mutacije se povećava radijus pretraživanja
- recombination – poznato pod drugim nazivom, vjerojatnost križanja, konstanta rekombinacija je u rasponu (0,1). Povećavanjem konstante se dozvoljava većem broju mutanata da pređu u slijedeću generaciju, ali uz rizik stabilnosti populacije.
- polish – može biti False ili True. Ako se postavi „polish=True“ koristi se L-BFGS-B metoda da se dotjera najbolji pripadnik populacijaš to može poboljšati minimizaciju algoritma.

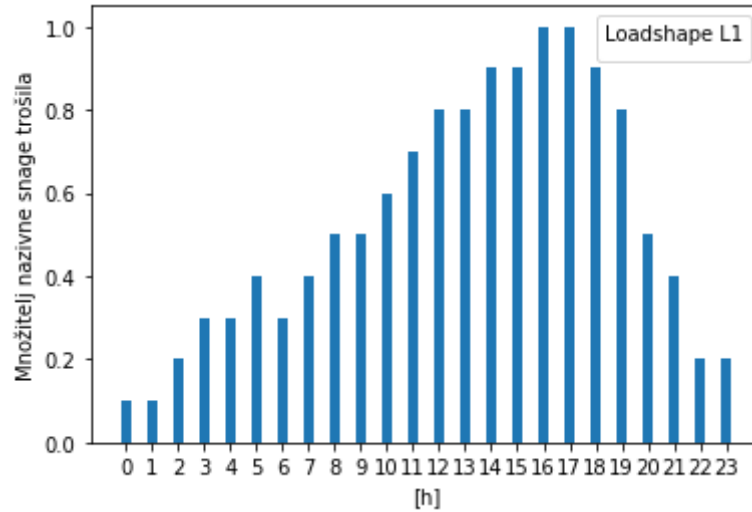
## 8.2 Rezultati simulacije i analiza rezultata

Na slici 8.2 prikazani su ukupni gubici u mreži podjeljeni po svakom satu u danu prije dodavanja BESS-a u mrežu. Dodani distribuirani izvori vjerojatno dodatno smanjuju gubitke u kasnim noćnim satima, ali nisu dovoljno veliki da preuzmu popodnevna visoka opterećenja. Nakon 7 i 13 sati dogode se veliki skokovi u potrošnji, pogotovo jer za vrijeme tih sati dođe do smanjenja gubitaka. Promjene su reda veličina nekoliko desetaka kW i može doći do propada napona ako nisu očekivani.

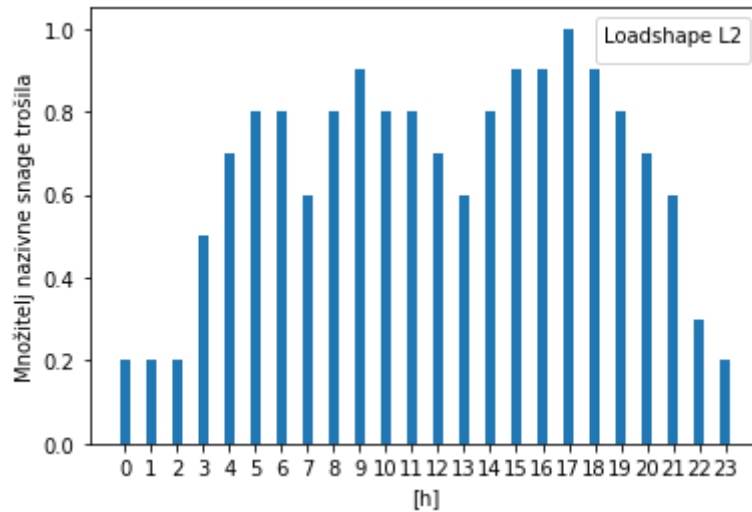


Slika 8.2: Gubici snage u mreži za svaki sat

Krivulje po kojima rade trošila su prikazana na slikama 8.3 i 8.4. dvije vrste trošila su postavljena. Manja trošila rade po krivulji L1 koja predstavlja režim rada tipičnog kućanstva, dok veća trošila rade po krivulji L2 koja je sličnija režimu rada industrijskog postrojenja. Opterećenja su slabija nakon 9 sati navečer da se baterija stigne napuniti prilikom slabije potrošnje. Nazivna snaga trošila se u svakom satu množi s množiteljem nazivne snage u Loadshape naredbi, čija je vrijednost između 0 i 1. Ako je postavljena nula, trošilo ne uzima snagu za rad, a ako je postavljena jedinica trošilo radi sa 100 % nazivne snage.

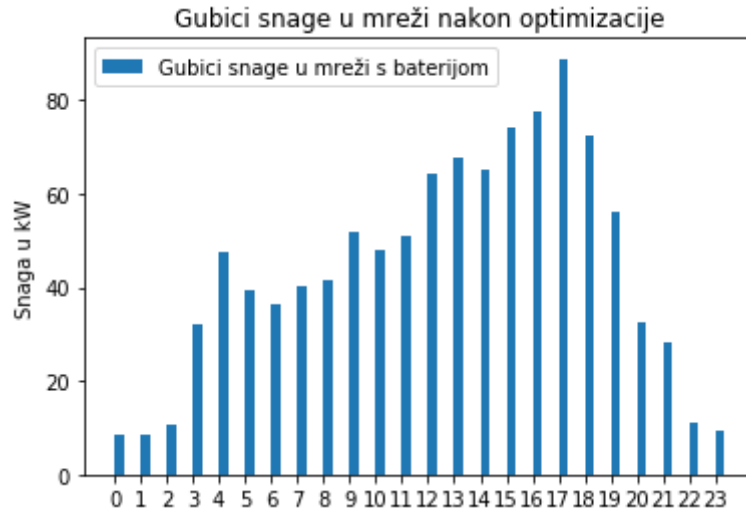


Slika 8.3: Krivulja rada trošila L1



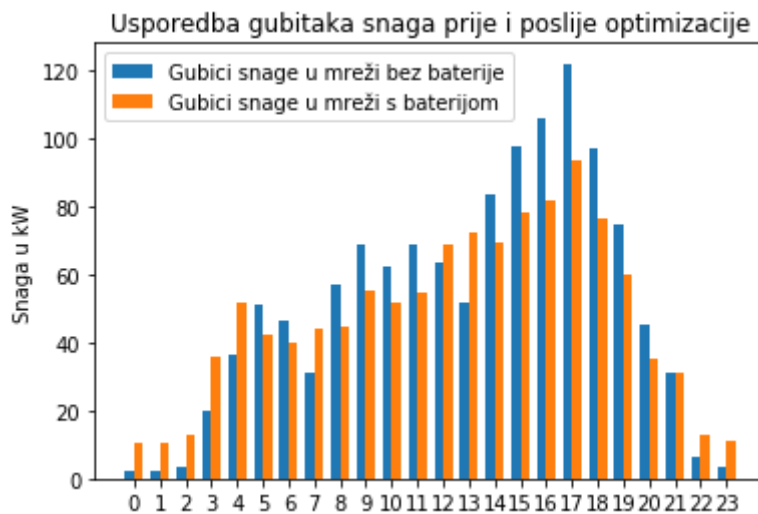
Slika 8.4: Krivulja rada trošila L2

Nakon optimizacije, može se vidjeti utjecaj BESS-a u mreži na slici 8.5. Preuzimanjem snage proizvedene iz distribuiranih izvora tokom noći i prijenosne mreže, BESS se može napuniti dovoljno da značajno smanji vršna opterećenja. Također gubici postepeno rastu i nisu nepredvidljivi ili nagli. Jedino nakon 17 sati potrošnja počne padati sa svakim satom, međutim to je jednako u oba slučaja.



Slika 8.5: Gubici snage u mreži s BESS-om

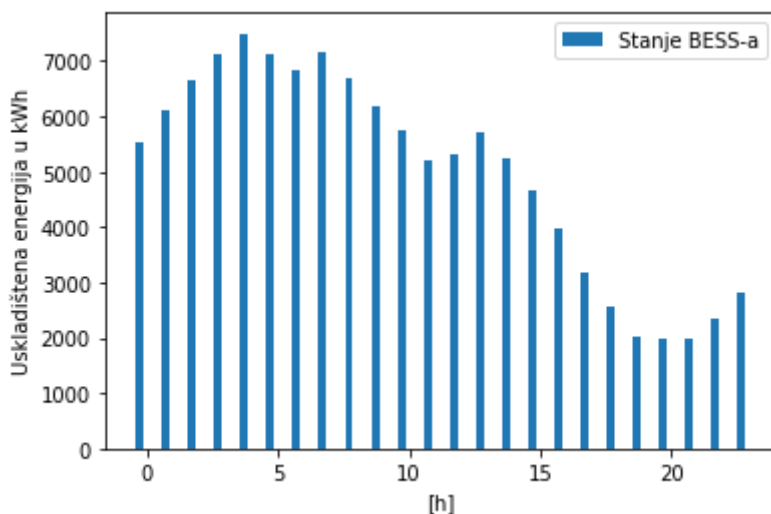
Ako se oba slučaja, prije i poslije dodavanja optimiziranog BESS-a, stave jedan pokraj drugog, dobije se prikaz na slici 8.6. Slučaj nakon optimizacije izgleda stabilnije, iako oko 7 i 13 sati, gubici su veći ali se u optimizaciji to vjerojatno iskazalo isplativo da BESS ima dovoljno energije da savlada nadolazeće skokove u opterećenju. Pošto se baterija ponaša kao trošilo kada se puni, njena punjenja se gledaju kao gubici.



Slika 8.6: Gubici snage bez i s BESS-a

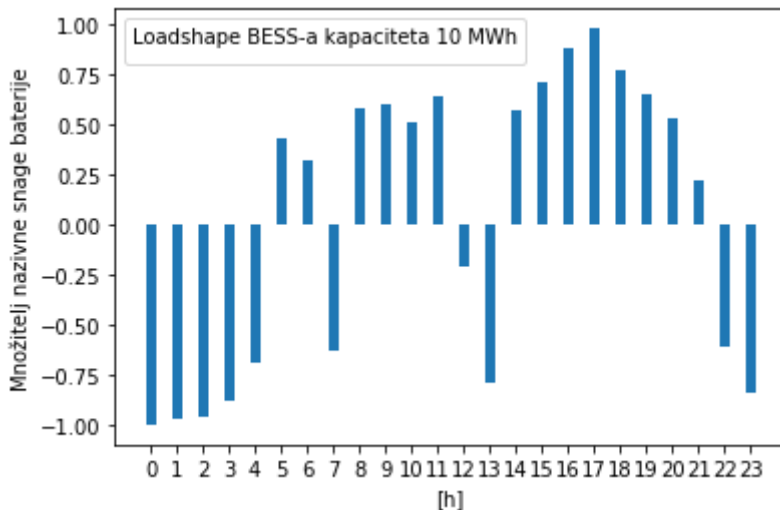
Pogled na stanje uskladištene energije BESS-a na slici 8.7 daje uvid kako se BESS puni i prazni kroz dan. Povećani i smanjeni gubici odgovaraju krivulju uskladištene energije BESS-a.

Punjenje u 7 i 13 sati na slici 8.6 vidljivo je na slici 8.7. Početni kapacitet BESS-a postavljen je na 50 %, što je 5 MWh od ukupnih 10 MWh. BESS se ne može prazniti nakon 2 MWh jer je to rezerva. Rezerva je postavljena na 20 %, što ispadne 2 MWh na nazivni kapacitet od 10 MWh.



Slika 8.7: Krivulja uskladištene energije BESS-a

Stanje BESS-a može se pogledati na drugačiji način preko krivulje punjenja i pražnjenja prikazane na slici 8.8. Negativne vrijednosti predstavljaju period kada se BESS punio i ponašao kao trošilo, a pozitivne kada se praznio i ponašao kao generator. Krivulja na slici 8.8 odgovara na krivulji na slici 8.7.



Slika 8.8: Krivulja punjenja i pražnjenja BESS-a

Preostala dva rješenja optimizacije dana su u tablici 8.2. Nazivna snaga BESS-a iznosi skoro 5 MW, što je vjerojatno predimenzionirano za ovakvu mrežu i distribuirane izvore. Naime treba uzeti u obzir da je mreža dinamična i da se BESS mora naglo puniti i prazniti da bi imao značaj utjecaj.

Tablica 8.1: Rješenja optimizacije

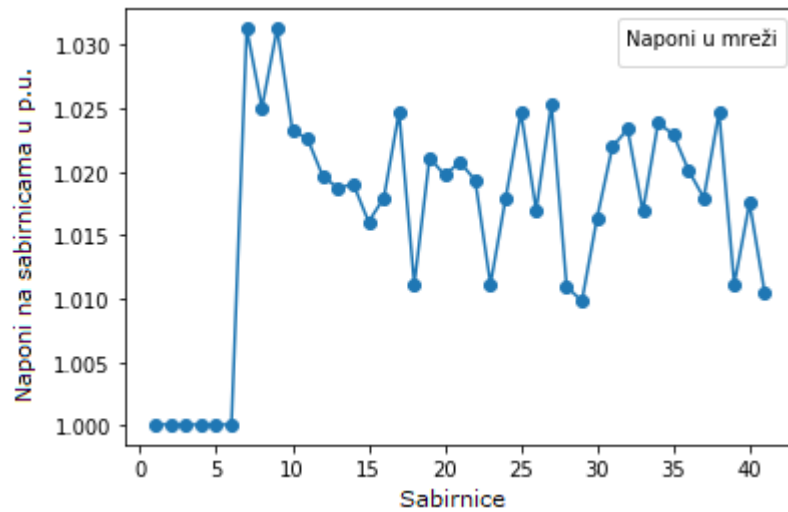
Sabirnica	Nazivna snaga
671	4900 kW

Visoka nazivna snaga je jasnija ako se uzme u obzir sabirnica u kojoj je postavljen BESS. Na sabirnici 671 nalazi se najveće trošilo, nazivne snage preko 1.1 MW. Sabirnica 671 je okružena većim trošilima dok su distribuirani izvori na rubu mreže. Tijekom većih opterećenja BESS je zbog neposredne blizine vrlo vjerojatno preuzeo opterećenja.

Tablica 8.2: Minimalni i maksimalni naponi u mreži za oba slučaja

	Napon [p.u]		Odstupanje napona [p.u]	
	Min.	Max.	Min.	Max.
Prije optimizacije s distribuiranim izvorima	1.000076	1.031296	+0.000076	+0.031296
Nakon optimizacije	1.000055	1.031289	+0.000055	+0.031289

Naponske prilike u mreži su skoro identične prije i poslije optimizacije. Odstupanja su minimalna na svim sabirnicama i trošilima. Razlog zašto je napon stabilan može biti što je mreža mala i nema potrošače na većim udaljenostima. Naročito nema više potrošača u seriji što može poprilično smanjiti napon kod krajnjih potrošača. Dodatan razlog za stabilan napon mogu biti distribuirani izvori koji su smješteni kod krajnjih sabirnica, gdje su naponi inače najniži. Alternativan prikaz naponskog profila mreže je prikazan na slici 8.9.

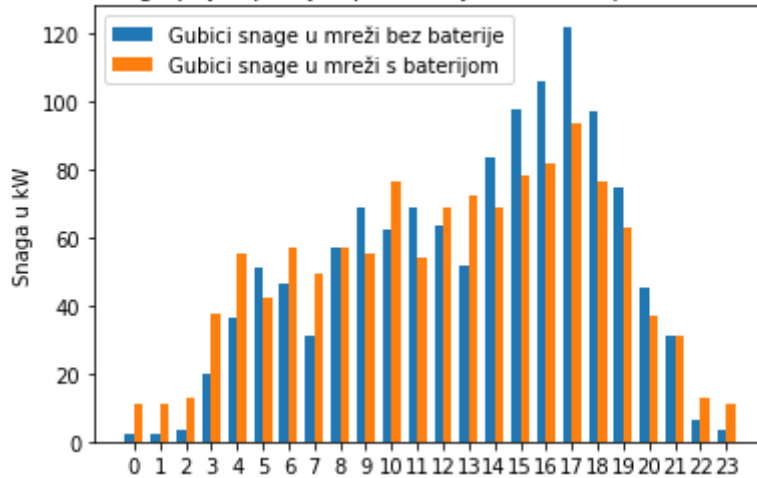


Slika 8.9: Naponski profil mreže

Da se vidi utjecaj veličine nazivnog kapaciteta BESS-a na gubitke u mreži, napravljene su dvije dodatne simulacije s nazivnim kapacitetima od 5 MWh i 20 MWh. Lokacija i nazivna snaga BESS-a postavljena su prema rezultatima u tablici 8.2, dok je krivulja pražnjenja i punjenja ostavljena kao varijabla da se vidi ponašanje BESS-a. Početno stanje BESS-a i dalje je postavljeno na 50 % nazivnog kapaciteta.

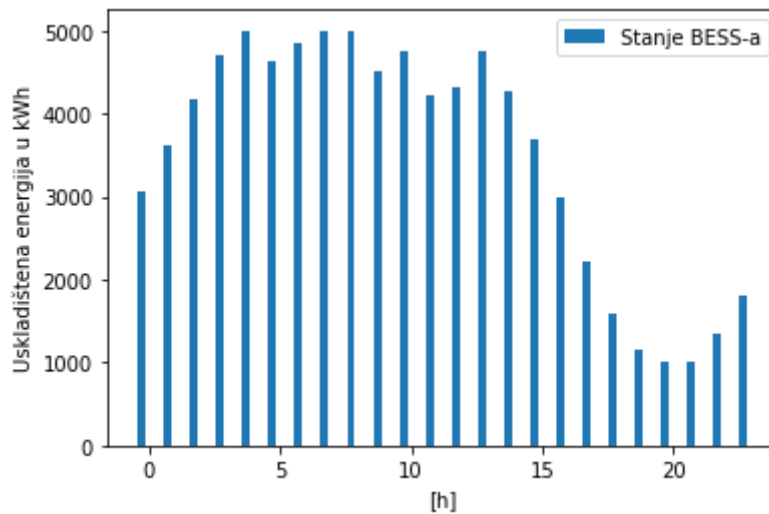
U prvoj simulaciji postavljen je nazivni kapacitet veličine 5 MWh. Rezultati na slici 8.10 pokazuju da je prioritet i dalje bio smanjiti vršna opterećenja, a time i gubitke. Međutim prije tih vršnjih opterećenja su povećani gubici da bi BESS imao dovoljno energije za vršna opterećenja.

Gubici snaga prije i poslije optimizacije, veličina spremišta od 5 MWh



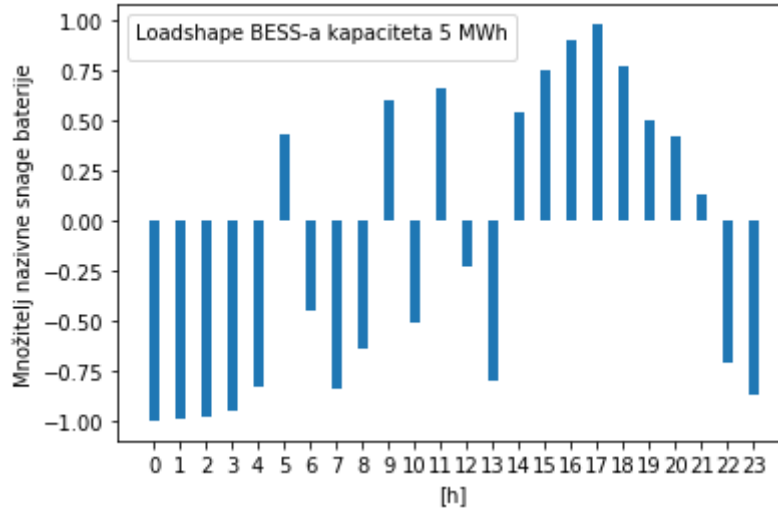
Slika 8.10: Gubici snage u mreži s BESS-om kapaciteta 5 MWh

Stanje BESS-a prikazano je na slikama 8.11 i 8.12 i pokazuje da prije potpunog pražnjenja za vrijeme vršnih opterećenja, BESS nastoji održati dovoljno energije za ta opterećenja bez velikih povećanja gubitaka. Između 7 i 15 sati BESS često izmjenjuje režime rada i prelazi iz punjenja u pražnjenje i obrnuto, prije nego što se potpuno isprazni tijekom vršnih opterećenja



Slika 8.11: Krivulja uskladištene energije BESS-a kapaciteta 5 MWh

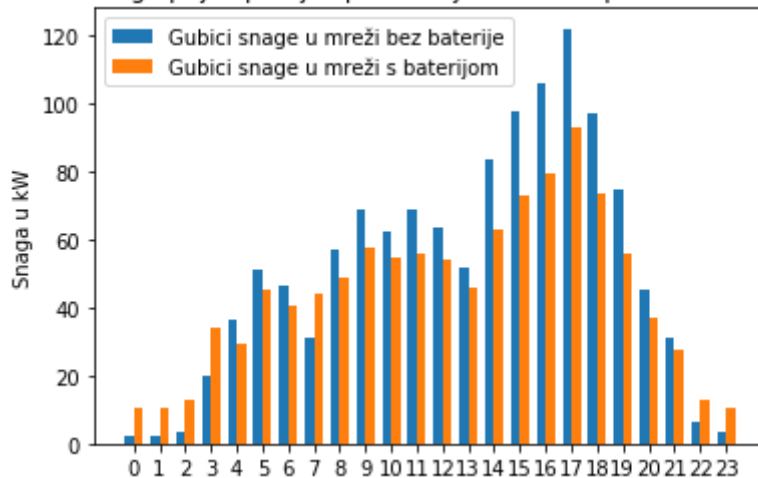




Slika 8.12: Krivulja punjenja i pražnjenja BESS-a kapaciteta 5 MWh

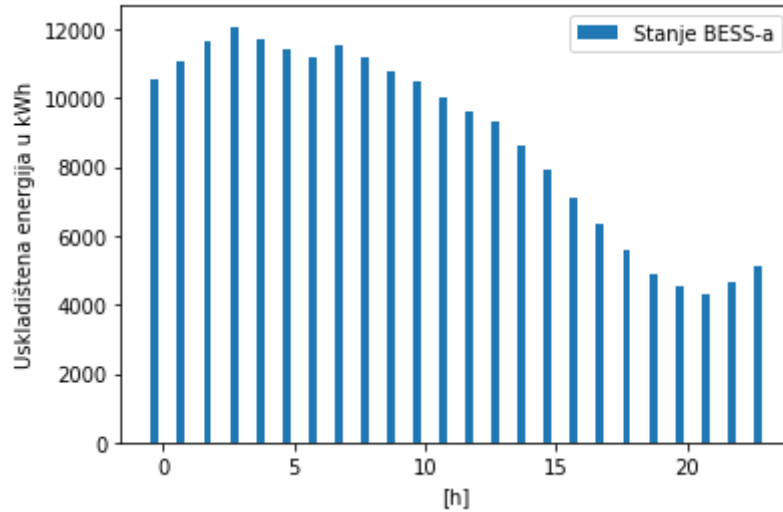
BESS u drugoj dodatnoj simulaciji ima duplo veći kapacitet od inicijalnog, veličine 20 MWh. Rezultati na slici 8.13 pokazuju da s kapacitetom tolike veličine i početnim stanjem od 10 MWh, BESS može smanjiti većinu gubitaka. Kao i u prethodnim slučajevima, puni se u početnim satima. Punjenje za vrijeme toliko malih gubitaka ima mali utjecaj na ukupne gubitke, ali veliki utjecaj na smanjenje vršnih opterećenja.

Gubici snaga prije i poslije optimizacije, veličina spremišta od 20 MWh

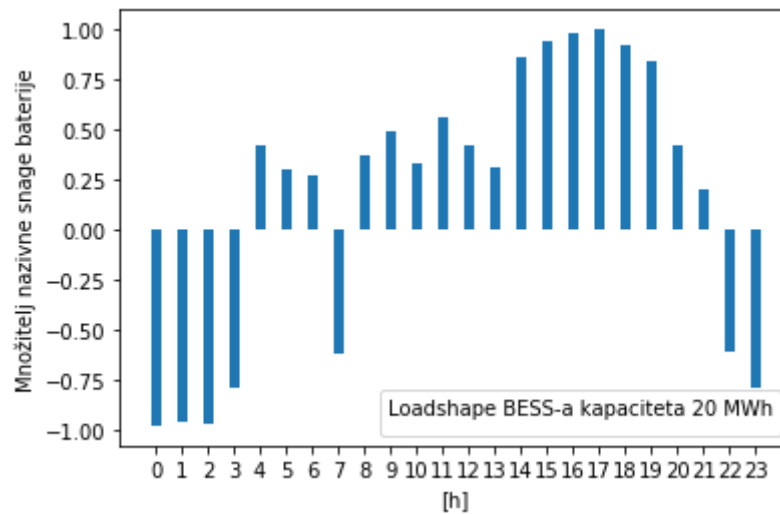


Slika 8.13: Gubici snaga u mreži s BESS-om kapaciteta 20 MWh

Krivulje na slikama 8.14 i 8.15 pokazuju da se BESS većinom postepeno praznio dok nije došao veoma blizu rezerve. Iako sadrži dovoljan kapacitet da se postepeno prazni i smanji vršna opterećenja, punjenja početkom dana osiguravaju BESS-u dovoljno energije za veća opterećenja.



Slika 8.14: Krivulja uskladištene energije BESS-a kapaciteta 20 MWh



Slika 8.15: Krivulja punjenja i pražnjenja BESS-a kapaciteta 20 MWh

Utjecaj na ukupne gubitke može se vidjeti u tablici 8.4 gdje se vidi mala razlika prije i poslije dodavanja BESS-a. Naime, na razini dana to nije velika razlika ali na godišnjoj razini gubici se mogu smanjiti za nekoliko MWh, moguće i desetaka MWh, ovisno o distribuiranom izvoru i godišnjem dobu. Usporedba gubitaka ne pokazuje potpuni utjecaj BESS-a na mrežu. Pogledom na gubitke na slici 8.6 se vidi stabilnija mreža s učinkovitijom distribuiranom proizvodnjom.

Smanjenjem kapaciteta BESS-a na 5 MWh imalo je i dalje povoljan utjecaj na mrežu u pogledu vršnih gubitaka i učinkovitosti distribuirane proizvodnje. Ukupni gubici su manji reda veličine 15 MWh, što nije velika prednost. BESS nazivnog kapaciteta 20 MWh imao je izniman utjecaj na mrežu u svakom pogledu, ali je nerealistično postaviti BESS tolike veličine u tako malu mrežu.

Tablica 8.3: Usporedba gubitaka prije i poslije dodavanja BESS-a

Ukupni gubici prije dodavanja BESS-a	1226,87 [kWh]
Ukupni gubici poslije dodavanja BESS-a od 10 MWh	1141,32 [kWh]
Ukupni gubici poslije dodavanja BESS-a od 5 MWh	1211,31 [kWh]
Ukupni gubici poslije dodavanja BESS-a od 20 MWh	1066,55 [kWh]

## 9. Zaključak

Dodavanje distribuiranih izvora energije umanjuje utjecaj BESS-a u mreži, međutim svrha BESS-a nije uvijek da smanji gubitke. Distribuirani izvori su dodani da se poboljša stanje u mreži i cilj rada je vidjeti kakav utjecaj može BESS imati u mreži. Optimizacija je dizajnirala BESS s neočekivanim karakteristikama koji je dao očekivane rezultate. Inicijalna ideja rada je bila optimizirati takav BESS koji može iskoristi proizvodnju neupravljivih izvora energije tijekom perioda niske potrošnje, da im može pomoći tijekom visoke potrošnje. Taj cilj je postignut i BESS je učinio distributivnu mrežu i distribuirane izvore učinkovitijima.

Pitanje je li postavljanje takvog BESS-a u istu mrežu isplativo je posve drugačije pitanje. Treba uzeti u obzir dugogodišnje gubitke i napraviti obračun i vidjeti je li isplativo iz te perspektive. Također treba uzeti u obzir druge investicije koje mogu poboljšati stanje mreže i usporediti prednosti, nedostatke i isplativost s BESS-om. Vrlo vjerojatno BESS ovakvih dimenzija nije isplativ u mreži te veličine. Moguće da bi distribuirani izvori na bioplin ili bio masu bili isplativiji jer imaju mogućnost skladištenja goriva za razliku od vjetroelektrana i fotonaponskih elektrana.

Tehnologija baterija korištenih u BESS-u imaju velik utjecaj na investicije. Olovno-kiselinske baterije su jeftinije ali se ne bi mogle koristiti u ovakvoj situaciji. Zbog sporog punjenja ne bi se stigle napuniti u nekoliko sati do razine da mogu smanjiti vršna opterećena. Li-ion ili NaS baterije bi bile bolji kandidati, ali imaju veće investicijske troškove.

Alati odnosno programi korišteni u radu su veoma potentni s obzirom da su besplatni, što čini ideju pametne mreže stvarnijom. Dodavanjem još funkcija cilja, kao cijena baterija, može se vidjeti koja bi tehnologija bila najisplativija sve dok BESS ima pozitivan utjecaj na mrežu. Korištenjem BESS-a nazivnog kapaciteta 5 MWh postiglo je tražene rezultate u pogledu vršnih opterećenja i učinkovitosti, što smanjuje troškove i dovodi do pitanja: koliki kapacitet BESS-a je dovoljno velik da se postignu slični rezultati?

## Literatura

- [1] K.C. Divya, Jacob Østergaard: Battery energy storage technology for power systems—An overview - Electric Power Systems Research 79 (2009) 511–520
- [2] W. El-Khattam, M.M.A. Salama: Distributed generation technologies, definitions and benefits - Electric Power Systems Research 71 (2004) 119–128
- [3] Dr. sc. Nijaz Dizdarević, Dr. sc. Mislav Majstrovic, Dr. sc. Srđan Žutobradić: Distribuirana proizvodnja električne energije – Zagreb
- [4] Thomas Weise: Global Optimization Algorithms – Theory and Application – Version: 2009-06-26
- [5] [http://www.zemris.fer.hr/~golub/ga/studenti/2014\\_rep/Pregled\\_evolutionarnih\\_algoritama.html](http://www.zemris.fer.hr/~golub/ga/studenti/2014_rep/Pregled_evolutionarnih_algoritama.html)
- [6] Lucian Ioan Dulăua, Mihail Abrudeanb, Dorin Bică: Distributed generation technologies and optimization - The 7th International Conference Interdisciplinarity in Engineering (INTER-ENG 2013)
- [7] <https://pdiwan.medium.com/battery-energy-storage-system-eb0e9a57d546>
- [8] Dalibor Buljić, Marinko Barukčić, Željko Špoljarić, Krešimir Miklošević: Pregled tehnologija baterijskih skladišta energije u električnim mrežama - 26. Međunarodni znanstveno-stručni skup „Organizacija i tehnologija održavanja “- OTO 2017. - Zbornik radova
- [9] Daniel Kosić: Sustavi pohrane električne energije – Diplomski rad ()
- [10] International Electrotechnical Commission – IEC "Electrical Energy Storage", 2011. (u onom diplomskom radu pod 3)
- [11] Ami Joseph, Mohammad Shahidehpour: Battery storage systems in electric power systems - ECE Department Illinois Institute of Technology Chicago, Illinois, USA
- [12] Grupa autora "Renewable Energy Focus Handbook" Elsevier Inc. 2009. (spada pod 5 u drugom diplomskom)
- [13] [https://en.wikipedia.org/wiki/Compressed-air\\_energy\\_storage](https://en.wikipedia.org/wiki/Compressed-air_energy_storage)
- [14] <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/supercapacitor-vs-battery-ultracapacitor-pros-and-cons>
- [15] Darko Grundler: Evolucijski algoritmi (I), Pobude i načela - Sveučilište u Zagrebu, Tekstilno tehnološki fakultet, Zagreb, 2001. ()

- [16] Dražen Bajer: Unaprjeđena algoritma diferencijalne evolucije podešavanjem parametara i izborom početne populacije – Disertacija (20.2.2021)
- [17] Thomas Ackermann, Goran Andersson, Lennart Soder: Distributed generation: a definition - Electric Power Systems Research 57 (2001) 195–204
- [18] dr. sc. Ljubomir Majdandžić, Nikola Vištica, dipl. Ing: DISTRIBUIRANA PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE FOTONAPONSKIM SUSTAVOM - Hrvatska stručna udruga za Sunčevu energiju
- [19] [https://en.wikipedia.org/wiki/Distributed\\_generation](https://en.wikipedia.org/wiki/Distributed_generation)
- [20] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Distribuirana\\_proizvodnja\\_elektri%C4%8Dne\\_energije](https://hr.wikipedia.org/wiki/Distribuirana_proizvodnja_elektri%C4%8Dne_energije)
- [21] [https://en.wikipedia.org/wiki/Primary\\_cell](https://en.wikipedia.org/wiki/Primary_cell)
- [22] <https://cdn1.byjus.com/wp-content/uploads/2018/11/chemistry/2018/08/31105707/difference-between-primary-cell-and-secondary-cell.png>
- [23] [https://en.wikipedia.org/wiki/Zinc-carbon\\_battery](https://en.wikipedia.org/wiki/Zinc-carbon_battery)
- [24] <http://www.vidipedija.com/index.php?title=Baterija>
- [25] [https://en.wikipedia.org/wiki/Electrochemical\\_cell](https://en.wikipedia.org/wiki/Electrochemical_cell)
- [26] Andreas Oberhofer: Energy Storage Technologies & Their Role in Renewable Integration... DOVRSITI
- [27] Geoffrey J. May, Alistair Davidson, Boris Monahov: Lead batteries for utility energy storage: A review – Journal of Energy Storage, Volume 15, February 2018, Pages 145-157
- [28] <https://www.hemmings.com/stories/2020/05/19/what-type-of-battery-should-i-choose-how-do-lead-acid-gel-agm-and-other-batteries-compare>
- [29] [https://batteryuniversity.com/learn/article/absorbent\\_glass\\_mat\\_agm](https://batteryuniversity.com/learn/article/absorbent_glass_mat_agm)
- [30] [https://batteryuniversity.com/learn/article/bu\\_201b\\_gel\\_lead\\_acid\\_battery](https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_201b_gel_lead_acid_battery)
- [31] Abbas A. Akhil, Georgianne Huff, Aileen B. Currier, Benjamin C. Kaun, Dan M. Rastler, Stella Bingqing Chen, Andrew L. Cotter, Dale T. Bradshaw, and William D. Gauntlett: DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA
- [32] [https://batteryuniversity.com/learn/article/lead\\_based\\_batteries](https://batteryuniversity.com/learn/article/lead_based_batteries)

[33] <https://link.springer.com/article/10.1007/s10008-018-04174-5> Jakub Lach, Kamil Wróbel, Justyna Wróbel, Piotr Podsadni, Andrzej Czerwiński - Journal of Solid State Electrochemistry volume 23, pages 693–705(2019)

[34] [https://batteryuniversity.com/learn/article/new\\_lead\\_acid\\_systems](https://batteryuniversity.com/learn/article/new_lead_acid_systems)

[35] Dongjiang Li, Dmitri L. Danilov, Henk Jank Bergveld, Rüdiger-A. Eichel, Peter H. L. Notten: Understand Battery Aging Mechanisms - Forschungszentrum Jülich (IEK-9), D-52425 Jülich, Germany; b Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 5600 MB, The Netherlands; c NXP Semiconductors, 5600 KA Eindhoven, The Netherlands; d RWTH Aachen University, D-52074 Aachen, Germany; e University of Technology Sydney, Broadway, Sydney, NSW 2007, Australia – Chapter 9

[37] izv.prof.dr.sc. Danijel Topić: Kolegij DEB 2-05 Obnovljivi izvori energije – Predavanja 4.0 Vjetroelektrane

[38] <https://frederickgreenchallenge.org/pages/handbooks/rs-handbook/chapter6>

[39] prof.dr.sc. Damir Šljivac: Kolegij DEB 2-05 Obnovljivi izvori energije – Predavanja 2.0 Fotonaponski sustavi

[40] The Open Distribution System Simulator™ (OpenDSS) – Reference guide: Roger C. Dugan, Davis Montenegro, Andrea Ballanti (contributor, 2016.) – Electric Power Research Institute, Inc. June 2020

[41] [https://www.researchgate.net/figure/IEEE-13-node-test-feeder\\_fig1\\_261343495](https://www.researchgate.net/figure/IEEE-13-node-test-feeder_fig1_261343495)

[42] Vlastite slike

[43] <https://en.wikipedia.org/wiki/SciPy>

[44] <https://dss-extensions.org/OpenDSSDirect.py/index.html>

[45] Marinko Barukčić, Željko Hederić, Krešimir Miklošević - Multi Objective Optimization of Energy Production of Distributed Generation in Distribution Feeder: ENERGYCON 2014 • May 13-16, 2014 • Dubrovnik, Croatia

[46] [https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.differential\\_evolution.html#scipy.optimize.differential\\_evolution](https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.differential_evolution.html#scipy.optimize.differential_evolution)

[47] [https://batteryuniversity.com/learn/article/bu\\_216\\_summary\\_table\\_of\\_lithium\\_based\\_batteries](https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_216_summary_table_of_lithium_based_batteries)

[48] Wenhua H. Zhu, Ying Zhu, Zenda Davis, Bruce J. Tatarchuk – Energy efficiency and capacity retention of Ni-MH batteries for storage applications – Applied Energy, June 2013, Pages 307-313

[49] <https://www.epectec.com/batteries/cell-comparison.html>

[50] Marinko Barukčić, Srete Nikolovski, Željko Hederić: Estimation of Power Losses on Radial Feeder Using Minimum Electrical Measurements and Differential Evolution Method - International Journal of Soft Computing And Software Engineering (JSCSE) e-ISSN: 2251-7545 Vol.2, No.4, 2012

[51] C.K.Farhana, K.M. Nor, Dalila Mat Said, Fatimah Salim: Impact study of practical harmonic data using time series simulation - Conference: Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2012 IEEE 15th International Conference on - June 2012



## Popis slika

Slika 2.1: Jednostavan presjek vjetroagregata [38]

Slika 2.2: Prikaz FN ćelije, modula i niza [39]

Slika 3.1: Krivulja potražnje energije u danu [11]

Slika 3.2: Podjela sustava za pohranu električne energije po obliku energije u koje se električna energije pretvori [10]

Slika 3.3: princip rada reverzibilne hidroelektrane [10]

Slika 3.4: Sustav za skladištenje energije komprimiranim zrakom [10]

Slika 3.5: Presjek zamašnjaka [10]

Slika 4.1: Načelo rada sekundarne baterije [22]

Slika 4.2: Shema sustava za baterijsko spremište energije

Slika 4.3: Unutrašnjost olovno-kiselinske baterije [26]

Slika 4.4: Presjek AGM akumulatora [33]

Slika 4.5: Dodatak ugljika u olovno-kiselinsku bateriju [34]

Slika 4.6: Oblici Li-ion baterija [35]

Slika 4.7: Presjek NaS baterije i modula [9]

Slika 4.8: Tipična redoks protočna baterija [9]

Slika 5.1: Podjela inteligentnih algoritama [15]

Slika 5.2: Iteracijska petlja evolucijskog algoritma [15]

Slika 5.3: Pojednostavljen ciklus evolucijskog algoritma [4]

Slika 5.4: Način rada diferencijalne evolucije [16]

Slika 5.5: Glavna petlja algoritma DE [16]

Slika 5.6: Dijagram toka DE u Python-u s OpenDSS-om

Slika 7.1: 13Bus distributivna mreža [51]

Slika 8.1: Sučelje Spyder-a [42]

Slika 8.2: Gubici snage u mreži za svaki sat

Slika 8.3: Krivulja rada trošila L1

Slika 8.4: Krivulja rada trošila L2

Slika 8.5: Gubici snage u mreži s BESS-om

Slika 8.6: Gubici snage bez i s BESS-a

Slika 8.7: Krivulja uskladištene energije BESS-a

Slika 8.8: Krivulja punjenja i pražnjenja BESS-a

Slika 8.9: Naponski profil mreže

Slika 8.10: Gubici snage u mreži s BESS-om kapaciteta 5 MWh

Slika 8.11: Krivulja uskladištene energije BESS-a kapaciteta 5 MWh

Slika 8.12: Krivulja punjenja i pražnjenja BESS-a kapaciteta 5 MWh

Slika 8.13: Gubici snage u mreži s BESS-om kapaciteta 20 MWh

Slika 8.14: Krivulja uskladištene energije BESS-a kapaciteta 20 MWh

Slika 8.15: Krivulja punjenja i pražnjenja BESS-a kapaciteta 20 MWh

## **Popis tablica**

Tablica 2.1: Performansa različitih vrsta solarnih ćelija [6]

Tablica 4.1: Razlika primarnih i sekundarnih baterija

Tablica 4.2: Sažetak najkorištenijih litij-ionskih baterija [47]

Tablica 7.1: Lokacija i veličina distribuiranih izvora

Tablica 8.1: Rješenja optimizacije

Tablica 8.2: Minimalni i maksimalni naponi u mreži za oba slučaja

Tablica 8.3: Usporedba gubitaka prije i poslije dodavanja BESS-a

## SAŽETAK

U radu je opisan proces optimizacije baterijskog spremišta energija u nesimetričnog distributivnoj mreži s dva neupravljiva distribuirana izvora energija pomoću dva programa, OpenDSS i Python. Python je korišten za optimizaciju, dok je OpenDSS korišten za stvaranje virtualne distributivne mreže i kao alat za proračune. U Python-u je korištena diferencijalna evolucija, evolucijska strategija s ciljem traženja globalnog minimuma. Funkcija čiji se globalni minimum tražio su ukupni gubici u periodu od jednog dana s intervalima po jedan sat. Postignuti su niži gubici u mreži, ali bitniji rezultat je postignut u obliku učinkovitije distributivne mreže s obzirom da je naponski profil te mreže unutar granica zadanih normom.

**Ključne riječi: OpenDSS, Python, diferencijalna evolucija, optimizacija, distributivna mreža**

## ABSTRACT

The paper describes the process of optimizing a battery energy storage in a asymmetric distribution network with two uncontrolled distribution energy sources using two programs, OpenDSS and Python. Python was used for optimization, while OpenDSS was used to create a virtual distribution network and as a tool for calculating. In Python, differential evolution was used, an evolutionary strategy with an objective to find global minimum. The function whose global minimum was sought after were total system losses over a period of one day with intervals of one hour. Lower losses in network were achieved, but a more significant result was achieved in the form of more efficient distribution network, considering that the voltage profile of that network was within the limits of set norm.

**Key words: OpenDSS, Python, differential evolution, optimization, distribution network**

## **ŽIVOTOPIS**

Matija Kereta rođen je u Osijeku 17. Kolovoza 1993. godine. U razdoblju od 2001. – 2008. pohađa Osnovnu školu “Ivan Filipović u Osijeku gdje je stekao osnovnoškolsko znanje. Srednješkolosko obrazovanje je stekao u Elektrotehničkoj i prometnoj školi u Osijeku u razdoblju od 2008. – 2012. godine. 2012. upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, smjer Elektrotehnika. Od 2018. pohađa diplomski studij, smjer Održiva elektroenergetika.

## PRILOG I – Python kod korišten za optimizaciju

```
import time
import scipy
from scipy.optimize import differential_evolution as DE
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import opendssdirect as dss
from opendssdirect.utils import run_command

#Pokretanje mreze iz OpenDSS-a
run_command(r'redirect "D:\IEEE13NodecktPokus4.dss"')

#Stvaranje dva distribuirana izvora
dss.run_command ('New Generator.Gen634 Bus1=634.1.2.3 phases=3 kv=4.16 kw=200
kvar=65 Model=1')
dss.run_command ('New Generator.Gen675 Bus1=675.1.2.3 phases=3 kv=4.16 kw=150
kvar=50 Model=1')

dss.Text.Command('Storage.BES1.enabled=False')

### Brisanje Busa, gubici, izlazna snaga

fzL = []
busNM = dss.Circuit.AllBusNames()
del busNM[4]
for nm in busNM:
    dss.Circuit.SetActiveBus(nm)
    fz = dss.Bus.Nodes()
    fzL.append(fz)

ElossH = [] # Gubici u danu, ali podjeljeni po satu
```

```

PlossH = [] # Gubici snage u mrezi, svaki sat
PbessH = [] # Izlazna snaga BES-a po svakom satu.
dss.Text.Command('Set Number=1') # postavljanje da uzima jedan uzorak, prvi.
for i in range(24):
    dss.Text.Command('reset') # resetiranje registara Energymeters i Meters
    dss.Solution.Solve()
    Ploss = dss.Circuit.Losses()[0]/1000
    dss.Circuit.SetActiveElement('Storage.BES1') #Potrebno za sljedeci korak
dss.CktElement.Powers() da opendss zna koji element u krugu treba aktivirat da
izvuce podatke na ovaj nacin.
    Pbess = dss.CktElement.Powers() #trofazna izlazna snaga baterijskog spremista
    PbessH.append(Pbess[0] + Pbess[2] + Pbess[4]) #dobije se 6 vrijednosti, tri su
pozitivne po fazi.
    # print(dss.Meters.RegisterNames())
    ElossH.append(dss.Meters.RegisterValues()[16])
    PlossH.append(Ploss)
    #print('Gubici u zoni su: ' + str(dss.Meters.RegisterValues()[12]))
dss.Text.Command('Set Number=24')
dss.Text.Command('reset')
dss.Solution.Solve()
ElossD = dss.Meters.RegisterValues()[16] #Ukupni gubici energije u danu.
print('Gubici energije po danu, bez baterije, su: ', ElossD, ' kWh')

dss.Text.Command('Transformer.Reg1.tap=1')
dss.Text.Command('Transformer.Reg2.tap=1')
dss.Text.Command('Transformer.Reg3.tap=1')
dss.Text.Command('Storage.BES1.%stored=40')
dss.Solution.DblHour(0)

EstorE = []
dss.Text.Command('Set Number=1')
for e in range (24):
    dss.Text.Command('reset')
    dss.Solution.Solve()
    EstorE.append (dss.CktElement.AllVariableValues()[0])
dss.Text.Command('Set Number=24')
dss.Text.Command('reset')
dss.Solution.Solve()

dss.Text.Command('Storage.BES1.enabled=True')
dss.Text.Command('Transformer.Reg1.tap=1')
dss.Text.Command('Transformer.Reg2.tap=1')
dss.Text.Command('Transformer.Reg3.tap=1')

```

```

dss.Text.Command('Storage.BES1.%stored=40')
dss.Solution.DblHour(0)
#dss.ActiveCircuit.Solution.dblHour = 0

### Funkcija i optimizacija

start = time.time()
Pb1 = 1000
Pbu = 7000
gran = (24*[(-1.0,1.0)])
gran.append((Pb1, Pbu))
gran.append((0, len(busNM)-1))

def fc(a):
    dss.Text.Command('reset') # resetiranje registara Energymeters i Meters

    xLSb = a[:24] #A colon on the left side of an index means everything before,
but not including, the index.
    BESSkW=a[-2]
    BESSlok=a[-1]

    nrdb = 'Edit LoadShape.BL1 Pmult=('
    for i in xLSb:
        nrdb += ' ' + str(i)
    nrdb = nrdb + ' )'
    dss.run_command (nrdb)

    kmd = 'Edit Storage.BES1 kWrated=' + str(BESSkW)
    # kmd = 'Edit Storage.BES1 kWhstored='+ str(Wbat) + 'kWrated=' + str(BESSkW)
    # kWhstored='+ str(Wbat) +
    dss.run_command (kmd)

    faze = '' #stvaranje praznog stringa pod imenom faze
    for ni in fzl[int(BESSlok)]:
        faze = faze + '.' + str(ni) #Dodavanje faza na lokaciju busa, npr.
632.1.1.2.3
        kmnd = 'Edit Storage.Bes1 Bus1=' + busNM[int(BESSlok)] + faze
        dss.run_command (kmnd)

    iR = dss.RegControls.First()
    while iR:
        dss.RegControls.TapNumber(0)
        iR = dss.RegControls.Next()

```



```

dss.Solution.Solve()

Egub=dss.Meters.RegisterValues()[16]
Bus_Naponi=dss.Circuit.AllBusMagPu()

for ui in Bus_Naponi:
    if (ui < 0.9) or (ui > 1.1):
        #print('Prekoracenje!!!!!!')
        Egub = Egub*20
return Egub

result=DE(fc,gran,strategy='best1bin', maxiter=1000, popsize=150, mutation=(0.6,
1.1), recombination=0.5, polish=True)
stop = time.time()

print('Trajanje optimizacije je: ', stop-start, ' [s]')
print('Optimalna snaga BESSa je: ', result.x[-2], '[kW], a optimalna lokacija je
cvor: ', busNM[int(result.x[-1])])
ElossG = dss.Meters.RegisterValues()[16]
print('Gubici energije po danu, nakon optimizacije, su: ', ElossG, ' kWh')
Naponi = dss.Circuit.AllBusMagPu()

#%Loadshape i stanje baterije

dss.Text.Command('Transformer.Reg1.tap=1')
dss.Text.Command('Transformer.Reg2.tap=1')
dss.Text.Command('Transformer.Reg3.tap=1')
dss.Text.Command('Storage.BES1.%stored=40')
dss.Solution.DblHour(0)

EstorD = []
dss.Text.Command('Set Number=1')
for e in range (24):
    dss.Text.Command('reset')
    dss.Solution.Solve()
    EstorD.append (dss.CktElement.AllVariableValues()[0])
dss.Text.Command('Set Number=24')
dss.Text.Command('reset')
dss.Solution.Solve()

fig, en = plt.subplots()

```

```

sat = np.array([0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18,
19, 20, 21, 22, 23])
krivB = result.x[:24]
w = 0.3
en.bar(sat-w, krivB, w, label='Loadshape BES-a')
en.set_xlabel('[h]')
en.set_ylabel('negativno=punjenje, pozitivno=praznjenje')
en.legend()

```

```

fig, en = plt.subplots()
sat = np.array([0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18,
19, 20, 21, 22, 23])
krivE = EstorE[:24]
w = 0.3
en.bar(sat-w, krivE, w, label='BES1 prije optimizacije')
en.set_xlabel('[h]')
en.set_ylabel('kWh u BES')
en.legend()

```

```

fig, en = plt.subplots()
sat = np.array([0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18,
19, 20, 21, 22, 23])
krivE = EstorD[:24]
w = 0.3
en.bar(sat-w, krivE, w, label='BES1 poslije optimizacije')
en.set_xlabel('[h]')
en.set_ylabel('kWh u BES')
en.legend()

```

```

###

```

```

dss.Text.Command('Transformer.Reg1.tap=1')
dss.Text.Command('Transformer.Reg2.tap=1')
dss.Text.Command('Transformer.Reg3.tap=1')
dss.Text.Command('Storage.BES1.%stored=40')
dss.Solution.DblHour(0)

```

```

ElossP = [] # Gubici u danu, ali podjeljeni po satu
PlossP = [] # Gubici snage u mrezi, svaki sat
PbessP = [] # Izlazna snaga BES-a po svakom satu.
dss.Text.Command('Set Number=1') # postavljanje da uzima jedan uzorak, prvi.
for i in range(24):
    dss.Text.Command('reset') # resetiranje registara Energymeters i Meters

```

```

dss.Solution.Solve()
PlossL = dss.Circuit.Losses()[0]/1000
dss.Circuit.SetActiveElement('Storage.BES1') #Potrebno za sljedeci korak
dss.CktElement.Powers() da opendss zna koji element u krugu treba aktivirat da
izvuce podatke na ovaj nacin.
    PbessI = dss.CktElement.Powers() #trofazna izlazna snaga baterijskog spremista
    PbessP.append(PbessI[0] + PbessI[2] + PbessI[4]) #dobije se 6 vrijednosti, tri
su pozitivne po fazi.
    # print(dss.Meters.RegisterNames())
    ElossP.append(dss.Meters.RegisterValues()[16])
    PlossP.append(PlossL)
    #print('Gubici u zoni su: ' + str(dss.Meters.RegisterValues()[12]))
dss.Text.Command('Set Number=24')
dss.Text.Command('reset')
dss.Solution.Solve()
ElossDP = dss.Meters.RegisterValues()[16] #Ukupni gubici energije u danu.
print('Gubici energije nakon opt po danu su: ', ElossDP, ' kWh')

dss.Text.Command('Transformer.Reg1.tap=1')
dss.Text.Command('Transformer.Reg2.tap=1')
dss.Text.Command('Transformer.Reg3.tap=1')
dss.Text.Command('Storage.BES1.%stored=40')
dss.Solution.DblHour(0)

labels = ['0', '1', '2', '3', '4', '5', '6', '7', '8', '9', '10', '11', '12', '13',
'14', '15', '16', '17', '18', '19', '20', '21', '22', '23']
x = np.arange(len(labels)) # the label locations
width = 0.35 # the width of the bars

fig, ax = plt.subplots()
rects1 = ax.bar(x - width/2, PlossH, width, label='Gubici snage u mreži bez
baterije')
rects2 = ax.bar(x + width/2, PlossP, width, label='Gubici snage u mreži s
baterijom')
ax.set_ylabel('Snaga u kW')
ax.set_title('Usporedba gubitaka snaga prije i poslije optimizacije')
ax.set_xticks(x)
ax.set_xticklabels(labels)
ax.legend()

ax.bar_label(rects1, padding=3)
ax.bar_label(rects2, padding=3)
fig.tight_layout()

```

```
plt.show()
```