

# Uloga spremnika električne energije u naprednim elektroenergetskim mrežama

---

Vincelj, Nikola

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:197287>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-25**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište  
Sjever**

**Završni rad br. 481/EL/2021**

**Uloga spremnika električne energije u naprednim  
elektroenergetskim mrežama**

**Nikola Vincelj, 2773/336**

Varaždin, lipanj 2021. godine



# Sveučilište Sjever

Odjel za elektrotehniku

Završni rad br. 481/EL/2021

## Uloga spremnika električne energije u naprednim elektroenergetskim mrežama

**Student**

Nikola Vincelj, 2773/336

**Mentor**

izv. prof. dr. sc. Srđan Skok

Varaždin, lipanj 2021. godine

## **Predgovor**

Nakon tri godine iskustva, radosti i učenja došao je kraj mog preddiplomskog puta na odjelu elektrotehnike. U dosadašnjem dijelu studiranja susreo sam nove prijatelje, profesore te doživio novi način pogleda na svijet elektrotehnike. Htio bih se zahvaliti najprije izv. prof. dr. sc. Srđanu Skoku na prijateljskom odnosu, na svestranoj pomoći i odličnom odnosu za vrijeme pisanja ovog rada. Posebna zahvala ide mojoj obitelji i djevojci bez kojih ovo ne bi bilo moguće. Zahvaljujem im se na ljubavi, podršci i na motivaciji koju su mi davali u trenucima kada je bilo najteže. Na kraju se zahvaljujem profesorima i kolegama na Sveučilištu Sjever koji su mi prenijeli svaki svoj dio znanja te tako doprinijeli pisanju ovog rada.

## **Sažetak**

U ovom završnom radu obrađena je tematika spremnika električne energije, prvenstveno baterijskih spremnika, te je razrađena metodologija priključka i djelovanja istih u elektroenergetskom sustavu. Naime, baterijski spremnici energije sve se više koriste u elektroenergetskom sustavu pa sam iz tog razloga opisao primjenu, podjelu te prikazao način korištenja iste u zagrebačkom prstenu u slučaju da jedan dio mreže, odnosno proizvodnje ispadne iz rada.

**KLJUČNE RIJEČI:** spremnici električne energije, baterijski spremnici, analiza EES-a, Modeliranje EES-a

In this graduation thesis, the topic of electricity tanks, primarily battery tanks, is discussed, and the methodology of their connection and operation in the power system is elaborated. Namely, battery energy tanks are increasingly used in the power system, so for that reason I described the application, division and showed how to use them in the Zagreb ring in case one part of the network or production falls out of work.

**KEYWORDS:** electricity storage, battery storage, power system analysis, power system modeling

# Prijava završnog rada

## Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za elektrotehniku

STUDIJ preddiplomski stručni studij Elektrotehnika

PRISTUPNIK Nikola Vincelj

MATIČNI BROJ 2773/336

DATUM 14.06.2021

KOLEGIJ Razvod električne energije

NASLOV RADA Uloga spremnika električne energije u naprednim elektroenergetskim mrežama

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Role of Energy Storage in Smart Grid

MENTOR Srđan Skok

ZVANJE Izvanredni profesor

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. Izv.prof.dr.sc. Srđan Skok
2. Doc.dr.sc. Ladislav Havaš
3. Doc.dr.sc. Dunja Srpak
4. mr.sc. Ivan Šumiga, viši predavač
- 5.

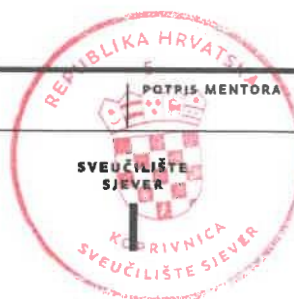
## Zadatak završnog rada

BROJ 481/EL/2021

OPIS

Visoki udio intermitentnih obnovljivih izvora u ukupnoj proizvodnji električne energije uzrokuje nestabilnosti u elektroenergetskoj mreži koja se očituje u narušenim naponskim prilikama, smanjenoj inerciji sustava, a time i sve češćim i izraženijim dinamičkim poremećajima. Stoga se kao jedno od rješenja nameće integracija spremnika električne energije kao pružatelja pomoćnih usluga u vođenju elektroenergetskog sustava. U završnom radu potrebno je obraditi poremećena pogonska stanja elektroenergetskog sustava uzrokovana integracijom intermitentnih obnovljivih izvora, te vrste i načine pohrane električne energije. Posebnu pažnju treba obratiti na baterijske spremnike električne energije i njihove karakteristike. U radu je potrebno provesti simulaciju rada baterijskog spremnika energije na prijenosnom elektroenergetskom sustavu s naglaskom na ublažavanje nastalih poremećaja.

ZADATAK URUČEN 14.06.2021



## Popis korištenih kratica

|                 |   |
|-----------------|---|
| <b>AC-DC</b>    | Izmjenična struja - istosmjerna struja  |
| <b>AGM</b>      | Zatvorene olovne baterije s<br>apsorbiranim elektrolitom<br>( <i>engl. AGM – Absorptive<br/>Glass Mat Recombination<br/>Batteries</i> ) |
| <b>HEP</b>      | Hrvatska elektroprivreda  |
| <b>HEP ODS</b>  | Hrvatska elektroprivreda operator<br>distribucijskog sustava  |
| <b>Li – ion</b> | oznaka za litij – ionsku bateriju   |
| <b>NaS</b>      | oznaka za natrij – sumpor bateriju  |
| <b>Ni – Cd</b>  | Nikal – kadmijaska baterija   |
| <b>OIE</b>      | Obnovljivi izvori energije  |
| <b>RH</b>       | Republika Hrvatska  |
| <b>RHE</b>      | Reverzibilna hidroelektrana   |
| <b>VRB</b>      | oznaka za vandij – redoks bateriju  |
| <b>VRLA</b>     | <i>engl. Valve Regulated Lead – Acid</i><br>(ventilom regulirana olovna<br>baterija)  |

## Sadržaj

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 1.     | Uvod.....   | 1  |
| 2.     | Potrebe za pohranom električne energije .....   | 3  |
| 2.1.   | Vremensko razdvajanje .....   | 4  |
| 2.2.   | Održavanje napona .....   | 5  |
| 2.3.   | Regulacija.....   | 5  |
| 2.4.   | Regulacija frekvencije.....   | 6  |
| 2.5.   | Kvaliteta električne energije.....  | 8  |
| 2.6.   | Rotirajuća, nerotirajuća i dodatna rezerva.....   | 9  |
| 3.     | Oblici pohrane električne energije .....  | 10 |
| 3.1.   | Reverzibilna hidroelektrana .....   | 10 |
| 3.2.   | Pohrana tehnologijom komprimiranog zraka.....   | 12 |
| 3.3.   | Pohrana energije upotrebom zamašnjaka .....   | 13 |
| 3.4.   | Baterije .....  | 14 |
| 3.4.1. | Povijest.....   | 15 |
| 3.4.2. | Olovne baterije (VRLA).....   | 16 |
| 3.4.3. | Zatvorene olovne baterije s apsorbiranim elektrolitom.....  | 17 |
| 3.4.4. | Ni-Cd baterije .....  | 18 |
| 3.4.5. | Natrij sumpor baterija.....   | 19 |
| 3.4.6. | Li – ion baterija .....   | 22 |
| 3.4.7. | Natrij – nikal – klorid baterije (zebra).....   | 24 |
| 3.4.8. | Vanadij – redoks baterije (VRB).....  | 25 |
| 3.4.9. | Cink – brom (Zn - Br) .....   | 26 |
| 3.5.   | Održavanje baterija .....   | 27 |
| 4.     | Baterijski spremnici .....  | 29 |
| 4.1.   | Zanimljivosti .....   | 30 |
| 4.2.   | Shematski prikaz .....  | 31 |
| 4.3.   | Opis dijelova .....   | 32 |
| 5.     | Simulacija rada baterijskih spremnika u elektroenergetskom sustavu .....                              | 33 |
| 5.1.   | Opis programskog paketa za simulaciju rada elektroenergetskog sustava.....                            | 33 |
| 5.2.   | Analiza rada baterijskog spremnika u dijelu prijenosne mreže grada Zagreba.....                       | 35 |
| 5.3.   | Podaci dijela elektroenergetskog sustava .....  | 37 |
| 5.4.   | Podaci baterijskog spremnika i izmjenjivača .....   | 38 |
| 5.5.   | Simulacija s uključenom aktivnom mrežom bez priključene baterije (nazivno pogonsko stanje) .....      | 40 |
| 5.6.   | Simulacija s isključenom aktivnom mrežom sa priključenom baterijom (izvanredno pogonsko stanje) ..... | 44 |
| 6.     | Zaključak.....  | 48 |
| 7.     | Literatura.....   | 49 |
|        | Popis slika .....   | 52 |
|        | Popis tablica.....  | 54 |

# 1. Uvod

Od kada su se u svijetu počeli primjenjivati sve veći broj obnovljivih izvora energije (OIE), moralo se i započeti s analizom njihovog rada u elektroenergetskom sustavu. Zadnjih 10 godina u Republici Hrvatskoj (RH) počinje se graditi sve više elektrana iz područja OIE. Ulaskom RH u Europsku uniju (EU) 2013. godine pa na dalje počinje povećano ulaganje u OIE posebice u solarne i vjetroelektrane. Za HEP – Operatora distribucijskog sustava d.o.o. (HEP ODS) to predstavlja dodatan zahtjev da regulira isto. To znači da mora unutar svoje mreže postaviti dodatnu opremu kako bi pratio rad tih istih izvora energije, upravljao istim, te na kraju održavao isti unutar svog distribucijskog sustava.

U RH se sve više prati da li se u kojim područjima isplati ulagati u OIE. Naime, u turističkoj zemlji kao što je RH postavlja se pitanje gdje će se postaviti isti. U tom slučaju imamo različite vremenske periode u godini kada prevladavaju razdoblja visokih opterećenja u elektroenergetskom sustavu, a ponajviše u ljetnim mjesecima kada velik broj turista boravi na Jadranskoj obali.

Baterijski spremnici se najviše uvode kako bi se umanjile nepravilnosti proizvodnje električne energije iz vjetra ili sunca, kod odgađanje isporuke energije u mrežu, kod povećanja energetske učinkovitosti tj. smanjenje vršnog opterećenja, kod osiguravanja besprekidnog napajanja itd. [3]

Svrha ovog rada je da se opišu svi dijelovi koji se nalaze unutar jednog baterijskog spremnika, da se prikažu eventualni problemi koji mogu nastati te da se navedu eventualni nedostaci i prednosti istoga. Prikazan će biti i dio u kojem se jedan takav sustav prikazuje u programskom okruženju NEPLAN pomoću kojeg će se izvršiti analiza.

O daljnjoj upotrebi izvan područja pisanja ovog rada, velika količina podataka za daljnje informacije o sustavu može se pronaći u pisanim literaturama te u literaturama objavljenim na internetskim stranicama uz prethodni unos ključnih riječi.

Zadatak završnog rada jest objasniti dijelove te princip rada baterijskog spremnika. Pored toga potrebno je napraviti pregled svih vrsta baterija koje se koriste u svrhu pohrane električne energije te razloge zbog koje se ona skladišti te na koje sve načine. Potrebno je nabrojati nedostatke i prednosti koje takav sustav treba koristiti u sustavima upravljanja te tako odabrati odgovarajući spremnik za određene uvijete.



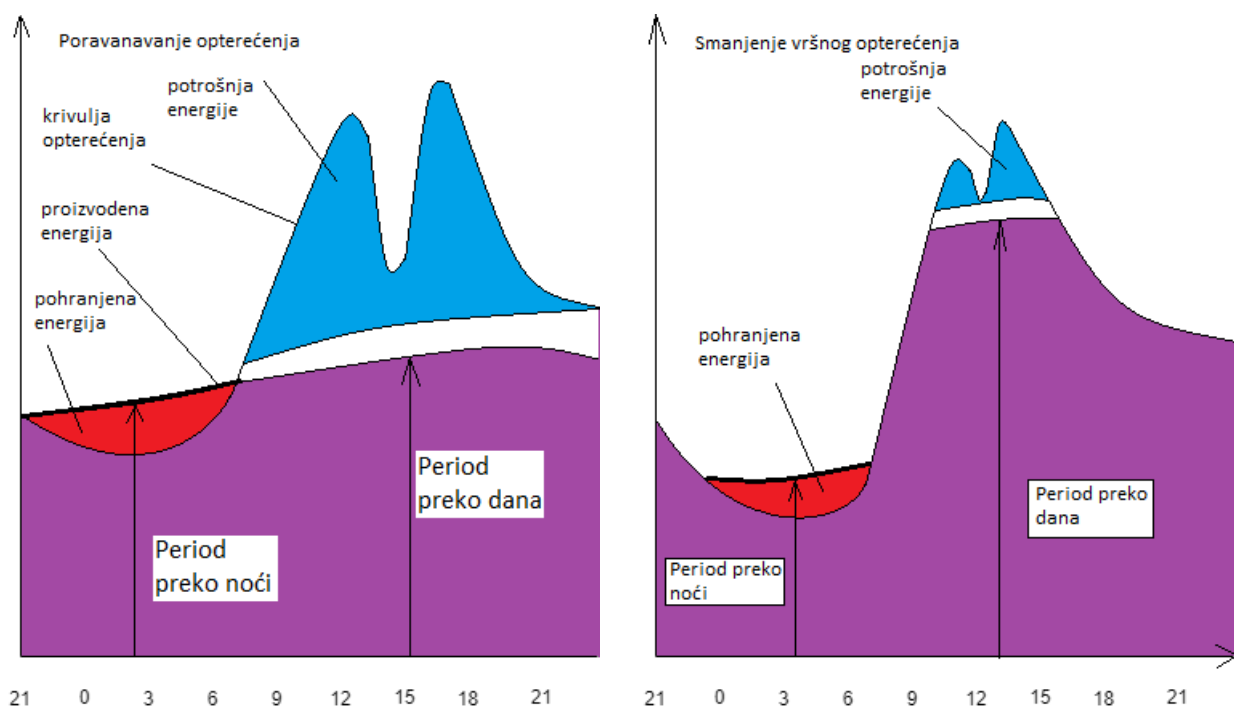
Potrebno je simulirati elektrodistribucijsku mrežu Zagrebačkog prstena te unutar nje postaviti baterijski spremnik koji će biti u funkciji kada pojedini dio mreže ispada. Na taj način treba ukloniti nastale poremećaje u sustavu.

## 2. Potrebe za pohranom električne energije

Električna energija pohranjuje se iz razloga da bi se mogla vremenski pomaknuti proizvodnja iste od same potrošnje kod korisnika. Kod vremenskog razdvajanja princip je temeljen na tome da se omogući sve više priključivanja obnovljivih izvora energije na distribucijsku mrežu. To najviše utječe kod vjetroelektrana jer za njih se nikad ne zna kada će se, a kada neće proizvoditi električna energija jer postoje vremenski periodi kada vjetra nema pa su iz tog razloga vjetroelektrane van procesa proizvodnje. Instaliranjem sve više obnovljivih izvora energije, s naglaskom na vjetroelektranama i solarnim elektranama počelo se sve više sa skladištenjem energije. Problemi se npr. pojavljuju kada tijekom dana imamo veću potrebu za električnom energijom nego noću. Noću većina ljudi spava, ne troši se toliko na kućanstva, ali i dalje su u radu industrije koje rade noćne smjene. Samim porastom standarda, povećanim boravkom ljudi posebice kod turističkih središta na morskim destinacijama, odjednom postaje potreba za jako velikom količinom energije kako bi se moglo opskrbiti čitavo stanovništvo, a dok su npr. u zimskim uvjetima ta mjesta gotova prazna. Zbog toga se sve više koriste obnovljivi izvori energije. S jedne strane oni stvaraju manje zagađenja za okoliš, a s druge strane ne opterećuju se toliko drugi oblici proizvodnje. Tako se ako nema vjetra, a ima dovoljno sunca, energija pohranjuje u spremnike te se koristi kada za to bude potreba. U drugom se pak slučaju može dogoditi da imamo kišno vjetrovito vrijeme koje služi za vjetroelektrane. Tako se rade studije koje procjenjuju određeno područje ili regiju koja zadovoljava uvijete za postavljanje određenih elektrana te se ta energija na pojedine načine pohranjuje koji će biti objašnjeni u nastavku teksta. [1]

## 2.1. Vremensko razdvajanje

Vremensko razdvajanje predstavlja način pohrane električne energije tako da se prati trenutačna cijena električne energije tj. pametno se trguje električnom energijom. Npr. električna energija se koristi tj. kupuje kada je cijena iste niža, a niža je u noćnim satima kada je ona u izobilju tj. postoje „viškovi“ u istoj pa je tada potražnja manja. Tako se ta električna energija koja je jeftinija koristi za punjenje spremnika električne energije, a kasnije se ti spremnici prazne npr. tijekom dana kada je električna energija skuplja. Tako se npr. uloži određeni dio novca u spremnike te se dio investicije vrati investitoru kroz upotrebu te električne energije kroz vremenski period kada je to isplativije od kupnje od strane distributera.



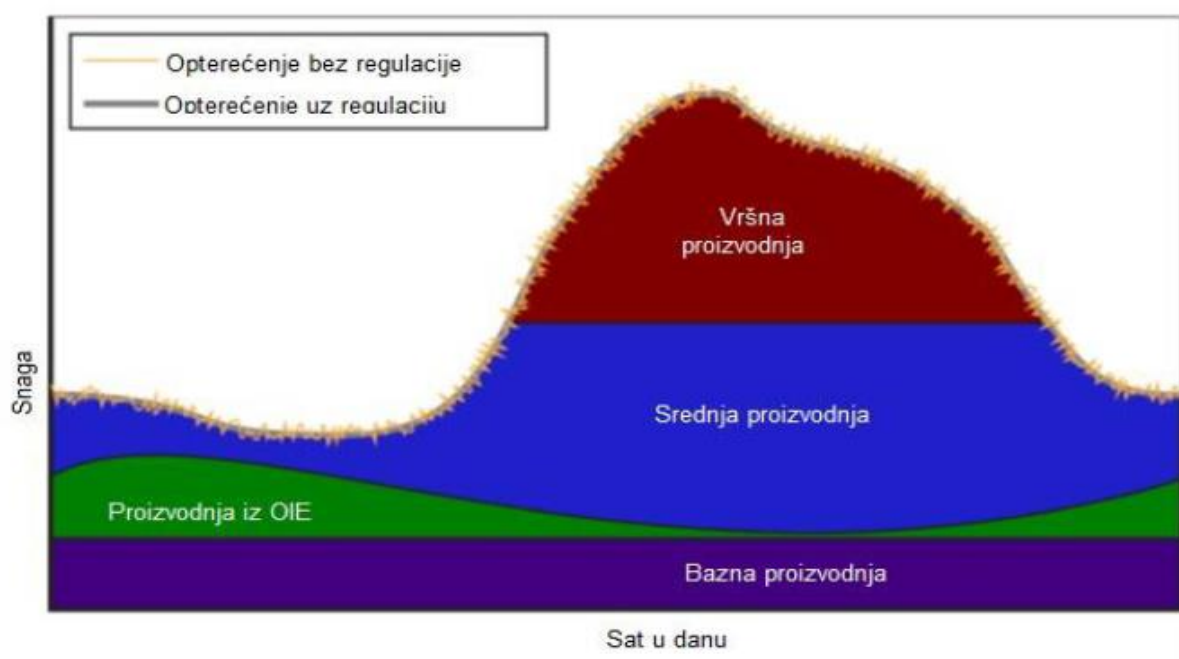
Slika 2.1 Prikaz vremenskog razdvajanja [1]

## 2.2. Održavanje napona

Pod održavanje napona podrazumijeva se da distributer električne energije vrijednost naponske razine drži unutar definiranih granica. To se ostvaruje na način da se prati režim proizvodnje tj. upravlja reaktancijom. Reaktancija je povezana s uređajima koji sudjeluju u proizvodnji te u prijenosu električne energije. Iz toga razloga operator drži napon u određenoj vrijednosti kako bi nadoknadio reaktivne učinke tako da ne bi došlo do nestabilnosti u prijenosnom sustavu. Radi toga se postavljaju spremnici električne energije u mrežu umjesto elektrana koje proizvode jalovu energiju i to na područjima kod velikih opterećenja. Nazivno vrijeme održavanje napona mreže je 30 min. [1]

## 2.3. Regulacija

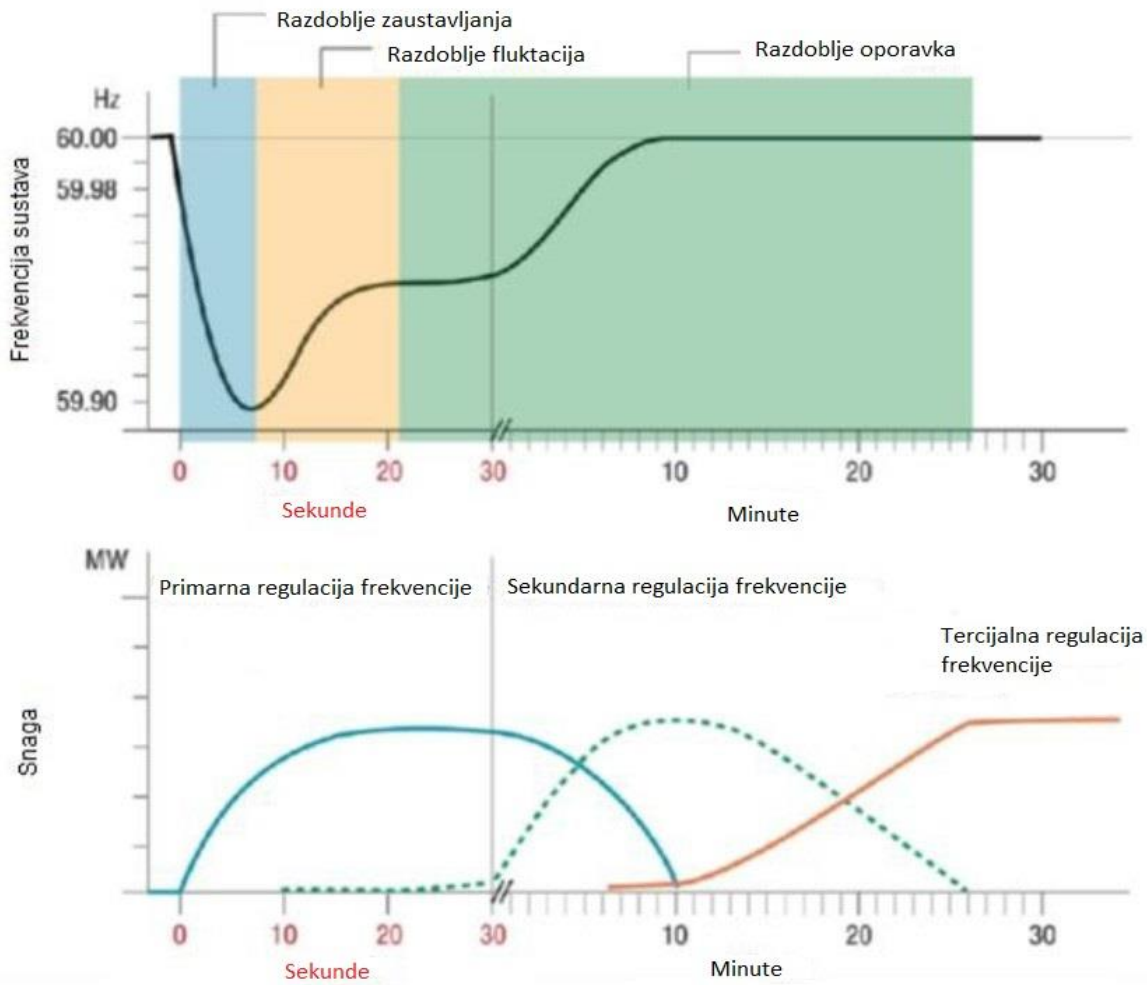
Regulacija je pomoćna usluga pomoću koje se ostvaruje upravljanje s drugim regulacijskim područjima koja su povezana, a baterijski spremnici su se u tom području prikazali jako dobro. Npr. imamo neku elektranu koja je u radu pod srednjim opterećenjem i njezina proizvodnja se može povećati ili smanjiti, pa se stoga takve jedinice koriste za regulaciju te se proizvodnja povećava kada u mreži imamo trenutni manjak proizvodnje koji omogućuje regulaciju. Dok se proizvodnja smanjuje kako bi se regulacija izvršila kada je u mreži ostvaren trenutni višak proizvodnje energije.[2]



Slika 2.2 Prikaz opterećenja sa i bez regulacije [1]

## 2.4. Regulacija frekvencije

Regulacija frekvencije je nešto slično i regulaciji opisanoj u prethodnom poglavlju, ali ova regulacija predstavlja brzo djelovanje. Brzo djelovanje u vremenskim razdobljima reda veličine jedne sekunde te vremena ispod jedne minute. Do poteškoća je došlo kada se dogodi neki izvanredni događaj poput ispada neke elektrane ili do ispada dalekovoda. Prvo što će se dogoditi je da će operater sustava početi s primarnom kontrolom frekvencijom kojim se mijenja izlazna snaga proizvodnih jedinica za povećanje njihove izlazne snage kako što je prikazano na donjoj slici. Nakon toga slijedi trajanje sekundarne regulacije frekvencije koja traje od pola minute pa do nekoliko minuta. Zbog takvog slučajnog pada unutar prijenosnog sustava, stopa učestalosti pada frekvencije nakon takvih događaja, izravno je proporcionalna u odnosu na ukupnu inerciju unutar mreže u tom trenutku. Tu inerciju zajedno određuju rotirajuća rezerva velikih generatora i agregata manje rezerve još manjih generatora. Na gornjem dijelu slike prikazan je kombinirani učinak inercije i djelovanje regulatora koji određuje stopu propadanja frekvencije i oporavaka prikazanog u razdoblju kada je došlo do neželjenog događaja u mreži i razdoblju početka reguliranja frekvencije. Zbog toga su spremnici električne energije u tome slučaju izrazito dobra opcija jer brzo djeluju. [2]



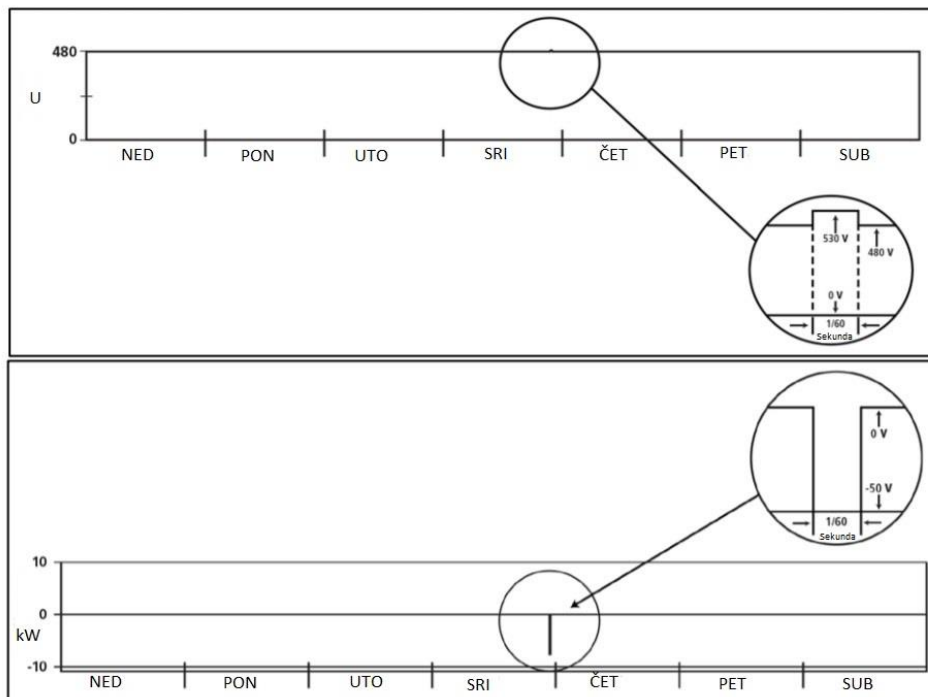
Slika 2.3 Uspostava frekvencije mreže nakon poremećaja [2]

## 2.5. Kvaliteta električne energije

Kvaliteta električne energije podrazumijeva korištenje spremnika tako da zaštiti kupca na strani opterećenja protiv kratkotrajnih događaja koji utječu na kvalitetu isporučene električne energije.

Naznake loše kvalitete električne energije su:

- Odstupanja u amplitudi napona (npr. kratkotrajni padovi i rast napona)
- Odstupanja u frekvenciji od 50 Hz na kojoj se snaga dostavlja
- Niski faktor snage (napon i struja nisu u fazi)
- Prekidi u usluzi opskrbe (bilo koje trajanje prekida)



Slika 2.4 Kvaliteta električne energije

Gornji dio slike prikazuje skok napona za 50 V, a donji dio prikazuje kako spremnik pohranjuje tih 50 V skoka za razliku kada je napon konstantan tj. 480 V. [2]

## 2.6. Rotirajuća, nerotirajuća i dodatna rezerva

Svaki sustav koji je od jake važnosti treba imati svoj rezervni sustav koji će se uključiti u slučaju neke havarije ili nenamjernog ispada. Tako i kod upravljanja električnom mrežom valja imati rezervni kapacitet kada neki dio normalne električne opskrbe postane odjednom nedostupan. Rezerve su u većini slučajeva velike kao i jedan od najvećeg generatorskog sustava. Rezerve stoga predstavljaju od 15 do 20% normalnog električnog kapaciteta.

**Rotirajuća rezerva (sinkronizirana)** – generatorski kapacitet koji je aktivan, ali neopterećen te takav može odgovoriti unutar 10 minuta da kompenzira generatorski ili distribucijski ispad. Rotirajuća rezerva odgovara u roku 10 sekundi te takva može zadržati frekvenciju sustava. Kada se dogodi takav neočekivani ispad ova rezerva se prva koristi.

**Nerotirajuća rezerva (nesinkronizirana)** – generatorski kapacitet koji nije aktivan tj. nije sinkroniziran, ali se svejedno može brzo uključiti, sinkronizirati i opteretiti na trajanje od 10 minuta.

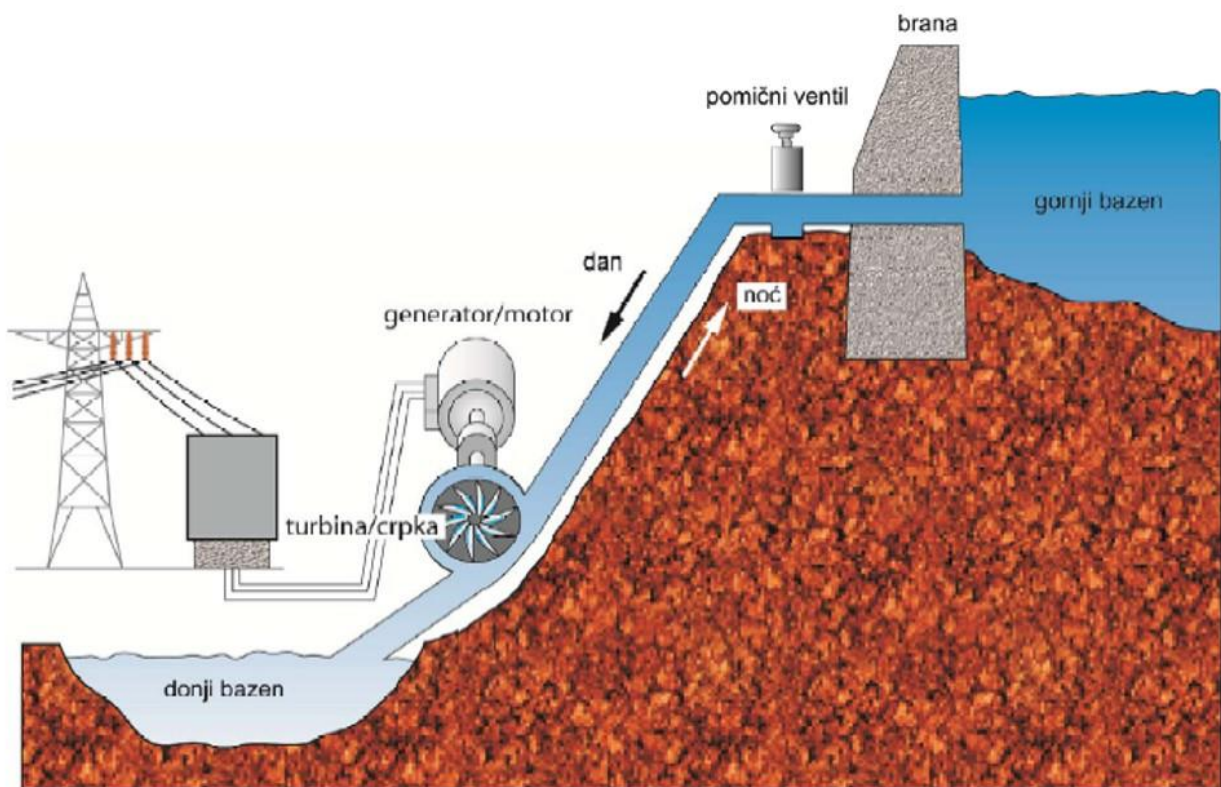
**Dodatna rezerva** – generatori koji mogu započeti proizvodnju električne energije unutar jednog sata. Služi isključivo kao rezerva za rotirajuću i nerotirajuću. Koristi se kada su sve rotirajuće rezerve već u pogonu. Najbitnije je da kapacitet generatora bude uvijek u mreži i na raspolaganju. U ovom slučaju se spremnici električne energije rijetko koriste, ali kada se koriste oni moraju uvijek biti spremni kada je to potrebno. [2]



### 3. Oblici pohrane električne energije

#### 3.1. Reverzibilna hidroelektrana

Reverzibilna hidroelektrana je hidroelektrana koja se razlikuje od konvencionalnih hidroelektrana. Kod reverzibilne hidroelektrane postoje dva spremnika koji skladište vodu. Kod ostalih hidroelektrana voda koja jednom prođe kroz turbinu nastavlja dalje svojim prirodnim tokom dok se kod reverzibilne hidroelektrane voda pumpa iz nižeg spremnika u viši. U razdoblju niske potražnje za električnom energijom, najčešće noću, voda se pumpa iz donjeg spremnika u viši. Kada se potražnja za električnom energijom ponovo poveća, voda se propušta kroz turbinu i na taj način proizvodi električna energija. Prilikom takvoga procesa imamo i gubitke i to uslijed isparavanja akumulirane vode i gubitke usred pretvorbe, približno 70% do 85% električne energije koja se koristi za pumpanje vode u viši spremnik može biti ponovno dobiveno. Ovo je najisplativija tehnologija kod spremanja veće količine električne energije, a o izgradnji takve hidroelektrane ovise i geografski položaj. [14]



Slika 3.1 Reverzibilna hidroelektrana [15]



*Slika 3.2 RHE Velebit [16]*

### 3.2. Pohrana tehnologijom komprimiranog zraka

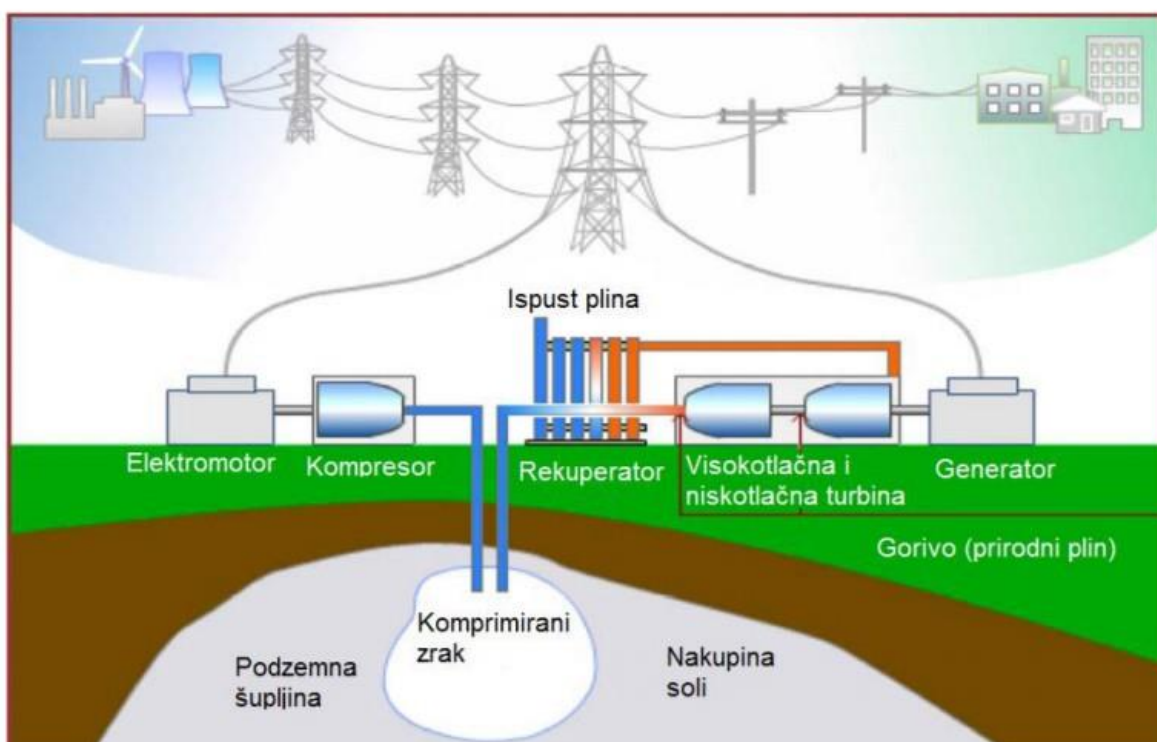
Ova tehnologija predstavlja sličan princip rada kao i kod reverzibilne hidroelektrane u smislu da se energija proizvodi u jednom vremenskom intervalu, a koristi u drugom. To je razdoblje kada je cijena električne energije manje tražena na tržištu te kada je potražnja za njom jako velika.

Uglavnom, kompresija zraka stvara određenu toplinu. Slično je kada doma pomoću ručne pumpe pumpamo nešto također se cijev zagrije. To znači da je zrak nakon kompresije topliji, a za širenje zraka nam je potrebna toplina. Ako se tome toplina ne doda, zrak će nakon širenja biti puno hladniji. S toga se pohrana zraka dijeli na tri načina:

**Adijabatska** – zadržava toplinu dobivenu kompresijom i vraća je u zrak kada je potrebno širenje radi proizvodnje energije

**Dijabatska** – rasipa višak topline pomoću hladnjaka u okoliš kao otpad, nakon što se višak topline ukloni iz spremnika, zrak je potrebno ponovno zagrijati prije širenja u turbini koja pogoni generator, a to se ostvaruje preko plamenika na prirodni plin

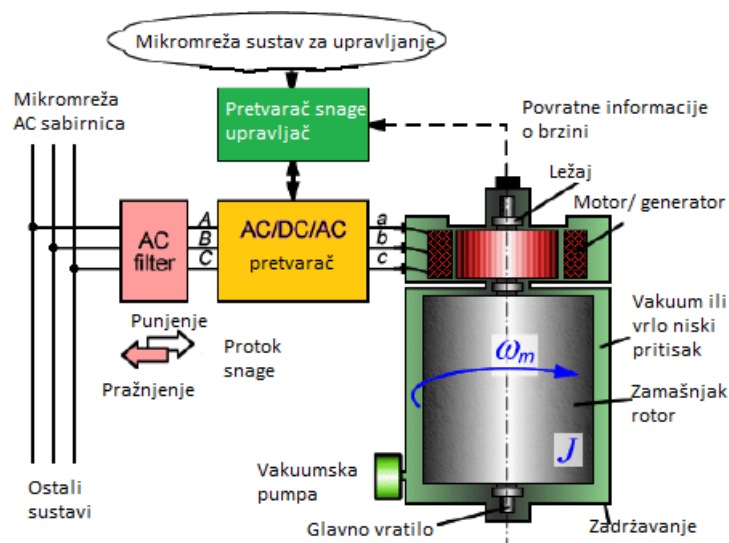
**Izotermalna** – kompresija ili ekspanzija koja se približava pokušaju održavanja radne temperature pomoću konstantne izmjene topline s okolišem [17]



Slika 3.3 Shematski prikaz skladištenja energije komprimiranim zrakom [7]

### 3.3. Pohrana energije upotrebom zamašnjaka

Električni motor pokreće rotor koji se okreće jako velikom brzinom, koja doseže i do 100 000 o/min. Nakon što se rotor zaleti na tu brzinu počinje se s usporavanjem i tako se proizvodi električna energija. Prilikom pražnjenja akumulirane kinetičke energije rotacija kod tog usporavanja, potiče generator na proizvodnju. Idealni su za kratkoročno skladištenje električne energije i na mjestima gdje je opskrba potrebna u vrlo kratkom roku. Izrazito se koriste u prometu jer omogućuju kratkoročnu dostupnost dodatne električne energije, ali im je nedostatak taj da se ne mogu koristiti za dugoročno skladištenje jer nakon sat vremena gube 15% električne energije koje su proizveli. [6]



Slika 3.4 Struktura sustava temeljenog na pohrani energije principom zamašnjaka [11]

### 3.4. Baterije

Baterija je spremnik električne energije koji radi na elektrokemijskom principu. U elektroenergetici se koriste kao pomoćni istosmjerni izvor napajanja u postrojenjima, rasklopnim postrojenjima u elektranama te kod napajanja manjih tereta unutar trafostanica. Baterija se sastoji od triju dijelova, a to su dvije elektrode te jedan elektrolit između njih. Priključkom napunjene baterije na strujni krug započinje protok nabijenih iona između elektroda kroz elektrolit. Služe za skladištenje energije za kratko vrijeme tijekom nekoliko dana ili sati, a najčešće kod zadovoljavanja promjenljive dnevne vršne potražnje.



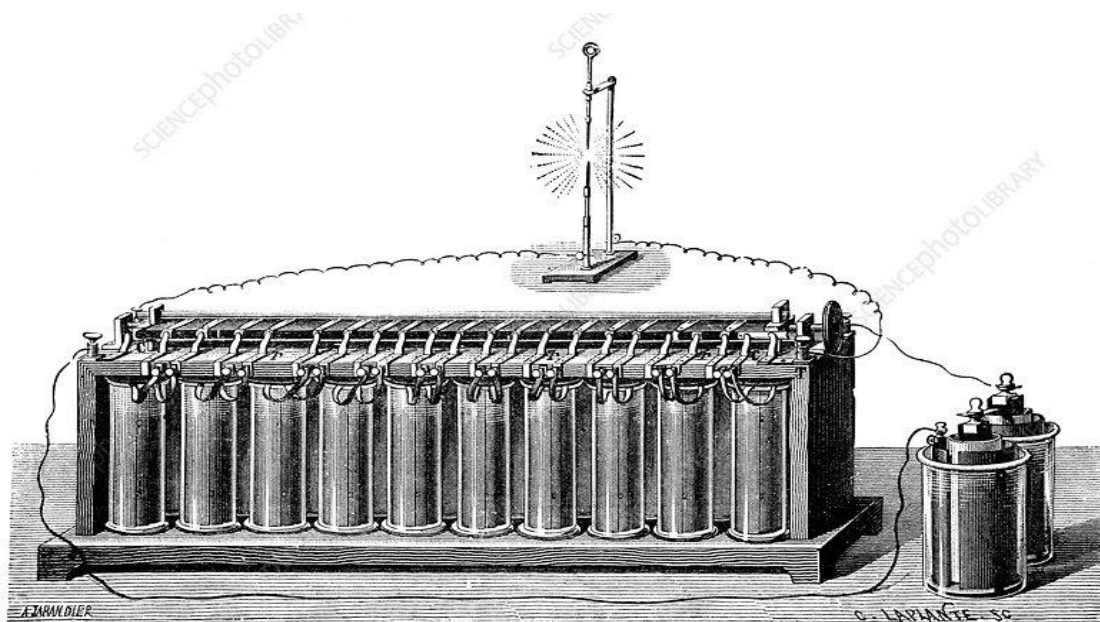
*Slika 3.5 Baterija [18]*

### 3.4.1. Povijest

Riječ baterija prvi puta se spominje godine 1749. kada je Benjamin Franklin svoj skup povezanih kondenzatora koristio za pokuse s električnom strujom. Onda zvana baterija koju je on tako nazvao sastojala se od staklenih ploča obloženih metalom sa svake strane.

Prva prava baterija izumljena je od strane Alessandra Volte 1800. godine. Njegova baterija bila je stabilni izvor električne energije, nije puno trošila kada nije bila u radu, ali glavni nedostaci su joj bili ti da je imala kratki vijek trajanja te curenje elektrolita. [9]

1859. godine prvu punjivu bateriju izumio je Gaston Planté. Ova je za razliku od prethodnih verzija bila jako glomazna za energiju koju je davala. Takva baterija se danas koristi u automobilima. Od kako se počelo s takvim načinom usavršavanja teorija je ostala ista samo su se izmjenjivale tehnologije pa smo tako danas došli do različitih vrsta baterija i načina njihovog korištenja te punjenja. [9]



Slika 3.6 Punjiva baterija od Gastona Planté -a [19]

### 3.4.2. Olovne baterije (VRLA)

VRLA (engl. Valve Regulated Lead - Acid) je ventilom regulirana olovna baterija s kiselinom. Ventil služi da bi se kontrolirao tlak i tako sigurno odvodili plinovi koji mogu nastati. Takve baterije su kompletno zatvorene i izolirane te ne zahtijevaju održavanje elektrolita. Zbog toga što su izolirane i na način da se za njih ne treba pretjerano brinuti one su sigurnije te je i njihov rad s njim sigurniji te ne treba biti posebno obučen. Najčešće se koriste na otvorenom jer je dokazano da pod djelovanjem vanjskih utjecaja nije zabilježen znatniji broj kvarova. Takva vrsta baterije se koristi u telefonskoj infrastrukturi češće nego u elektroenergetici. Razlog tome je taj da se u telefoniji takve baterije koriste duže vrijeme npr. 8 sati dok je u energetici kritično trajanje uključjenja potrošača puno kraće, a struje puno veće. Zbog toga telefonija bi se s tom baterijom od 50% kapaciteta mogla opskrbljivati oko 4 sata, dok u energetici kao rezervno napajanje, ne bi mogla zadovoljiti zahtjeve kupaca ni da je na 80% svojeg nominalnog kapaciteta. Samo dizajniranje takve baterije radi se s velikim tolerancijama, to znači da za rad nekih prekidača koji rade na nekom naponu, nominalni napon baterije je za 20% veći kako bi se pokrili vanjski utjecaji koji bi mogli utjecati na smanjenje napona i kapaciteta.

S obzirom na tehnologiju VRLA baterije se dijele na:

- Zatvorene olovne akumulatorske baterije s apsorbiranim elektrolitom
- Zatvorene olovne akumulatorske baterije s gel elektrolitom [12]



Slika 3.7 VRLA baterija [20]

### 3.4.3. Zatvorene olovne baterije s apsorbiranim elektrolitom

Zatvorene akumulatorske baterije s apsorbiranim elektrolitom počele su se proizvoditi početkom 1970. godine. Takve baterije su konstruirane s ograničenom količinom tekućeg elektrolita upijenog u separatoru. Separator služi da elektrolit bude ravnomjerno rasprostranjen te da bude u kontaktu s elektrodama. Uz to ima i ulogu da za vrijeme punjenja bude omogućen prolaz kisika kako bi se vršila izmjena plinova. Zbog vrlo malog unutarnjeg otpora takve baterije razvijaju vrlo velike struje kratkog spoja. Baterija se dijeli na više podvrsta ovisno o tome od kakvog je materijala proizvedena rešetka ploče elektroda. [12]

Nedostatak takvih baterija je taj da se brzo isušuje elektrolit te korozija pozitivne elektrode. Do isušivanja elektrolita dolazi pod utjecajem elektrolize vode. To je postupak kojim se prolaskom struje kroz vodu voda raspada na plinove vodika i kisika, a ti plinovi nastoje izaći iz spremnika pa stoga strada pozitivna elektroda. HEP takve baterije koristi u svojim rasklopnim postrojenjima, a elektrode su im izrađene kao ravne premazane ploče s rešetkom od legure na bazi olova i kalcija, a životni vijek im je 10 godina. AGM baterije danas se koriste u automobilima novije generacije koje imaju funkciju „start stop“. Mnogo lakše pokreću motor kod niskih temperatura i dugotrajniji su, ali su značajno skuplji. [12]



Slika 3.8 AGM baterija [21]



### 3.4.4. Ni-Cd baterije

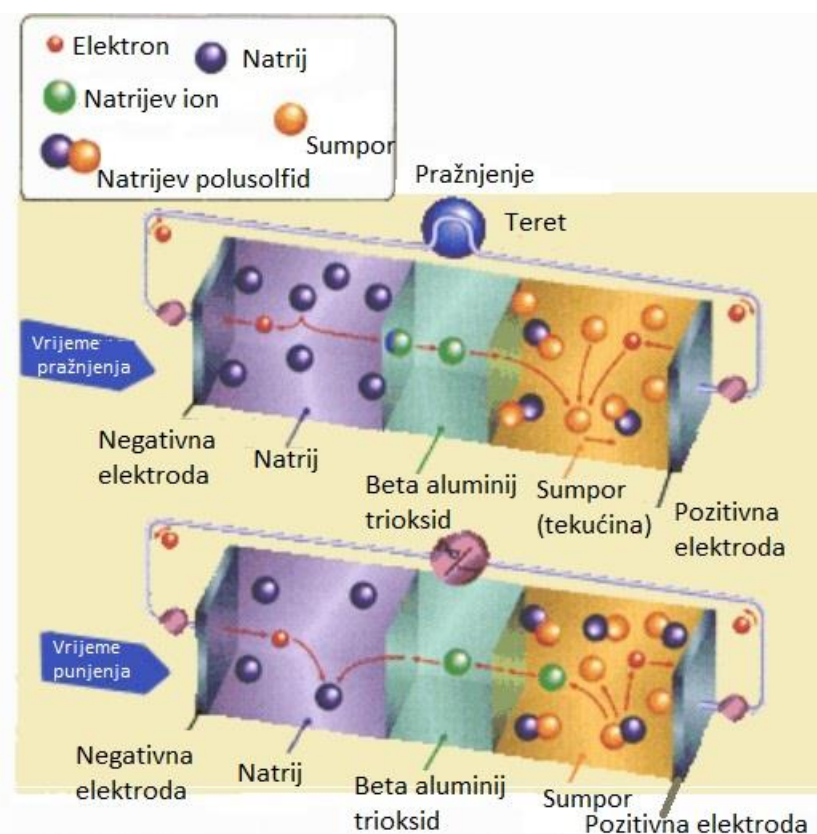
Ni – Cd baterije nisu doživjele veću upotrebu u elektroenergetskom sustavu zbog njihove prevelike cijene. Takve se baterije ugrađuju u postrojenja u kojima se očekuju teži uvjeti rada. Ni – Cd se najviše isplate u postrojenjima u kojima će se razvijati jako velike temperature. Npr. kod svakog povećanja temperature za 8 °C iznad temperature od 25 °C, klasične baterije s tekućim elektrolitom gube i do 50% svoga životnog vijeka, dok je kod Ni – Cd baterija to 20%. Stoga se takve baterije ugrađuju u male distributivne transformatorske stanice.[12]



Slika 3.9 Ni - Cd (nikl - kadmijaska) baterija

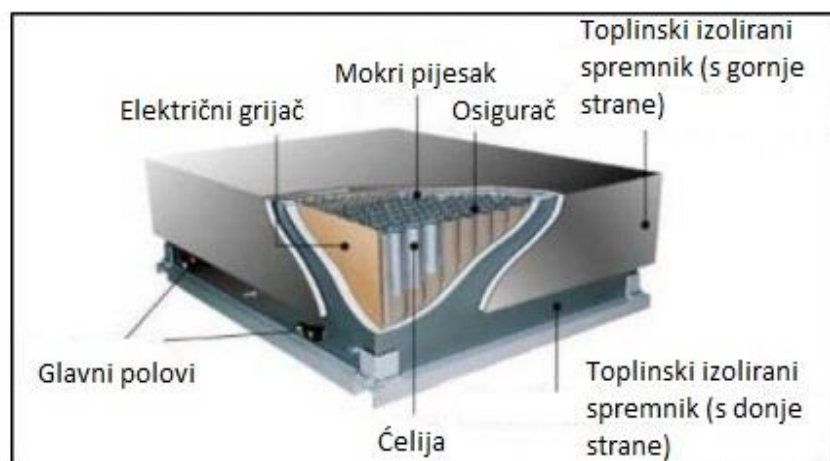
### 3.4.5. Natrij sumpor baterija

Natrij sumpor (NaS) baterija je suha baterija koja se sastoji od pozitivne elektrode sumpora te negativne elektrode natrija, a između njih se nalazi keramički elektrolit beta aluminij trioksida, čija je uloga provođenje natrijevih iona. Svi ti dijelovi se nalaze unutar metalnog kućišta te održavano na temperaturi od 300 do 350 °C. Kada su zadovoljeni ti uvjeti, onda su aktivne elektrode u tekućem stanju, a elektrolit u čvrstom, zbog čega je takva baterija proglašena suhom. Kod pražnjenja ioni natrija prelaze iz negativne elektrode kroz elektrolit te se zaustavljaju kod pozitivne elektrode sumpora što je vidljivo na slici 3.10 [1]



Slika 3.10 Shematski prikaz rada NaS baterije [1]

NaS baterija se može koristiti u raznim uvjetima rada, a da bi se zadovoljili veći kapaciteti baterije, potrebno je spojiti veći broj ćelija u jednu cjelinu. NaS baterija se zbog svog brzog odziva koristi kod vjetroelektrana te kod podrške kod distribucijske mreže. Razvijene su da imaju brzi odziv pri čemu se osigurava kvaliteta električne mreže i te se tako ostvaruje signal automatske regulacije za područje regulacije. Baterija mora imati aktivno hlađenje jer je njezina radna temperatura visoka što je već rečeno u prethodnom ulomku. Kućište mora biti vakuumski zatvoreno jer NaS baterija sadrži opasne metale kao što je metalni natrij koji u dodir s vodom postaje zapaljiv. Isto tako, svaka ćelija za sebe je vakuumski zatvorena te obasipana pijeskom kako bi se stabilizirala, ali pomoću pijeska postala sigurna od slučajnog zapaljenja. [1]



Slika 3.11 Presjek NaS baterije [2]

|   |                                      |
|---|--------------------------------------|
| Gustoća energije (volumen)                | 170 kWh/m <sup>3</sup>               |
| Gustoća energije (masa)                   | 117 kWh/t                            |
| Efikasnost punjenja / pražnjenja baterije | >86%                                 |
| Efikasnost punjenja / pražnjenja sustava  | >17%                                 |
| Životni vijek ciklusa                     | 4500 ciklusa kod nazivnog kapaciteta |
| Životni vijek                             | 15 godina                            |

Tablica 3.1 Karakteristike NaS baterije [2]

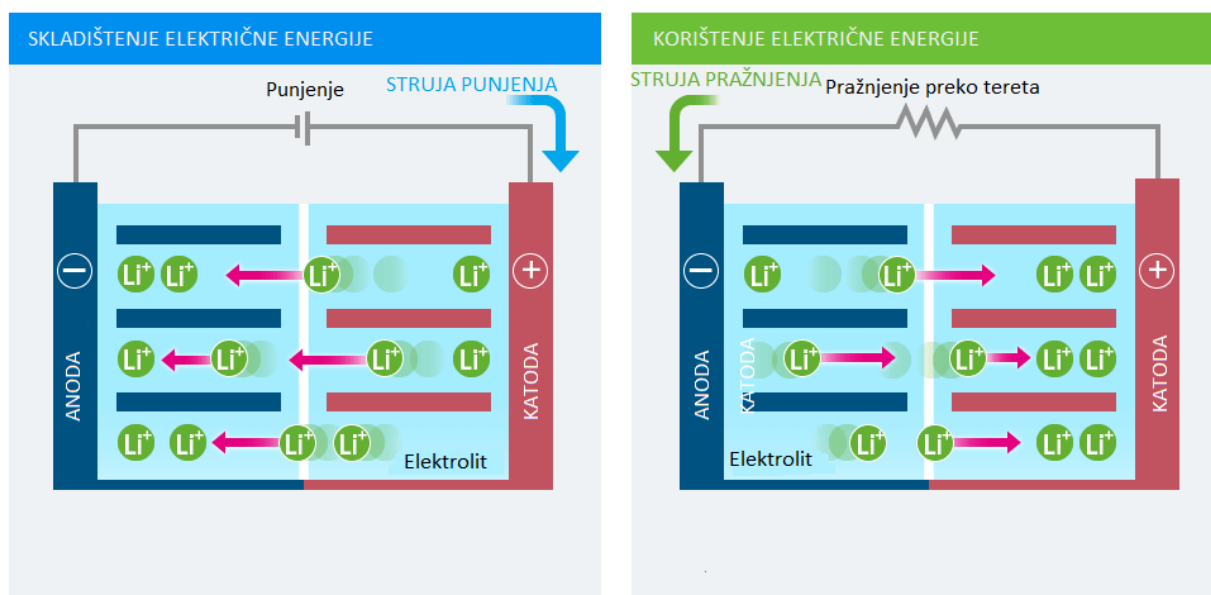
Na slici 3-12 prikazani su spremnici električne energije koji služe za stabilizaciju vjetroelektrana. [1]



*Slika 3.12 Rokkasho (Japan) - farma vjetroelektrana - na slici baterijski spremnici NaS [22]*

### 3.4.6. Li – ion baterija

Litij ionska baterija sastoji se od dvije elektrode prilikom čega je jedna od metalnog oksida jer se atomi litija rado veže na metalni oksid, a druga elektroda je od grafita. Proces punjenja Li – ion baterije radi na principu da se ion litija odvaja od elektrode metalnog oksida. Nakon toga taj ion litija prolazi kroz elektrolit i dolazi do grafita na drugoj strani, a iz vanjskog kruga dolazi elektron koji taj litijev ion neutralizira. Kod pražnjenja se litij ionizira te se stohastički vraća na pozitivnu elektrodu odnosno onu početnu. Na početnoj se elektrodi kemijski veže prilikom čega oslobađa energiju kemijske veze.



Slika 3.13 Princip rada Li - ion baterije [23]

Li – ionska baterija se sve više ugrađuje u distribucijski energetska sustav za pohranu električne energije u vrijednostima od 25 do 50 kW, te takav sustav može napajati od 1 do 3 sata. Najveća prednost Li – ionske baterije je njezina otpornost na visoke temperature. Ispitivanja su dokazala da nema razlike u radu kod temperature od 60°C i 25°C. Za razliku kod većine baterijskih spremnika kod ovog nije potrebno voditi brige o razini elektrolita, pa iz toga možemo otkloniti opasnost koja može nastati zbog prelijevanja kiseline. Najviše ispitivanja Li – ionske baterije svedeno je na njezino punjenje i pražnjenje jer se velika većina baterija nalazi u automobilima. Najveći nedostatak je vrlo visoka cijena Li – ionskih baterija. Više od 100 MW spremnika električne energije s Li – ionskom baterijom se koristi u komercijalne svrhe. [1]

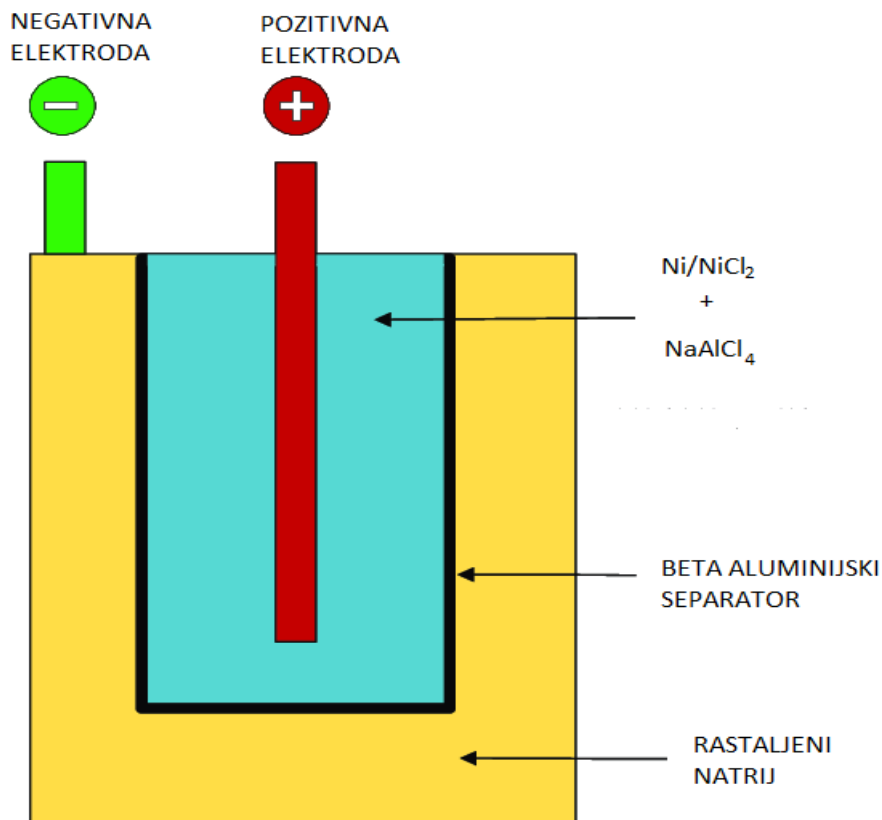


*Slika 3.14 Li - ionska baterija malog kapaciteta [24]*

### 3.4.7. Natrij – nikal – klorid baterije (zebra)

$Na - NiCl_2$  baterija posjeduje jako dobru energetska gustoću, ima dugi životni vijek te može raditi u teškim uvjetima tj. na temperaturi u rasponu od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Bateriju ne treba održavati i za nju nije potrebno dizajnirati hlađenje. Najveća prednost koja se karakterizira je ta da se skoro svi dijelovi potrebni za njenu izgradnju mogu reciklirati i ponovno upotrebljavati. [25]

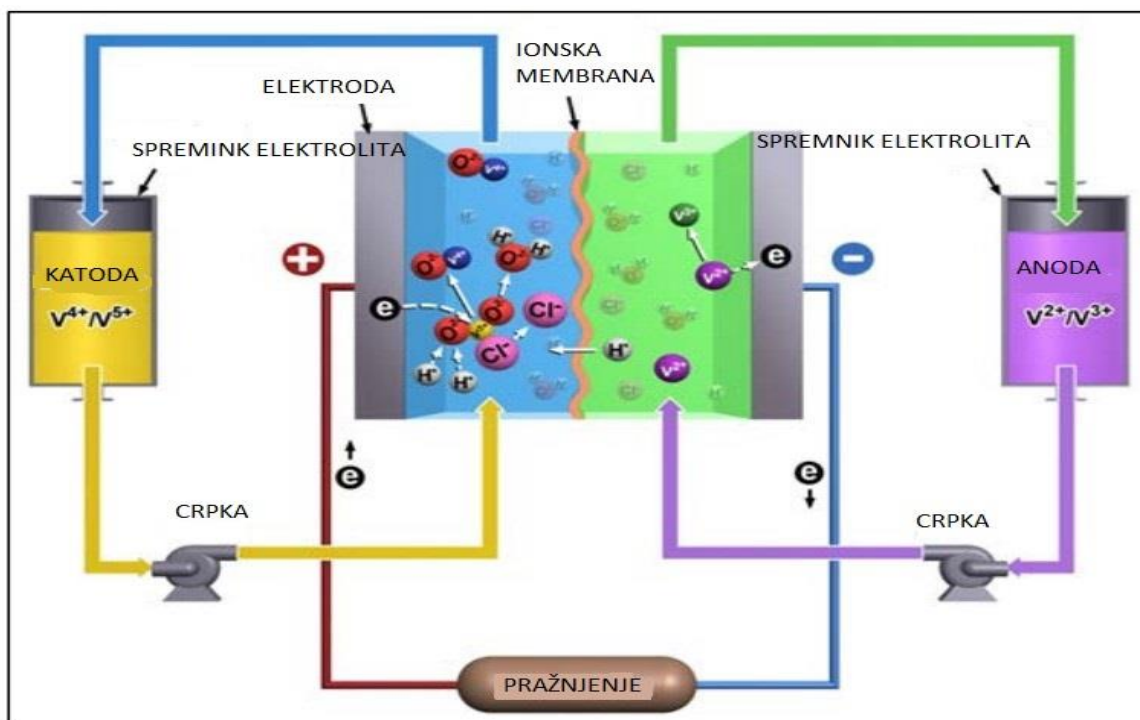
Princip rada kod punjenja na nominalnoj temperaturi, podrazumijeva da se natrijev klorid i nikal kemijskom reakcijom pretvaraju u niklov klorid te rastaljeni natrij. Kod pražnjenja imamo obrnute reakcije. Elektrolit koji odvaja elektrode provodi samo natrijeve ione te do reakcije ne dolazi jer vanjski dio ne omogućava tok elektrona. [5]



Slika 3.15 Natrij- nikal- klorid baterija [5]

### 3.4.8. Vanadij – redoks baterije (VRB)

Radi se o protočnoj bateriji koja je svojom strukturom podijeljena na dva dijela ionskom membranom. Kao elektrolit se koristi vanadij sulfat elektrolit. Vanadij redoks baterija ima dvije pumpe na svakom dijelu membrane koji pumpaju elektrolit preko dva zasebna spremnika od kojih je jedan pozitivni, a drugi negativni. Ova baterija može se puniti izmjeničnom i istosmjernom strujom. Vanadij redoks baterija se u većini slučajeva koristi u elektroenergetici. Snage od 10 – 100 kW koriste se u komercijalne svrhe, a najčešće kod dizala i industrijskih postrojenja. Veće baterije koje prelaze snagu od 100 kW omogućavaju da elektrane rade efikasnije tako se sprječava visoka potrošnja. Ako se puni preko energije sunca ili vjetra VRB baterija garantira da povratno mreži može isporučiti električnu energiju uz frekvenciju bez oscilacija. Budući da VRB baterija ima pumpe ioni vanadija ostaju u kiseljoj otopini tijekom cijelog procesa. Prilikom konstrukcije baterije polovi ćelija su odvajaju pomoću membrana koja omogućava da se protoni miješaju te da se ostvaruje protok ionskih naboja te tako zatvara strujni krug. Elektrolit u slučaju ove baterije nalazi se u vanjskim spremnicima te se pomoću pumpa dovodi u prostor unutar ćelije. Nazivni napon ćelije je 1,4 V, a da bi se ostvarili veći naponi potrebno je više ćelija spojiti u seriju. Prednost VRB baterije je jednostavni transport budući da su oba spremnika elektrolita potpuno ispražnjena. Životni vijek im je procijenjen na 10 godina. [2]

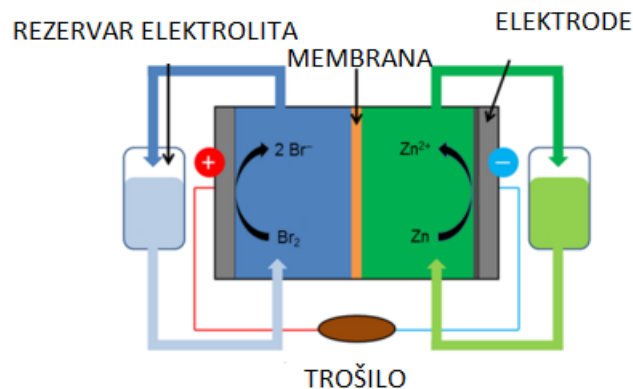


Slika 3.16 Princip rada VRB baterije [2]



### 3.4.9. Cink – brom (Zn - Br)

Uz VRB, cink - brom baterija je također protočna, ali u ovom slučaju je cink u krutom stanju prilikom punjenja, a u tekućem kada se baterija prazni. Brom je u oba slučaja bilo to punjenje ili pražnjenje baterije u tekućem stanju. Konstrukcijski gledano cink brom baterija se sastoji od dvije elektrode i dva elektrolita koji su odvojeni tankim slojem. Kada se vrši punjenje cink se kreće prema negativnoj elektrodi dok se brom kreće prema pozitivnoj. U najidealnijim uvjetima brom bi trebao ostati na pozitivnoj strani elektrode. Zbog vrlo korozivnog djelovanja broma, elektrode ćelija izrađene su od kompozita ugljika i plastike te svaka služi kao katoda za jednu ćeliju, a anoda za sljedeću ćeliju u seriji. Najveći nedostatak ove baterije leži u bromu koji je otrovan i opasan za okoliš pa je takvu bateriju potrebno skladištiti te nakon upotrebe odložiti na određeni način. [2]



Slika 3.17 Shematski prikaz cink - brom baterije

[26]

### 3.5. Održavanje baterija

Navedene baterije koje su opisane su različite i svaka ima svoje faktore koji utječu na njihov vijek trajanja i osjetljivost na okolinu, no u širokom spektru su navedeni uvjeti pod kojih se baterije trebaju čuvati i održavati:

#### ATMOSFERSKI UVJETI :

- Optimalna radna temperatura (15 - 25 °C)
- Optimalna relativna vlažnost (5 - 95%)
- Optimalni atmosferski tlak (700 – 1060 hPa)

UGRADNJA: potrebno je osigurati pristup bateriji kako bi se ona mogla održavati na najjednostavniji način

GRAĐEVINSKI PRISTUP: podrazumijeva način slaganja te dozvoljenu nosivost podloge na kojoj se baterija nalazi

Ako se baterija stavlja u pogon te na neki način opterećuje njezin će se životni vijek smanjiti stoga se baterija nikada ne smije opteretiti većoj snazi od nazivne te radna temperatura ne smije prelaziti dozvoljenu granicu.

Faktori koji usporavaju starenje baterije:

- Osiguravanje zaštite od prevelikog pražnjenja baterije
- Pravilno dimenzioniranje ispravljača / punjača
- Osiguravanje radne temperature unutar definiranih vrijednosti
- Mogućnost reguliranja napona ispravljača / punjača ovisno o vrijednosti radne temperature
- Upozoravanje operatera o promjeni radne temperature baterijskog spremnika

Kod baterije je potrebno paziti kako se ona prazni. Ne smije se prazniti dulje vrijeme jer to za posljedicu ima stvaranje sulfatnih kristala koji sprječavaju njezino punjenje. Ako se sulfatni kristali naprave baterija se i dalje može koristiti, ali je potrebno duže vrijeme za njezino punjenje i to trajnom strujom dok napon mora biti veći od nazivnog. Ako se baterija puni i nakon što je dosegla maksimalni kapacitet dolazi do zagrijavanja iste te se zbog toga stvaraju emisije plinova koji uzrokuju koroziju pozitivne elektrode.

Kod svih navedenih procesa održavanja najbitnije je bateriju vizualno pregledavati, a od svega je najbitnije provesti:

- Mjerenje napona i zabilježiti napon baterije
- Provjeriti spojeve baterija te da li postoji korozija
- Provjeriti da li postoji napuknuće kućišta ili curenje elektrolita
- Provjeriti spojeve između baterija

Provjera stanja baterije vrši se i pomoću mjernog uređaja, prilikom čega je najbitnije provjeriti njezin unutarnji otpor. Naime, stanje baterije govori nam unutarnji otpor prilikom čega je on biti povišen što govori da je baterija stara ili oštećena. Proces zahtjeva propuštanje izmjenične struje kroz bateriju, te se na njezinim stezaljkama mjeri izmjenični napon. Ostalo se dobije preko jednadžbe Ohmovog zakona kojim se dobije unutarnji otpor.

Nakon unutarnjeg otpora provodi se i ispitivanje kapaciteta baterije koje se vrši tako da se priključi teret nazivne snage te se provjerava da li baterija može taj teret napajati u zadanom vremenu autonomije.

- Nedostatci koji nastaju prilikom ispitivanja kapaciteta baterije su:
- Mogućnost da se baterija isprazni do kraja
- Problemi prilikom pronalaženja točnog nazivnog tereta (točne vrijednosti)
- Opasnost eksplozije uslijed brzog pražnjenja baterije [12]

## 4. Baterijski spremnici

Baterijski spremnici objašnjavaju temeljne znanstvene i inženjerske osnove svih glavnih metoda skladištenja energije. To uključuje skladištenje energije kao topline, u faznim prijelazima i reverzibilnim kemijskim reakcijama, te u organskim gorivima i vodik, kao i u mehaničkim, elektrostatičkim i magnetskim sustavima. Ažurirano pokrivanje elektrokemijskih sustava za pohranu uzima u obzir uzbudljiv napredak u materijalima i metodama za primjene, poput brzog kratkotrajnog skladištenja u hibridnim i sustavima za proizvodnju energije s prekidima, te optimizaciju baterija za sve prisutnije EV tehnologije i stop-start automobilske tehnologije. Ovo nijansirano pokrivanje najnovijih dostignuća jedinstveno je po tome što ne zahtijeva prethodno znanje o elektrokemiji. Objasneni su tradicionalni i novi akumulacijski sustavi, uključujući litijske, protočne i tekuće baterije. [29]



*Slika 4.1 Postrojenje baterijskih spremnika [30]*

## 4.1. Zanimljivosti

Skladištenje energije ključno je za učinkovitu, čistu električnu mrežu. Omogućuje nam da proizvodimo čistu energiju kada je ima u izobilju, pohranimo je i po potrebi vratimo u električnu mrežu. Baš kao što je hlađenje promijenilo način na koji ljudi konzumiraju hranu, skladištenje energije može revolucionirati način na koji koristimo energiju. [31]

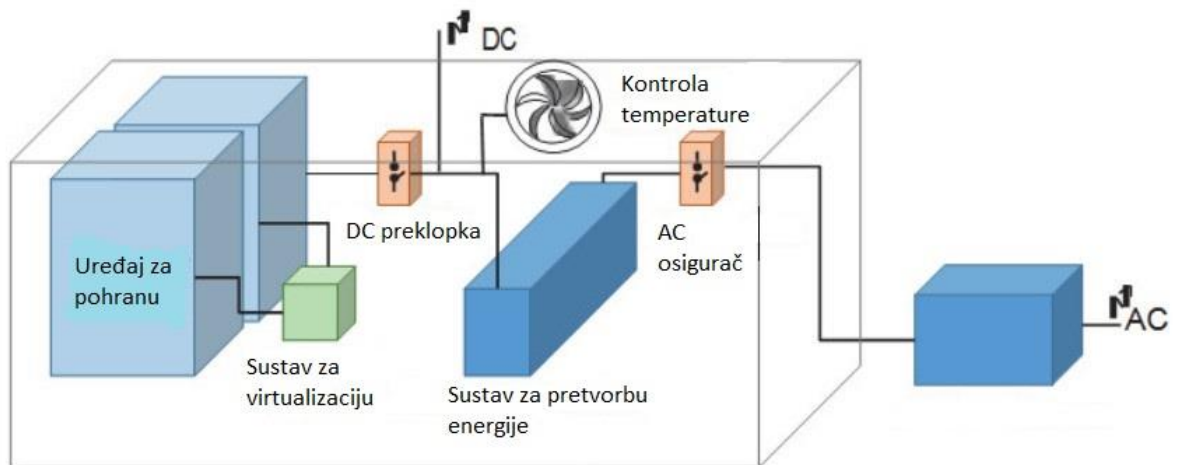
U razdoblju od 2010. do 2021. u SAD broji povećanje instalirane snage baterijskih spremnika s 59 MW na 1,736 MW. U tom razdoblju cijena litij – ionskih spremnika baterije pala je za 89% ili ti s 1,100 dolara/kWh na 137 dolara/kWh. Isto tako stručnjaci procjenjuju da će se do 2050. u SAD-u instalirani kapacitet porasti na 17GW. [31]

Jedna od tvrtki koja proizvodi opremu za obnovljive izvore energije je i tvrtka Sunceco. Tvrtka Sunceco sa sjedištem u SAD-u ima i podružnice u Ujedinjemo Kraljevstvu, Hong Kongu, Njemački, Taiwanu, ali i u Sisku.



Slika 4.2 12.5 MWh Sisak, Hrvatska [32]

## 4.2. Shematski prikaz



Slika 4.3 Shematski prikaz baterijskog spremnika i primarni dijelovi [13]

### 4.3. Opis dijelova

**Uređaj za spremanje** *eng. storage device* - baterijski spremnici, služe za pohranu električne energije

**Istosmjerna sklopka** *eng. DC switch* – sklopka koja služi preklapanje na istosmjernoj strani baterijskog sustava

**Kontrola temperature** *eng. Temperature control* – služi za hlađenje baterijskog sustava koji mora biti unutar unaprijed zadanim granicama; aktivno hlađenje

**Sustav za virtualizaciju** *eng. Monitors & control* - sustav koji predočava trenutno stanje baterijskog spremnika preko upravljačke ploče (zaslona)

**Pretvarač** *eng. Power conversion system* – pretvarač koji služi za pretvaranje istosmjerne električne energije u izmjeničnu i obrnuto

**Izmjenični prekidač** *eng. AC breaker* – izmjenični prekidač koji prekida sekundarni izmjenični krug

**Transformator** *eng. AC transformer* – transformator koji pretvara viši naponski nivo u niži i obrnuto iste frekvencije

## 5. Simulacija rada baterijskih spremnika u elektroenergetskom sustavu

Zbog kompleksnog proračuna i simulacije za potrebe ovog završnog rada korišten je programski paket : NEPLAN 360

### 5.1. Opis programskog paketa za simulaciju rada elektroenergetskog sustava

NEPLAN 360



*Slika 5.1 Simbol tvrtke Neplan [28]*

Besplatna demo / studentska verzija je pojednostavljena, ali potpuno funkcionalna programska verzija koja omogućuje nabavu i proračun mreža do najviše 15 čvorova i ima sljedeće osnovne module: protok opterećenja, kratki spoj, prijelazna stabilnost (dinamički simulator), nadstrujna zaštita (analiza selektivnosti), harmonijska analiza i analiza pouzdanosti.

Unatoč ograničenoj funkcionalnosti, brojni unaprijed definirani primjeri i unaprijed definirane knjižnice za mrežne elemente, zaštitne uređaje i upravljačke sustave za dinamičku simulaciju daju vam dobar pregled softvera. Primjeri dostavljeni u knjižnicama mogu se vrlo dobro koristiti u školske svrhe. Nema razlike između demo i studentske verzije. Obje verzije istječu nakon šest mjeseci i mogu se produžiti zahtjevom e -pošte.

Da biste dobili demo / učeničku verziju, potrebni su sljedeći koraci:

1. Kliknite gumb "Preuzmi aplikaciju".
2. Instalirajte aplikaciju NEPLAN koja omogućuje pozivanje demo / učeničke verzije na svoje računalo
3. Registrirajte se u dijalogu za prijavu
4. Aktivirajte licencu u roku od 6 sati nakon što ste primili poruku e -pošte na svoju adresu e -pošte (ako niste primili poruku e -pošte, provjerite direktorij neželjene pošte)

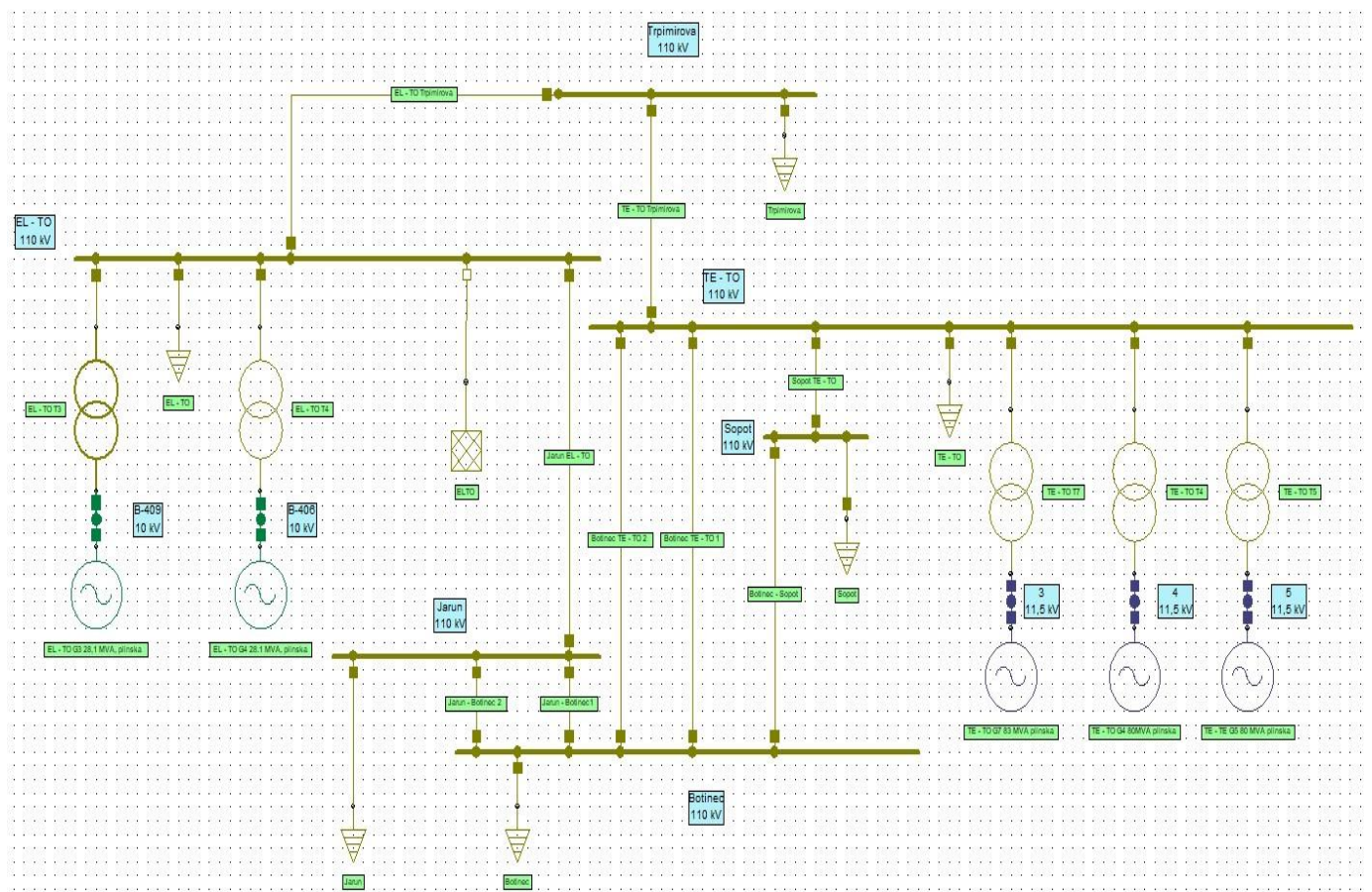


5. Prijavite se s podacima za prijavu koje ste primili unatoč ograničenoj funkcionalnosti, brojni unaprijed definirani primjeri i unaprijed definirane knjižnice za mrežne elemente, zaštitne uređaje i upravljačke sustave za dinamičku simulaciju daju vam dobar pregled softvera. Primjeri dostavljeni u knjižnicama mogu se vrlo dobro koristiti u školske svrhe. Nema razlike između demo i studentske verzije.

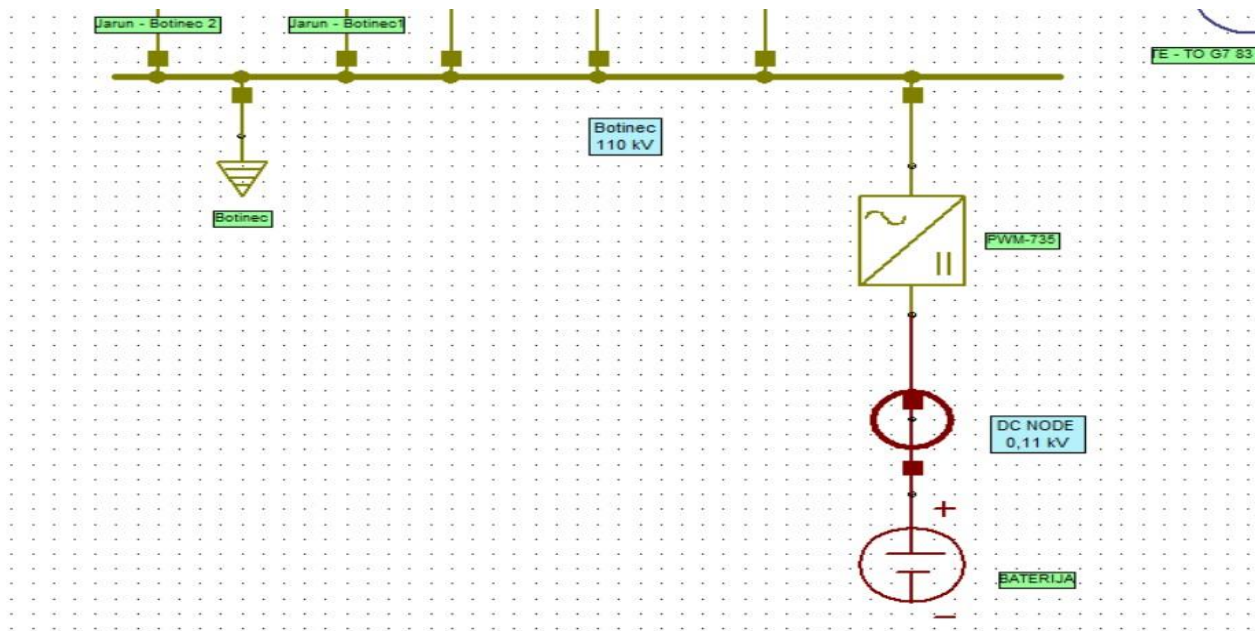
Obje verzije istječu nakon šest mjeseci i mogu se produžiti putem zahtjeva za e -poštu. [27]

## 5.2. Analiza rada baterijskog spremnika u dijelu prijenosne mreže grada Zagreba

U radu su izvršene dvije vrste simulacija. Jedna je bez baterijskog spremnika, a druga je samo uz djelovanje aktivne mreže. Izvršena je simulacija protoka snage kroz mrežu tako da se može pratiti stanje na svakom elementu. Simulacija je izvršena iz razloga da se vidi kako baterijski spremnik djeluje kada imamo normalno i izvanredno pogonsko stanje te način na koji se ublažuju poremećaju u mreži. Svi ostali postupci simulacije opisani su u daljnjem tekstu što je popraćeno slikama.



Slika 5.2 Zagrebački prsten



Slika 5.3 Baterijski spremnik

### 5.3. Podaci dijela elektroenergetskog sustava

| Ime voda             | duljina [km] | R [ $\Omega$ /km] | X [ $\Omega$ /km] | B [ $\mu$ S/km] | R0 [ $\Omega$ /km] | X0 [ $\Omega$ /km] | B0 [ $\mu$ S/km] | I [A] | Materijal |
|----------------------|--------------|-------------------|-------------------|-----------------|--------------------|--------------------|------------------|-------|-----------|
| EL - TO - Trpimirova | 6,22         | 0,03              | 0,1               | 84,8            | 0,22               | 0,8                | 84,8             | 740   | Cu        |
| TE - TO - Trpimirova | 14,72        | 0,12              | 0,4               | 2,82            | 0,33               | 1,26               | 1,79             | 740   | Cu        |
| Sopot - TE-TO        | 8,43         | 0,12              | 0,4               | 2,87            | 0,29               | 1,03               | 1,83             | 605   | Cu        |
| Botinec - Sopot      | 11,22        | 0,12              | 0,4               | 2,87            | 0,29               | 1,03               | 1,83             | 605   | Cu        |
| Botinec - TE-TO 1    | 10,72        | 0,12              | 0,4               | 2,87            | 0,29               | 1,03               | 1,83             | 605   | Cu        |
| Jarun - Botinec 2    | 5,73         | 0,12              | 0,4               | 2,81            | 0,33               | 1,26               | 1,71             | 1210  | Cu        |
| Jarun - Botinec 1    | 5,73         | 0,12              | 0,4               | 2,81            | 0,33               | 1,26               | 1,71             | 1210  | Cu        |
| Jarun - EL-TO        | 6,12         | 0,03              | 0,1               | 2,78            | 0,22               | 0,8                | 0                | 740   | Cu        |
| Botinec - TE-TO 2    | 10,72        | 0,12              | 0,4               | 2,87            | 0,29               | 1,03               | 1,83             | 605   | Cu        |

Tablica 5.1 Podaci o vodovima

| Ime        | S [MVA] | cos $\varphi$ |
|------------|---------|---------------|
| Botinec    | 42,52   | 0,981         |
| Sopot      | 33,35   | 0,949         |
| TE-TO      | 52,29   | 0,989         |
| Jarun      | 73,32   | 0,978         |
| Trpimirova | 44,45   | 0,936         |
| EL-TO      | 62,56   | 0,986         |

Tablica 5.2 Snage generatora

| Ime                      | S[MVA] | U [kV] | cos $\varphi$ | Xd sat [%] | Xd" sat [%] |
|--------------------------|--------|--------|---------------|------------|-------------|
| EL-TO G3 28,1MVA plinska | 28,1   | 10     | 0,85          | 65,47      | 15,9        |
| EL-TO G4 28,1MVA plinska | 28,1   | 10     | 0,85          | 65,47      | 15,9        |
| TE-TO G4 80MVA plinska   | 80     | 11,5   | 0,85          | 97,2       | 16,2        |
| TE-TO G7 83MVA plinska   | 83     | 11,5   | 0,85          | 121,5      | 16,2        |
| TE-TO G5 80MVA plinska   | 80     | 11,5   | 0,85          | 97,2       | 16,2        |

Tablica 5.3 Podaci o generatorima 1

| Ime                      | H [s] | Xd [%] | Xd' [%] | Xd" [%] | Xq [%] | Xq' [%] | Xq" [%] |
|--------------------------|-------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|
| EL-TO G3 28,1MVA plinska | 5,016 | 125    | 23,2    | 15,9    | 122    | 71,5    | 15,9    |
| EL-TO G4 28,1MVA plinska | 5,016 | 125    | 23,2    | 15,9    | 122    | 71,5    | 15,9    |
| TE-TO G4 80MVA plinska   | 4,887 | 215,9  | 31,6    | 16,2    | 205,8  | 46,2    | 16,2    |
| TE-TO G7 83MVA plinska   | 4,887 | 215,9  | 31,6    | 16,2    | 205,8  | 46,2    | 16,2    |
| TE-TO G5 80MVA plinska   | 4,887 | 215,9  | 31,6    | 16,2    | 205,8  | 46,2    | 16,2    |

Tablica 5.4 Podaci o generatorima 2

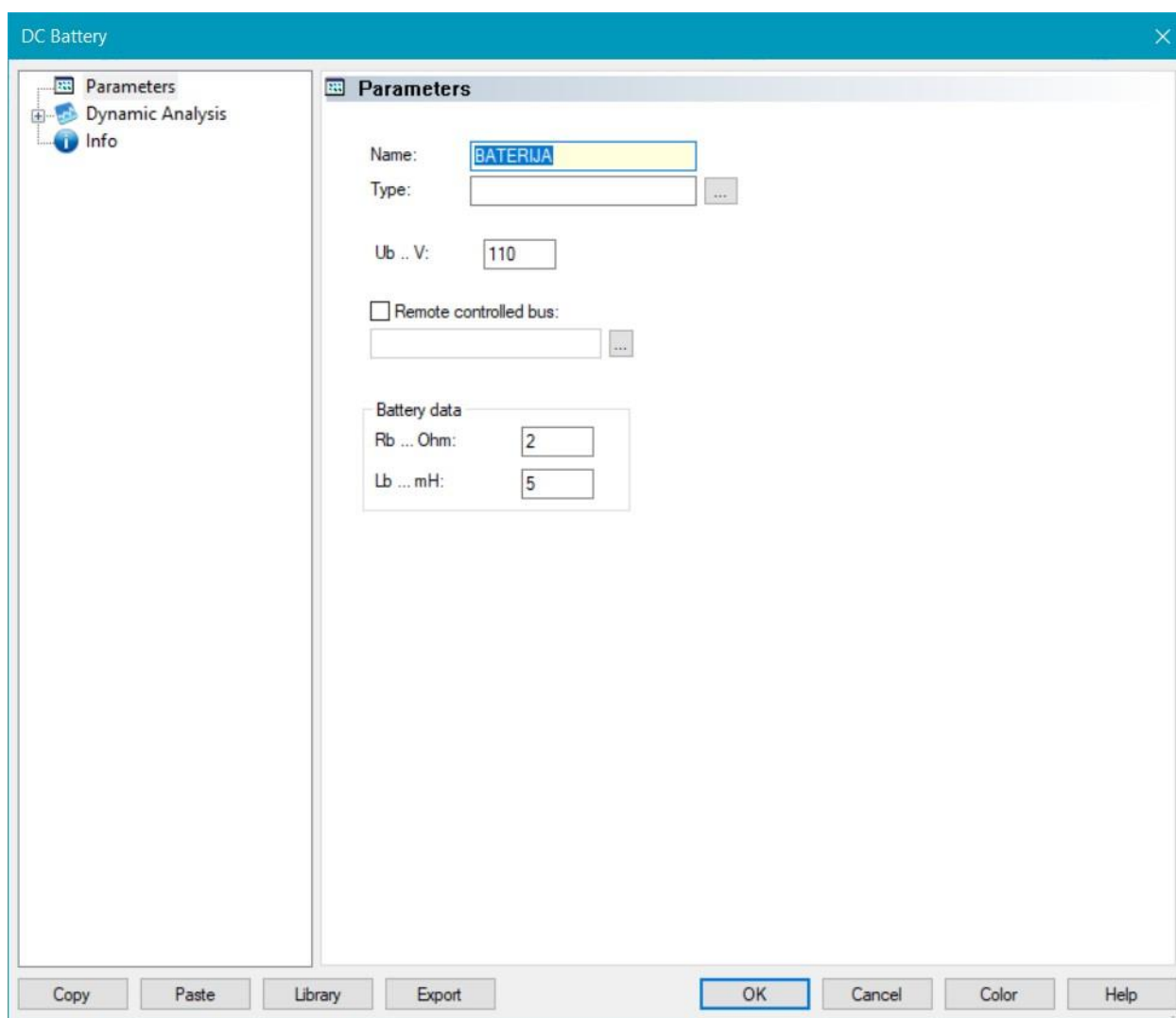
| Ime  | Sk min [MVA] | Sk max [MVA] | Ik min [kA] | Ik max [kA] |
|------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| ELTO | 4597,764     | 5158,861     | 24,132      | 27,077      |

Tablica 5.5 Podaci aktivne mreže

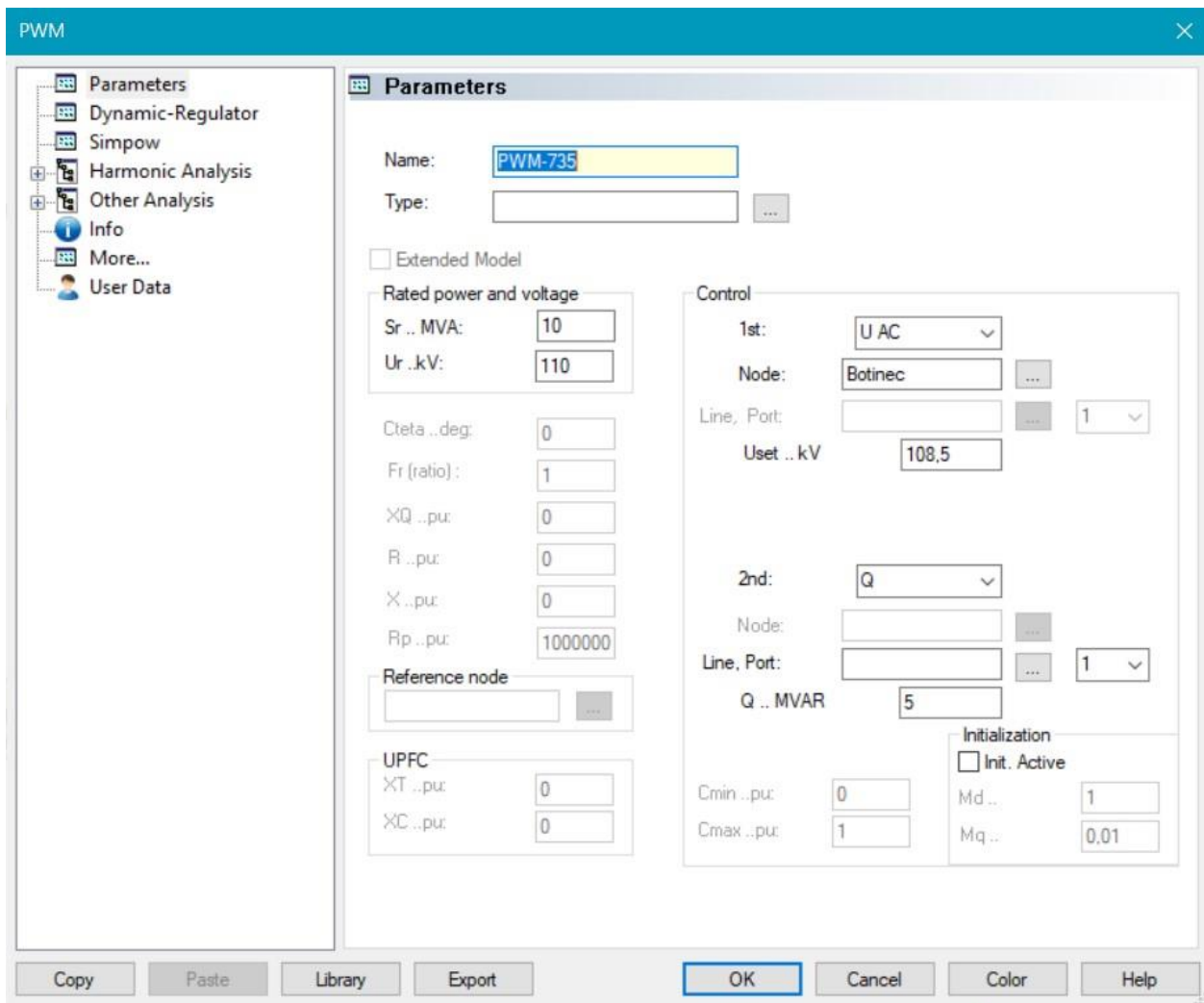
| Ime      | Spoj | S [MVA] | U1 [kV] | U2 [kV] | uk [%]=uk0 [%] |
|----------|------|---------|---------|---------|----------------|
| TE-TO T7 | Dy5  | 40      | 115,5   | 10,5    | 10,55          |
| TE-TO T4 | Yd5  | 85      | 110     | 11,5    | 9,75           |
| TE-TO T5 | Yd5  | 85      | 110     | 11,5    | 9,75           |
| EL-TO T3 | Dy5  | 30      | 115     | 10,5    | 13,25          |
| EL-TO T4 | Dy5  | 30      | 115     | 10,5    | 13,25          |

Tablica 5.6 Podaci o teretima

## 5.4. Podaci baterijskog spremnika i izmjenjivača

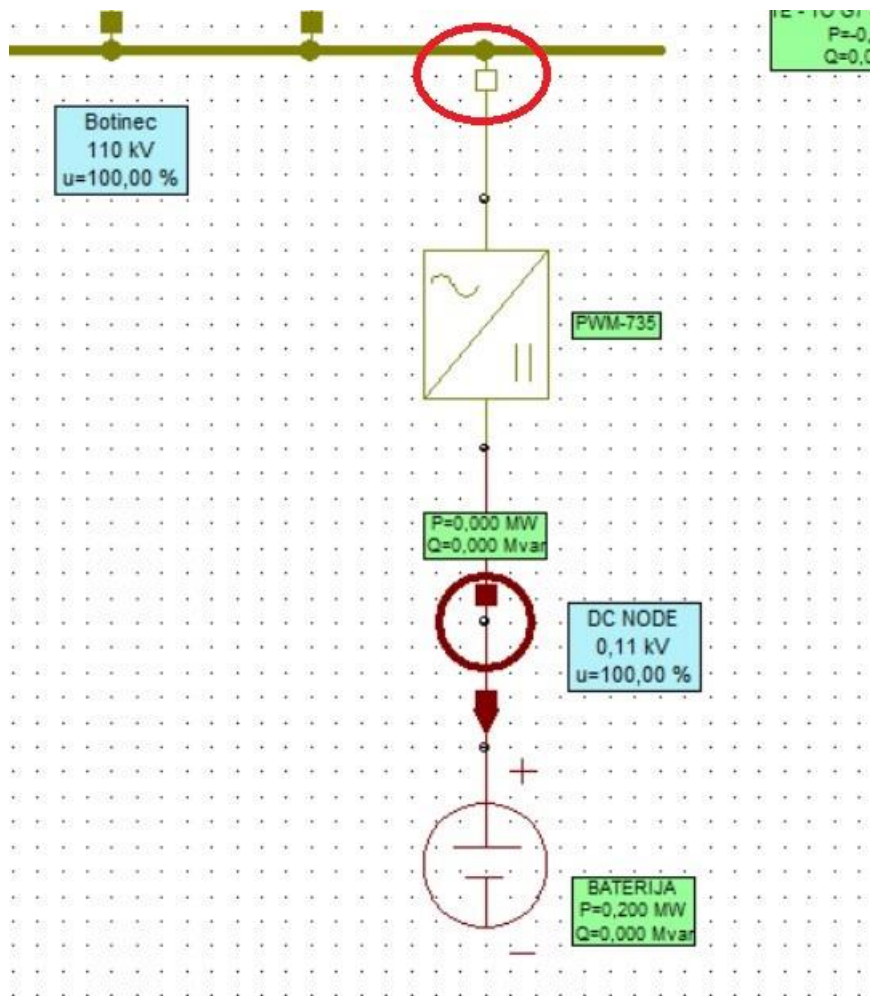


Slika 5.4 Zadane vrijednosti za baterijski spremnik



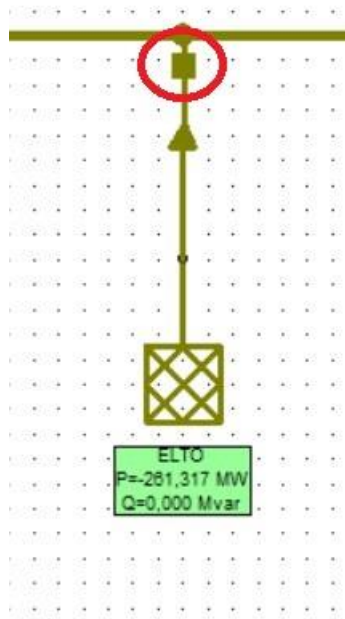
Slika 5.5 Zadane vrijednosti za izmjenjivač

## 5.5. Simulacija s uključenom aktivnom mrežom bez priključene baterije (nazivno pogonsko stanje)

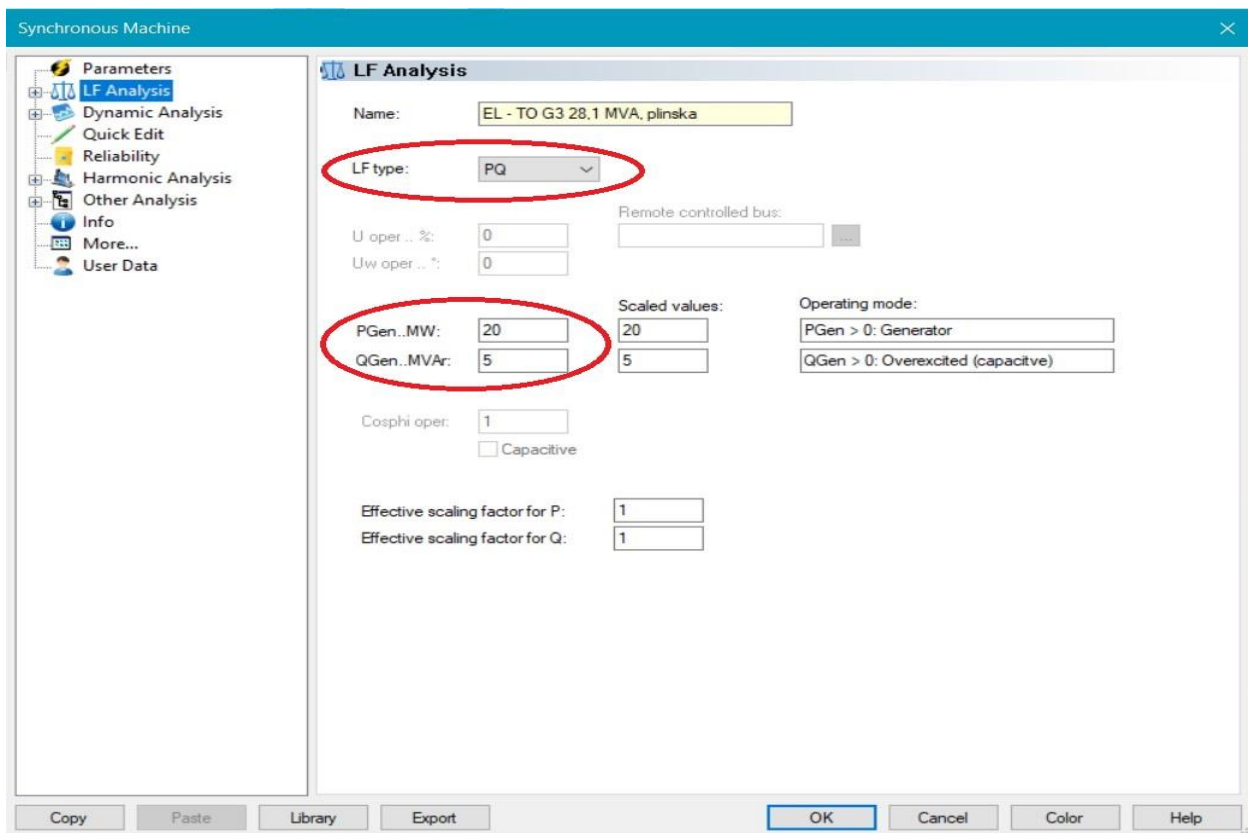


Slika 5.6 Prekidač koji spaja bateriju na mrežu je isključen (crveni krug)

Crveni krug označava prekidač koji je trenutno isključen. Kada je prekidač isključen ispunjena kvadrata je bijela, u suprotnom je kvadrat u boji sabirnice na koju je priključen. Ovo se primjenjuje na sve prekidače koji su se koristili tijekom ove simulacije.



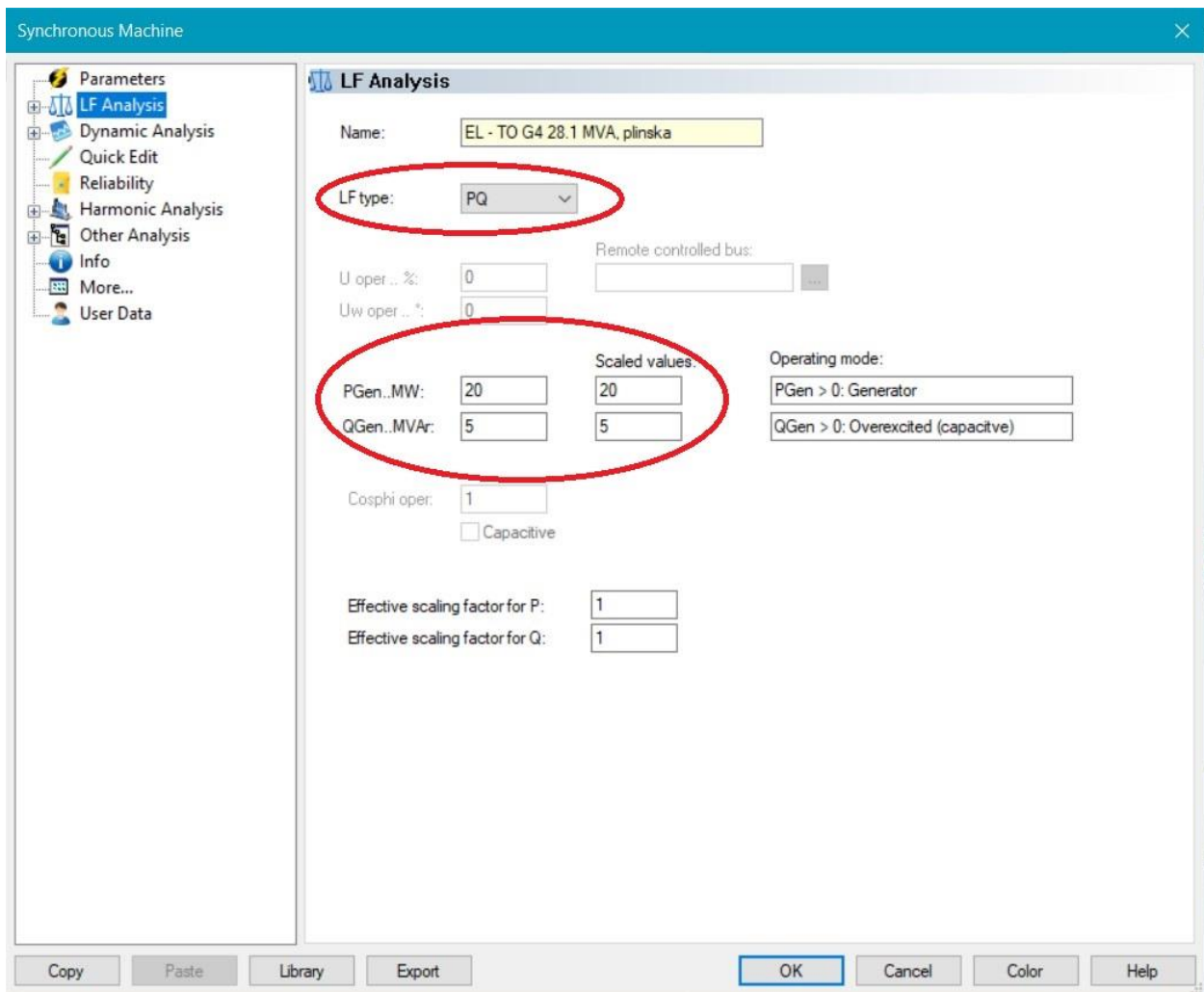
Slika 5.7 Prekidač na aktivnoj mreži uključen (crveni krug)



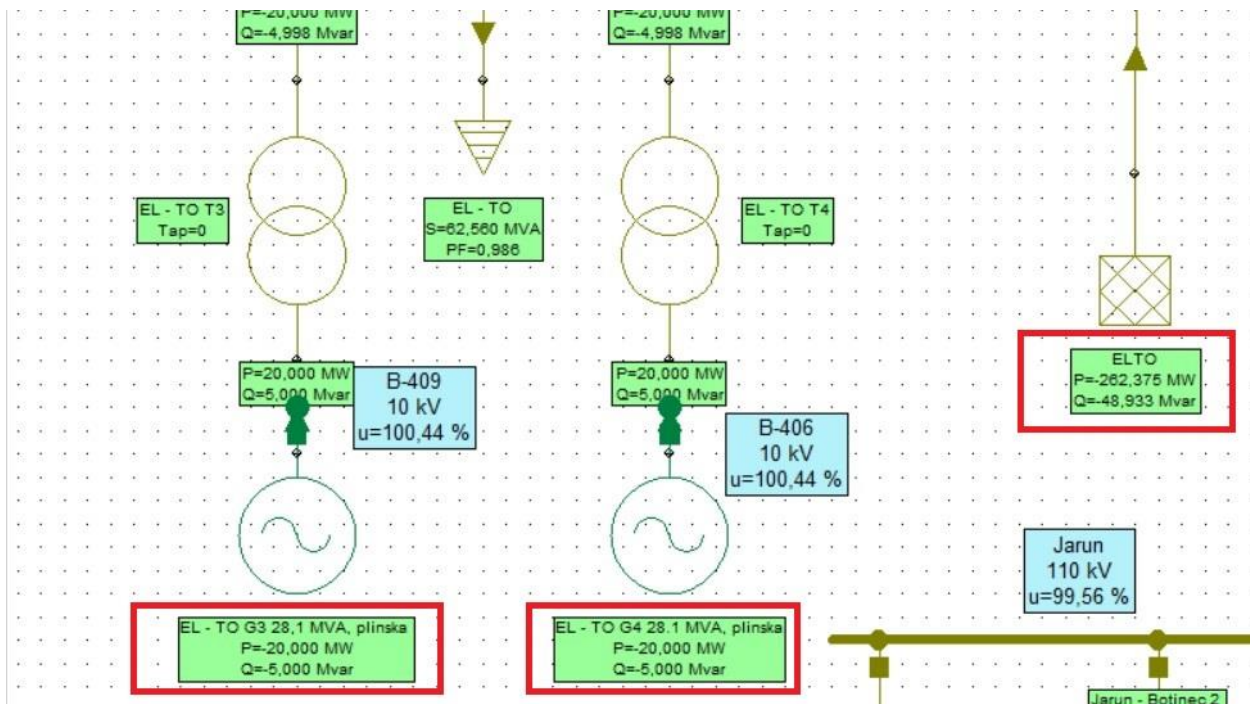
Slika 5.8 Zadavanje snage za generator G3

Generator G3 postavljen je u način rada „PQ“ što znači da se mu ručno može zadati vrijednost koju će on proizvoditi, a to su 20 MW od njegove ukupne snage od 28,1 MVA te 5 MVar.

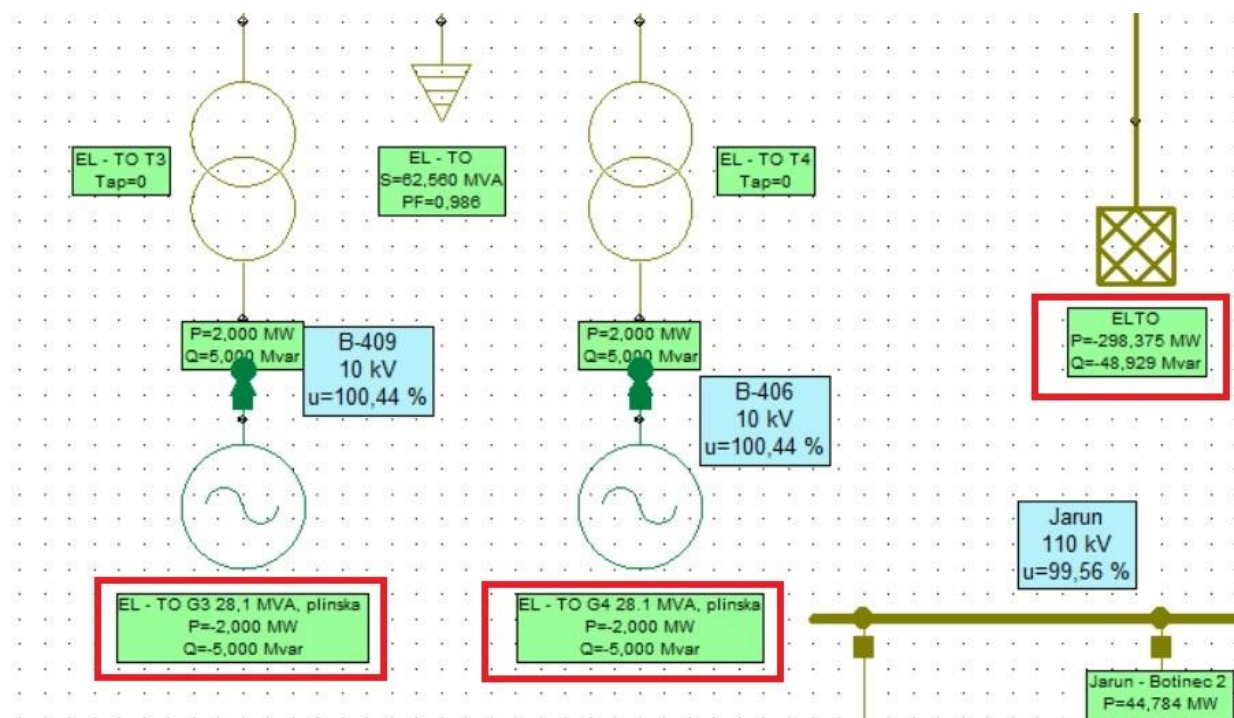




Slika 5.9 Zadavanje snage za G4



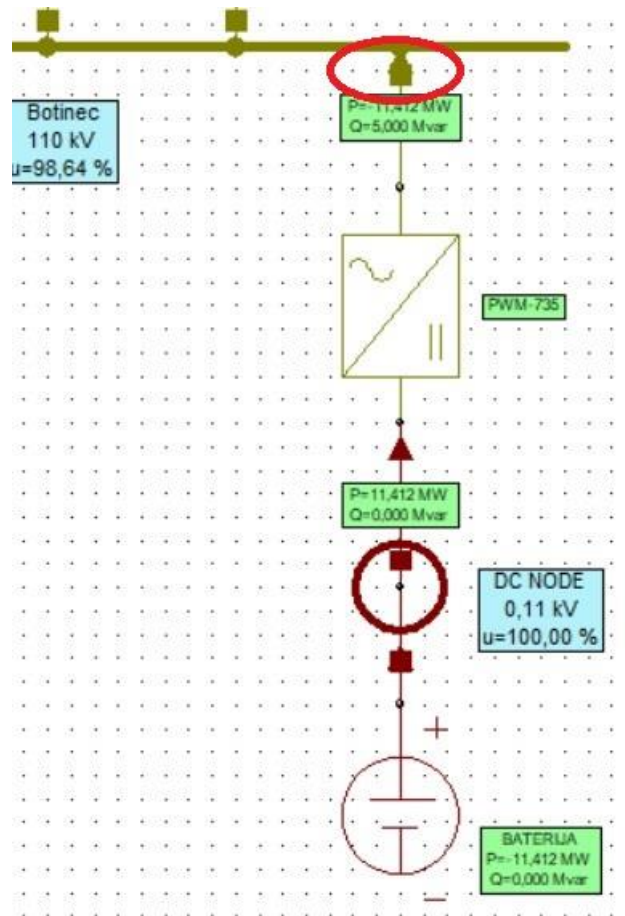
Slika 5.10 Simulacija s početnim parametrima



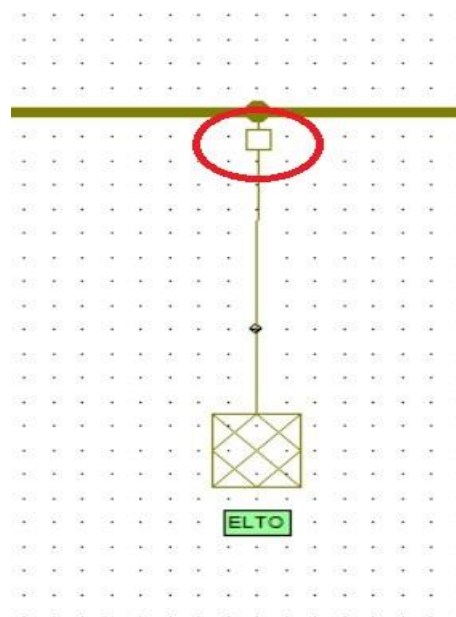
Slika 5.9 Promjena parametara za G3 i G4

Nakon zadanih parametara i izvršenih simulacija na slici 5.11 vidljivi su rezultati prve simulacije. Prva simulacija obuhvaća mrežu Zagrebačkog prstena kako je i navedeno u naslovu, bez baterije samo pomoću aktivne mreže. U drugom ciklusu simulacije zadani su drugačiji parametri za generatore G3 i G4. Maksimalna snaga tih generatora zadana je na 28,1 MW. U postavkama su promijenjeni za razliku od prve simulacije. S prvotnih 20 MW vrijednost snage spuštena je na svega 2 MW. Prema tome se radi usporedba preko aktivne mreže ELTO. Na slici 5.12 vidljivo je da je izlazna snaga iz aktivne mreže -262,375 MW. Kada se smanji proizvodnja generatora G3 i G4 što je vidljivo na slici 5.13 izlazna snaga na aktivnoj mreži ELTO poraste na -298,375 MW. Sam predznak „-“ na aktivnoj mreži, ali i u svim ostalim elementima mreže govori nam da ta komponenta daje u mreži. U prvoj simulaciji više se proizvodi preko generatora, pa je stoga aktivna mreža trebala manje nadoknađivati dok je u drugoj proizvodnja generatora smanjena te to rezultira porastom kod aktivne mreže, tj. aktivna mreža je trebala nadoknađivati snagu zbog manjka proizvodnje. Aktivna mreža u ovom slučaju sve regulira.

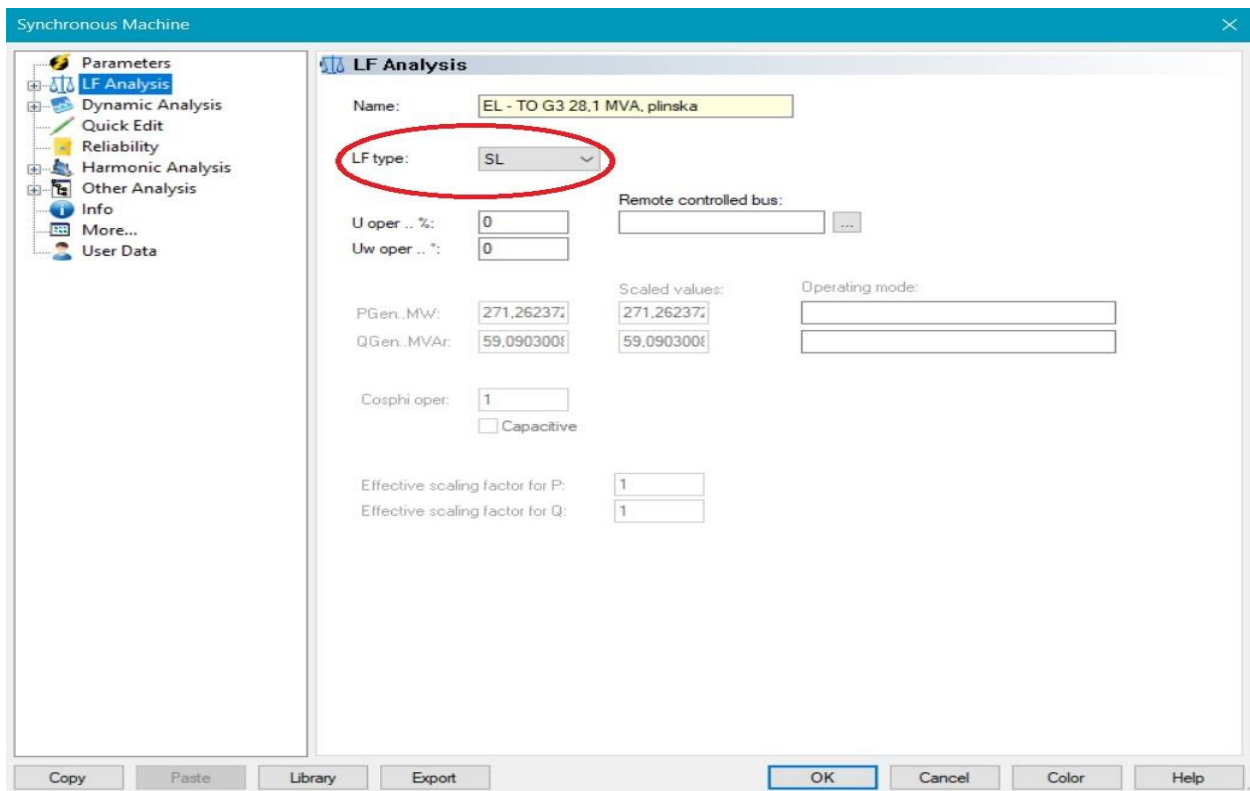
## 5.6. Simulacija s isključenom aktivnom mrežom sa priključenom baterijom (izvanredno pogonsko stanje)



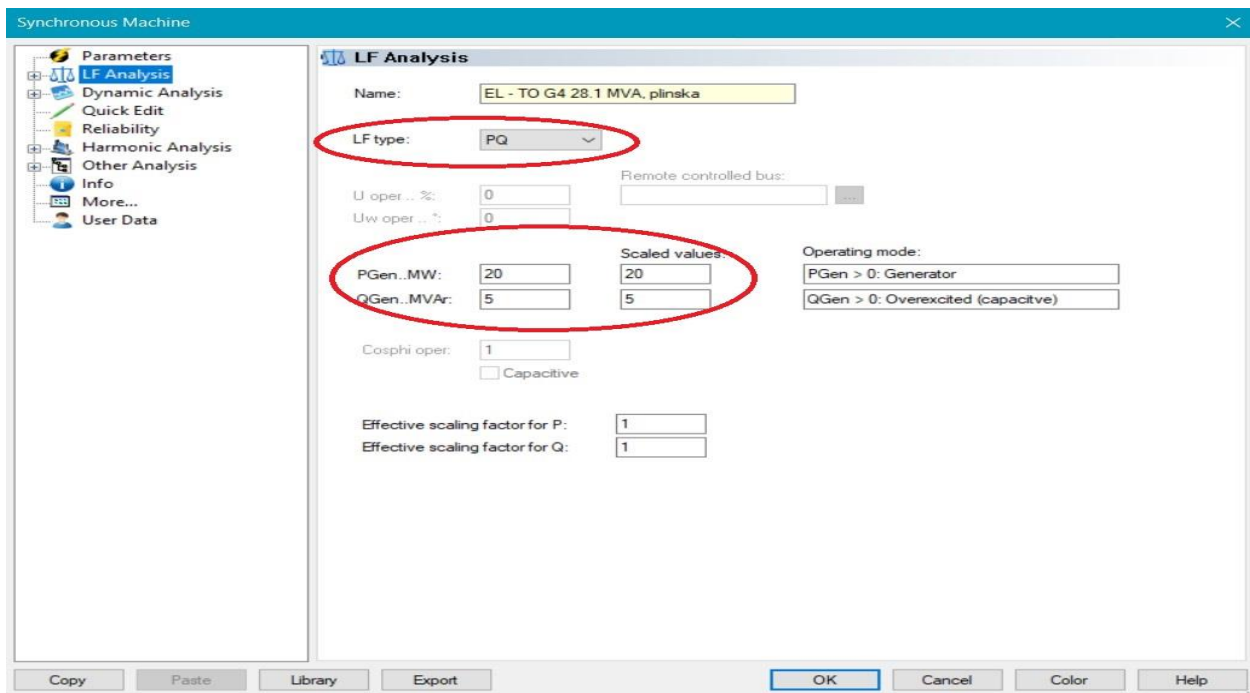
Slika 5.10 Prekidač koji spaja bateriju na mrežu je uključen (crveni krug)



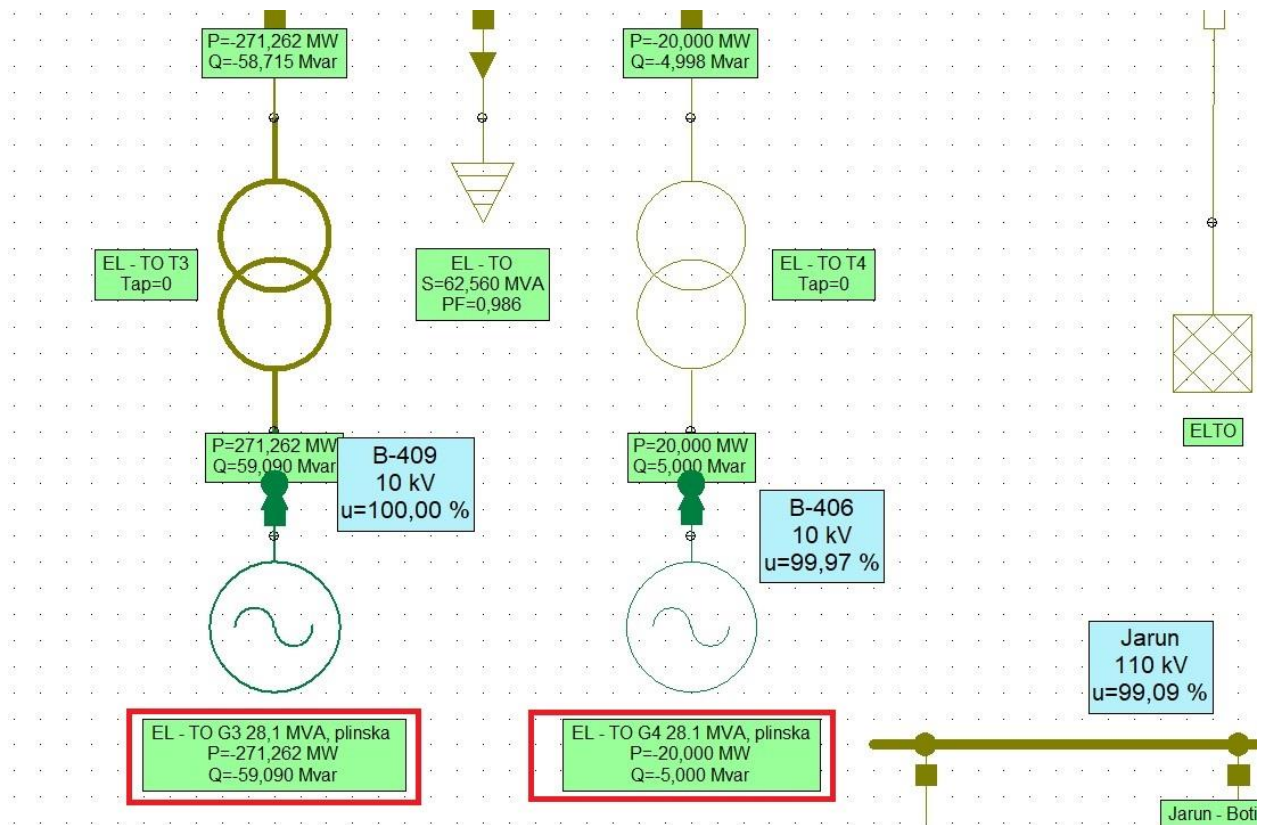
Slika 5.11 Prekidač na aktivnoj mreži isključen (crveni krug)



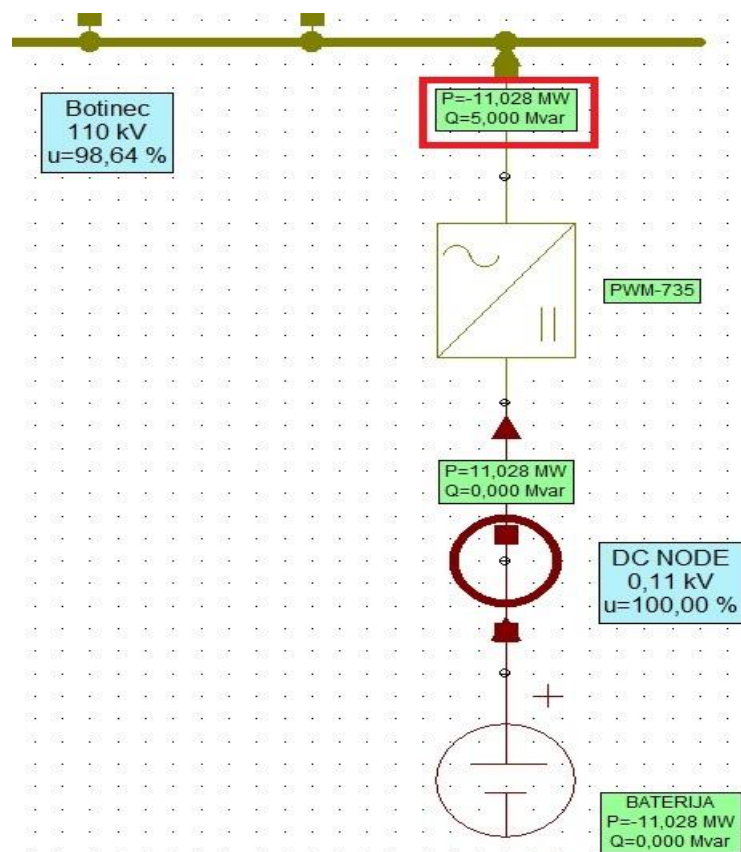
Slika 5.14 Postavljanje generatora G3 u SL režim rada



Slika 5.125 Postavljanje generatora G4 u PQ režim rada



Slika 5.13 Rezultati na generatorima G3 i G4



Slika 5.14 Rezultati na baterijskoj strani

U ovom slučaju nemamo aktivne mreže pa bi to moglo predstavljati neki oblik ispada, nego su nam preostali samo generatori. Generatori mogu nadoknađivati gubitke, ali ne mogu beskonačno pa u tome slučaju baterija igra svoju ulogu. Baterija na udaljenim sabirnicama regulira napon sa svojim 11.028 MW. Generator G3 je podešen na „SL“ mod rada što je prikazano na slici 5.16. To znači da generator sa svojim regulatorom napona sam regulira. G4 je u „PQ“ režimu rada što znači da taj generator mora stalno raditi s unaprijed definiranim snagama što je prikazano na slici 5.17

Kada aktivne mreže nema baterija na sebe preuzima svu ulogu. Ona regulira napon što zapravo bateriju prikazuju kao pomoćnu uslugu brze inercije tj. brzog reguliranja napona. U ovom slučaju baterija se ne koristi za skladištenje energije nego za brzu regulaciju. Na slici 5.18 vidi se da je generator G4 u „PQ“ režimu rada tj. da mu je podešena vrijednost snage koju će proizvoditi, dok je G3 u „SL“ režimu rada.

## 6. Zaključak

Baterijski spremnici električne energije su postala tehnološki vrlo napredna na području elektroenergetike. Za razliku od nekadašnjih metoda kada se proizvodnja i potražnja električne energije uspostavljala kompliciranim upravljanjem snage, sada se koriste baterijski spremnici koji tu zadaću obavljaju puno bolje i efikasnije. Pomoću baterijskih spremnika uveliko se ubrzava čitav proces te se smanjuju gubitci koji nastaju zbog nekog izvanrednog događaja.

Ključni dijelovi baterijskog spremnika su svakako baterije. Razrađeni su osnovni principi rada koji uvelike pomažu korisnicima da u konačnici izaberu pravilnu bateriju. Naime, svaka baterija opisana u ovom radu ima svoju prednost i nedostatke. Također, kada se obavlja studija izvodljivosti potrebno je sve proučiti te pomno izabrati bateriju jer svaka ima svoje područje rada u kojem je najbolja. Uz sve nužne opise posebno je potrebno obratiti pozornost na održavanje baterije. Sama definicija održavanja govori da neki sustav održimo istim tj. nepromjenljivim u odnosu na stanje u kojem je stavljen u funkciju.

Uloga baterijskog spremnika prikazana je u simulaciji. Simuliran je rad kada imamo normalno stanje u elektroenergetskom sustavu, te kada iz nekog razloga dolazi do izvanrednog događaja koji baterijski spremnik nadoknađuje umjesto aktivne mreže. Baterijski spremnik provjerava stanje u mreži te u slučaju izvanrednog događaja stavlja sebe na raspolaganje kako bi nadoknadio gubitke.

Rad na baterijskim sustavima za mene je predstavio veliko iskustvo. Opisani su dijelovi, izvršena simulacija i istraženo je puno literature koje su omogućile da sve bude sjedinjeno u cjelinu. Uz samu literaturu, puno vremena je uloženo u upravljanju s programskim paketom Neplan što je za mene predstavilo veliki napredak u obavljanju ostalih operacija s istim.

## 7. Literatura

[1] Razumović, K. (2016). *Spremnici električne energije u distribucijskoj mreži* (Diplomski rad). Preuzeto s <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:846646>

[2] DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA 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. Preuzeto s <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/08/f2/ElecStorageHndbk2013.pdf> 19.08.2021

[3]

[https://www.hocired.hr/images/OPATIJA2018/Referati\\_po\\_studijskim\\_odborima/SO5/SO5-17.pdf](https://www.hocired.hr/images/OPATIJA2018/Referati_po_studijskim_odborima/SO5/SO5-17.pdf) dostupno 25.07.2021.

[4] <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/08/f2/ElecStorageHndbk2013.pdf> dostupno 09.08.2021

[5] Stanković, V. (2017). *Spremnici električne energije u mikromrežama* (Diplomski rad). Preuzeto s <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:166918ž>

[6]

[https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/BRP\\_ENERGY/BRP\\_ENERGY\\_HR.pdf](https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/BRP_ENERGY/BRP_ENERGY_HR.pdf) dostupno 19.08.2021

[7] Milić, M. (2017). Isplativost tehnologija za skladištenje energije u pokrivanju energetske potrebe Grada Dubrovnika iz obnovljivih izvora energije (Završni rad). Preuzeto s <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:051703>

[8] <https://technoluxpro.com/hr/akkumulatory/avtomobilnye/agm-vrla.html>

dostupno 14.08.2021

[9] [https://www.marketing-odjel.com/povijest\\_baterija](https://www.marketing-odjel.com/povijest_baterija) dostupno 11.08.2021

[10] [https://www.everexceed.com/nickel-cadmium-battery\\_sp](https://www.everexceed.com/nickel-cadmium-battery_sp) dostupno 19.08.2021



[11]

[https://www.researchgate.net/publication/276026997\\_Modelling\\_and\\_Simulation\\_of\\_a\\_Fly\\_wheel\\_Energy\\_Storage\\_System\\_for\\_Microgrids\\_Power\\_Plant\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/276026997_Modelling_and_Simulation_of_a_Fly_wheel_Energy_Storage_System_for_Microgrids_Power_Plant_Applications)

dostupno 15.08.2021

[12] Skok, S. (2002). Besprekidni izvori napajanja, Zagreb, listopad 2002.

[13] <http://www.amdcenergy.com/battery-energy-storage-system.html>

dostupno 24.06.2021

[14] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Reverzibilne\\_hidroelektrane](https://hr.wikipedia.org/wiki/Reverzibilne_hidroelektrane)

dostupno 19.08.2021

[15] Skok, S (2021). Predavanja: Razvod električne energije – hidroelektrane, vodne turbine, Sveučilište Sjever, SC Varaždin, ožujak 2021.

[16] <https://www.hep.hr/proizvodnja/hidroelektrane-1528/pp-he-jug/rhe-velebit/1546>

dostupno 28.07.2021

[17] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Skladi%C5%A1tenje\\_energije\\_komprimiranim\\_zrakom](https://hr.wikipedia.org/wiki/Skladi%C5%A1tenje_energije_komprimiranim_zrakom)

dostupno 17.07.2021

[18] <https://www.duracell.com/en-us/products/c/>

dostupno 10.7.2021

[19] <https://www.sciencephoto.com/media/656811/view/plante-accumulator-battery-1859>

dostupno 09.07.2021

[20] <https://technoluxpro.com/hr/akkumulatory/avtomobilnye/agm-vrla.html>

dostupno 01.07.2021

[21]

<https://www.amazon.de/ECTIVE-Batterie-EDC-Serie-Versorgungsbatterie>

[Varianten/dp/B0187AS6J6](https://www.amazon.de/ECTIVE-Batterie-EDC-Serie-Versorgungsbatterie-Varianten/dp/B0187AS6J6) dostupno 29.7.2021

[22] <https://www.ngk-insulators.com/en/product/nas-solutions.html>

dostupno 30.08.2021

[23] <https://www.lithium-battery-factory.com/how-does-a-lithium-ion-battery-work/>

dostupno 24.06.2021

[24] <https://electropapa.com/en/li-ion-battery-1800mah-7-4v-for-model-making-revell-big-one-next-23981-2>

dostupno 27.06.2021

[25] [https://ssm.hr/2020/03/03/vrste-baterija-za-pogon-hibridnih-i-elektricnih-plovila/?utm\\_source=rss&utm\\_medium=rss&utm\\_campaign=vrste-baterija-za-pogon-hibridnih-i-elektricnih-plovila](https://ssm.hr/2020/03/03/vrste-baterija-za-pogon-hibridnih-i-elektricnih-plovila/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=vrste-baterija-za-pogon-hibridnih-i-elektricnih-plovila)

dostupno 19.07.2021

[26] <https://faszinationchemie.de/wissen-und-fakten/news/brom-eines-von-zwei-fluessigen-elementen/> dostupno 19.08.2021

[27] <https://www.neplan.ch/demoprogramm/?lang=de> dostupno 04.07.2021

[28] <https://www.neplan.ch/wp-content/uploads/2015/01/Electricity.pdf>

dostupno 30.08.2021

[29]

[https://www.researchgate.net/publication/296939178\\_Energy\\_storage\\_Fundamentals\\_materials\\_and\\_applications\\_second\\_edition](https://www.researchgate.net/publication/296939178_Energy_storage_Fundamentals_materials_and_applications_second_edition)

dostupno 30.08.2021

[30] <https://www.poslovni.hr/hrvatska/u-susjedstvu-pocela-era-skladistenja-struje-360028>

dostupno 30.08.2021

[31] <https://cleanpower.org/facts/clean-energy-storage/>

dostupno 04.09.2021

[32] izvor slike: Mario Klarić, član uprave – direktor, Professio Energia d.d – Zagreb

## Popis slika

|   |    |
|---|----|
| Slika 2.1 Prikaz vremenskog razdvajanja [1] .....   | 4  |
| Slika 2.2 Prikaz opterećenja sa i bez regulacije [1] .....  | 5  |
| Slika 2.3 Uspostava frekvencije mreže nakon poremećaja [2].....                                   | 7  |
| Slika 2.4 Kvaliteta električne energije.....  | 8  |
| Slika 3.1 Reverzibilna hidroelektrana [15].....   | 10 |
| Slika 3.2 RHE Velebit [16].....   | 11 |
| Slika 3.3 Shematski prikaz skladištenja energije komprimiranim zrakom [7].....                    | 12 |
| Slika 3.4 Struktura sustava temeljenog na pohrani energije principom zamašnjaka [11] .....        | 13 |
| Slika 3.5 Baterija [18].....  | 14 |
| Slika 3.6 Punjiva baterija od Gastona Planté -a [19] .....  | 15 |
| Slika 3.7 VRLA baterija [20] .....  | 16 |
| Slika 3.8 AGM baterija [21] .....   | 17 |
| Slika 3.9 Ni - Cd (nikl - kadmijaska) baterija .....  | 18 |
| Slika 3.10 Shematski prikaz rada NaS baterije [1] .....   | 19 |
| Slika 3.11 Presjek NaS baterije [2].....  | 20 |
| Slika 3.12 Rokkasho (Japan) - farma vjetroelektrana - na slici baterijski spremnici NaS [22]..... | 21 |
| Slika 3.13 Princip rada Li - ion baterije [23] .....  | 22 |
| Slika 3.14 Li - ionska baterija malog kapaciteta [24].....  | 23 |
| Slika 3.15 Natrij- nikal- klorid baterija [5].....  | 24 |
| Slika 3.16 Princip rada VRB baterije [2].....   | 25 |
| Slika 3.17 Shematski prikaz cink - brom baterije [26] .....                                       | 26 |
| Slika 4.1 Postrojenje baterijskih spremnika [30].....   | 29 |
| Slika 4.2 12.5 MWh Sisak, Hrvatska [32].....  | 30 |
| Slika 4.3 Shematski prikaz baterijskog spremnika i primarni dijelovi [13] .....                   | 31 |
| Slika 5.1 Simbol tvrtke Neplan [28].....  | 33 |
| Slika 5.2 Zagrebački prsten .....   | 35 |
| Slika 5.3 Baterijski spremnik.....  | 36 |
| Slika 5.4 Zadane vrijednosti za baterijski spremnik.....  | 38 |
| Slika 5.5 Zadane vrijednosti za izmjenjivač .....   | 39 |
| Slika 5.6 Prekidač koji spaja bateriju na mrežu je isključen (crveni krug) .....                  | 40 |
| Slika 5.7 Prekidač na aktivnoj mreži uključen (crveni krug) .....                                 | 41 |
| Slika 5.8 Zadavanje snage za generator G3.....  | 41 |
| Slika 5.9 Zadavanje snage za G4.....  | 42 |

|   |    |
|---|----|
| Slika 5.10 Simulacija s početnim parametrima .....                              | 42 |
| Slika 5.11 Promjena parametara za G3 i G4 .....                                 | 43 |
| Slika 5.12 Prekidač koji spaja bateriju na mrežu je uključen (crveni krug)..... | 44 |
| Slika 5.13 Prekidač na aktivnoj mreži isključen (crveni krug).....              | 44 |
| Slika 5.14 Postavljanje generatora G4 u PQ režim rada.....                      | 45 |
| Slika 5.15 Postavljanje generatora G3 u SL režim rada .....                     | 45 |
| Slika 5.16 Rezultati na generatorima G3 i G4.....                               | 46 |
| Slika 5.17 Rezultati na baterijskoj strani .....                                | 46 |

## Popis tablica

|   |    |
|---|----|
| Tablica 3.1 Karakteristike NaS baterije [2] ..... | 20 |
| Tablica 5.1 Podaci o vodovima .....               | 37 |
| Tablica 5.2 Snage generatora.....                 | 37 |
| Tablica 5.3 Podaci o generatorima 1 .....         | 37 |
| Tablica 5.4 Podaci o generatorima 2 .....         | 37 |
| Tablica 5.5 Podaci aktivne mreže.....             | 37 |
| Tablica 5.6 Podaci o teretima .....               | 37 |



IZJAVA O AUTORSTVU  
I  
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, NIKOLA VINCELJ pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor završnog rada pod naslovom Uloga spremnika električne energije u naprednim elektroenergetskim mrežama te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student:  
*Nikola Vincelj*

*Vincelj Nikola*  
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, NIKOLA VINCELJ neopozivo izjavljujem da sam suglasan s javnom objavom završnog rada pod naslovom Uloga spremnika električne energije u naprednim elektroenergetskim mrežama čiji sam autor.

Student:  
*Nikola Vincelj*

*Vincelj Nikola*  
(vlastoručni potpis)