

Alokacija sustava pohrane energije u mirkomreži

Čalić, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:848311>

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 INFORMACIJ-
SKIH TEHNOLOGIJA**

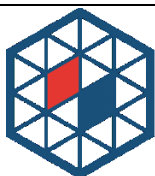
Sveučilišni studij

**ALOKACIJA SUSTAVA POHRANE ENERGIJE U MIK-
ROMREŽI**

Diplomski rad

Ivan Čalić

Osijek, 2022.

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

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit

Osijek, 05.09.2022.

Odboru za završne i diplomske ispite

Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit

Ime i prezime Pristupnika:	Ivan Čalić
Studij, smjer:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	D-1312, 11.10.2020.
OIB studenta:	80949645565
Mentor:	Prof. dr. sc. Predrag Marić
Sumentor:	,
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	Izv. prof. dr. sc. Hrvoje Glavaš
Član Povjerenstva 1:	Prof. dr. sc. Predrag Marić
Član Povjerenstva 2:	Ružica Kljajić, mag. ing. el.
Naslov diplomskog rada:	Alokacija sustava pohrane energije u mirkomreži
Znanstvena grana diplomskog rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak diplomskog rada:	Zadatak diplomskog rada jest određivanje optimalne lokacije integracije kao i veličine spremnika energije s obzirom na gubitke djelatne snage i naponske prilike napredne mreže. Nakon teorijskog pregleda optimizacijskih metoda i izrade simulacijskog modela napredne mreže, kroz scenarije povećanja simetričnog i nesimetričnog opterećenja kao i različite režime pogona integriranih OIE, u diplomskom je radu potrebno odrediti optimalan smještaj i instaliranu snagu spremnika energije u naprednoj mreži. (Tema je unaprijed dogovorena s diplomantom Ivan Čalić)
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: 3 razina
Datum prijedloga ocjene od strane mentora:	05.09.2022.
Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	<i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i>
	Datum:

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

Osijek, 25.09.2022.

Ime i prezime studenta:

Ivan Čalić

Studij:

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

Mat. br. studenta, godina upisa:

D-1312, 11.10.2020.

Turnitin podudaranje [%]:

10

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Alokacija sustava pohrane energije u mikromreži**

izrađen pod vodstvom mentora Prof. dr. sc. Predrag Marić

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	1
1.1 Opis zadatka	2
2. PREGLED LITERATURE	3
3. SUSTAVI ZA POHRANU ELEKTRIČNE ENERGIJE	4
3.1 Pohrana električne energije pomoću mehaničkih sustava	5
3.1.1 Pohrana električne energije uz pomoć komprimiranog zraka.....	5
3.1.2 Pohrana električne energije pomoću crpno – akumulacijskih hidroelektrana	6
3.1.3 Pohrana električne energije uz pomoć zamašnjaka	7
3.2 Pohrana električne energije pomoću elektrokemijskih sustava	8
3.2.1 Pohrana energije pomoću olovno – kiselinskih baterija	8
3.2.2 Pohrana energije pomoću litij – ionskih baterija	8
3.2.3 Pohrana energije pomoću redoks protočnih baterija.....	9
3.3 Pohrana električne energije pomoću kemijskih sustava	10
3.3.1 Pohrana energije pomoću vodika.....	10
3.3.2 Pohrana energije pomoću sintetičkog prirodnog plina	10
3.4 Pohrana električne energije pomoću električnih sustava.....	11
3.4.1 Pohrana energije pomoću supravodljivog magnetskog svitka.....	11
3.4.2 Pohrana energije pomoću ultra kondenzatora.....	12
3.5 Pohrana električne energije pomoću termičkih sustava	12
3.5.1 Pohrana energije kao topline.....	12
4. MIKROMREŽE	13
4.1 Usporedba svojstava mikromreže i konvencionalne distribucijske mreže.....	13
4.2 Prednosti mikromreža.....	14
5. OPTIMIZACIJSKE METODE ODREĐIVANJA ALOKACIJE SUSTAVA POHRANE ENERGIJE	15

5.1 Evolucijski algoritmi	17
5.1.1. Genetski algoritam	17
5.1.2. Optimizacija temeljena na roju čestica	18
5.1.3. Optimizacija temeljena na koloniji mrava	19
5.1.4. Algoritam temeljen na umjetnoj pčelinjoj koloniji.....	19
5.2. Numeričke metode.....	20
5.2.1. Analitička metoda	20
5.2.2. Metode linearnog programiranja.....	21
5.2.3. Metode nelinearnog programiranja.....	21
5.3. Metode tokova snaga	21
5.3.1. Newton - Raphsonova metoda	22
5.3.2. Gauss – Siedelova metoda	22
5.4. Umjetna neuronska mreža	23
6. ANALIZA ALOKACIJE SUSTAVA ZA POHRANU ENERGIJE U PROGRAMSKOJ PODRŠCI DIGSILENT POWER FACTORY	26
6.1 Prvi slučaj – analiza strujno – naponskih prilika sustava bez integracije baterijskog spremnika.....	27
6.2 Drugi slučaj – integracija baterijskih spremnika na sabirnice najnižeg napona.....	31
6.3 Treći slučaj – povećanje snage baterijskih spremnika.....	40
6.4 Četvrti slučaj – integracija baterijskih spremnika na sve sabirnice u sustavu.....	51
6.5 Usporedba gubitaka svih provedenih simulacija	60
7. ZAKLJUČAK	62
LITERATURA.....	64
SAŽETAK.....	67
SUMMARY	67
ŽIVOTOPIS	68

1. UVOD

Poboljšanjem performansi elektroničkih i komunikacijskih tehnologija, nastoji se izvršiti što veća implementacija u postojeći elektroenergetski sustav. Cilj je minimiziranje gubitaka i utjecaja obnovljivih izvora energija na mrežu, kao i postizanje što kvalitetnijeg nadzora nad sustavom. Obnovljivi izvori energije s pratećim naprednim tehnologijama komunikacije integrirane u distribucijsku mrežu čine mikromrežu. Kroz rad biti će opisano od čega se mikromreža sastoji, te koji su i na koji način djeluju sustavi pohrane energije koji su sastavni dio takve mreže. Sustavi pohrane koji su integrirani u mikromrežu imaju zadatak opskrbiti energijom sustav ovisno o promjeni opterećenja koje je diktirano od strane potrošača ili korisnika. Takvi sustavi imaju mogućnosti davanja ili primanja energije. Pored već navedenih elemenata ovakve mreže, sastavni dio mikromreža često čine još i električna vozila sa svojim punionicama koji dodatno, kao nelinearna trošila, mogu utjecati na strujno – naponske prilike. Mikromreža s pratećim naprednim tehnologijama omogućuje praktičniji nadzor preko centralnih komunikacijskih sustava koji vrše nadzor integracije obnovljivih izvora energije, baterijskih spremnika, punionica i električnih vozila. Diplomski rad se sastoji od sedam poglavlja, među kojima teoretski dio predstavljaju uvod, pregled literature, sustavi pohrane električne energije, mikromreže te optimizacijske metode za određivanje alokacije sustava pohrane. Nakon teorijskog uvoda, u radu će biti predstavljena analiza i simulacija alokacije sustava pohrane energije u mikromreži, temeljena na analitičkoj metodi. Metode koje služe za određivanje optimalne lokacije za spremnike energije biti će pojašnjenje u nastavku rada. Koncept metoda temeljena je na matematičkom modelu, a na osnovu prikupljenih podataka za svaku lokaciju može se odrediti i analitičkim putem. Razvojem računalnih sustava i programa, dolazi se do lakšeg pronalaska optimalne lokacije za spremnike uz pomoć unaprijed postavljenog programskog koda. Pored mjerenja i simulacija, računalni sustavi se koriste za nadzor i kontrolu snaga, napona i frekvencije unutar mikromreže, dok se u budućnosti takav nadzor želi približiti i samim kupcima odnosno potrošačima.

Simulacija alokacije spremnika energije u mikromrežama biti će provedena u programskom paketu DIGSILENT Power Factory. U fokus će se staviti analitička metoda određivanja alokacije spremnika energije.

1.1 Opis zadatka

Zadatak diplomskog rada jest određivanje optimalne lokacije integracije kao i veličine spremnika energije s obzirom na gubitke djelatne snage i naponske prilike napredne mreže. Nakon teorijskog pregleda optimizacijskih metoda i izrade simulacijskog modela mikromreže, kroz scenarije povećanja simetričnog i nesimetričnog opterećenja kao i različite režime pogona integriranih OIE, u diplomskom je radu potrebno odrediti optimalan smještaj i instaliranu snagu spremnika energije u mikromreži. Analiza i simulacija je rađena u programskom paketu DIgSILENT Power Factory na ispitnom IEEE 13 Bus sustavu.

2. PREGLED LITERATURE

Literatura [1] govori o različitim načinima pohrane električne energije, kao što su : mehanička pohrana, električna pohrana, kemijska pohrana, elektrokemijska pohrana te termička pohrana. Prilikom objašnjenja svake vrste pohrane pojedinačno, naglasak se stavlja na vrijeme pražnjenja te naravno njihovu učinkovitost, što je jedan od najbitnijih faktora pojedinih sustava pohrane električne energije.

Autor literature [2] pojašnjava vrstu protočne baterije koja je korištena kao elektrokemijski sustav za pohranu električne energije. Riječ je o redoks protočnim baterijama. Uz objašnjeni proces punjenja i pražnjenja redoks protočnih baterija, točnije reakcijama kemijske redukcije i oksidacije koje se događaju prilikom procesa, literatura [2] također daje uvid u mogućnost kompletnog odvajanja snage i energije.

Pošto se još uvijek u svijetu većinski koriste neobnovljivi izvori energije, a potrebe za električnom energijom iz godine u godinu rastu, autor literature [3] objašnjava potrebu za primjenom izvora električne energije koji su obnovljivog karaktera. Usporedbom svojstava tzv. mikromreže i trenutne mreže, objašnjeno je kako mikromreža posjeduje bolju iskoristivost imovine te analogno tome su i troškovi minimalizirani, uz ostale razne prednosti.

Mikromreža posjeduje značajna poboljšanja u odnosu na trenutnu mrežu, što je pojašnjeno literaturom [4]. Analogno tome, mikromreža je poboljšana svojstvom samooporavka, odnosno predviđanjem i reakcijom na neželjene poremećaje, što rezultira boljom ekonomskom isplativosti kao i većom učinkovitosti.

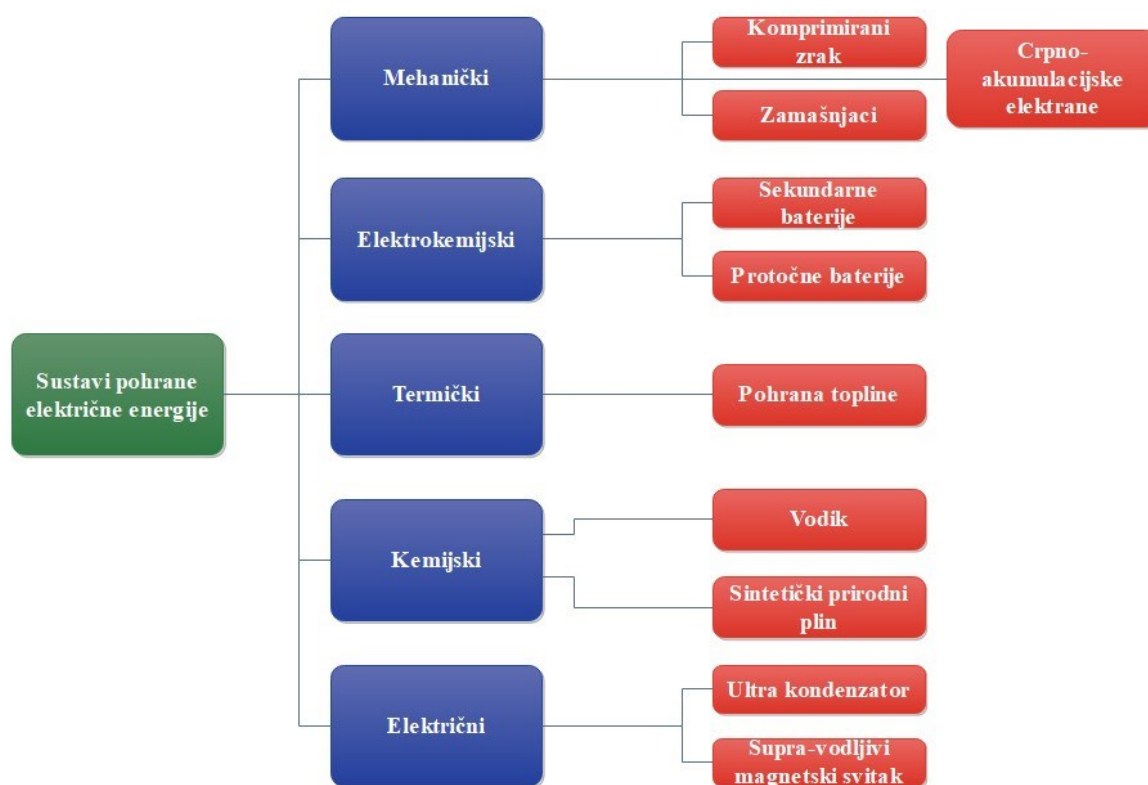
Kako bi se bolje prikazale razlike između mikromreže i konvencionalne distribucijske mreže, u literaturi [5] su navedena svojstva mikromreže te konvencionalne distribucijske mreže. Mikromreža također posjeduje i razne ranjivosti zbog kojih je podložna budućim sigurnosnim napadima. Uz navedene ranjivosti objašnjena su i razna rješenja kako ih spriječiti da se razina sigurnosti maksimizira.

Literaturom [6] je prikazana primjena mikromreža odnosno njezina tehnologija te su objašnjenja pojedina područja tehnologija mikromreže koja obuhvaćaju cijeli elektroenergetski sustav. To podrazumijeva proces od proizvodnje električne energije, prijenosa i distribucije električne energije, do različitih potrošača električne energije.

3. SUSTAVI ZA POHRANU ELEKTRIČNE ENERGIJE

Pristup koji je najzastupljeniji prilikom podjele sustava koji pohranjuju električnu energiju je upravo prema korištenom obliku energije. Sustavi pohrane električne energije dijele se na pet različitih vrsta te su podjele prikazane slikom 3.1 [1].

Mehanički sustavi pohrane najčešće koriste vodu, zrak ili rotirajući cilindar za pohranu energije. Elektrokemijski sustavi podrazumijevaju skladištenje električne energije pomoću različitih baterijskih spremnika energije. Termički sustavi pohrane podrazumijevaju skladištenje energije u obliku topline. Kemijski sustavi koriste vodik i plin, odnosno tlak, za pohranu električne energije. Električni sustavi upotrebljavaju kondenzator i magnetski svitak kako bi pohranili električnu energiju.



Slika 3.1 Prikaz podjele sustava za pohranu električne energije [1]

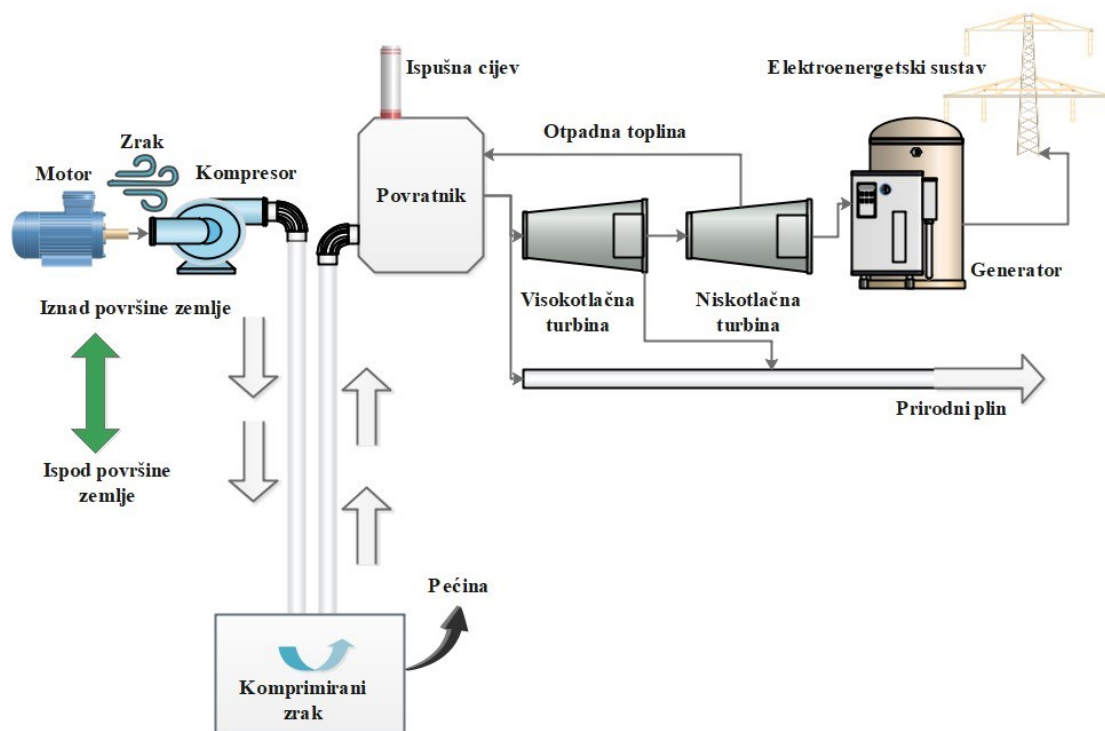
3.1 Pohrana električne energije pomoću mehaničkih sustava

Među mehaničkim sustavima pohrane energije, najzastupljeniji načini pohrane su :

- Pohrana električne energije pomoću crpno – akumulacijskih hidroelektrana
- Pohrana električne energije uz pomoć komprimiranog zraka
- Pohrana električne energije pomoću zamašnjaka

3.1.1 Pohrana električne energije uz pomoć komprimiranog zraka

Još od 19. stoljeća, primjena sustava za pohranu električne energije koja koristi komprimirani zrak, bila je potrebna u različitim industrijama. Zbog svoje ogromne raspoloživosti, zrak se upotrebljava kao medij za pohranu. Literatura [1] nalaže kako je „električna energija korištena kako bi se zrak kompresirao i pohranio. Mjesto pohrane zraka nalazi se ili u strukturi koja je podzemna ili u nadzemnim spremnicima“.



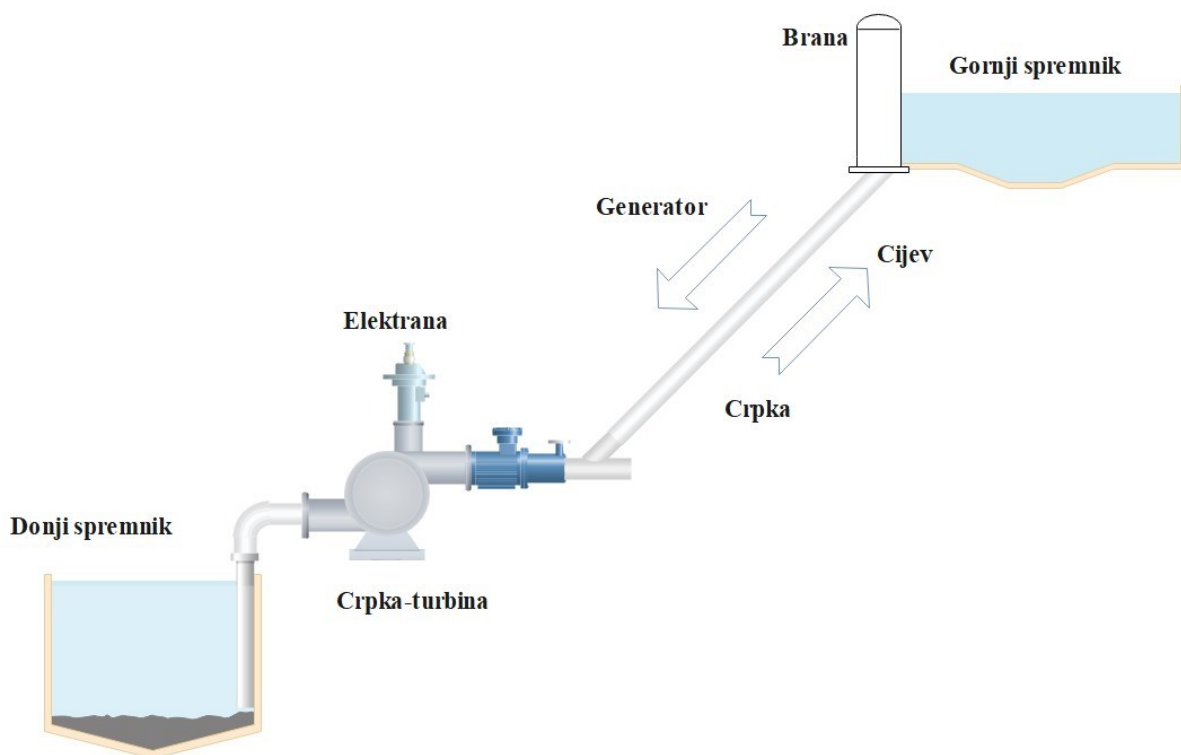
Slika 3.2 Prikaz sustava za pohranu električne energije pomoću komprimiranog zraka [1]

„Glavna prednost pohrane električne energije ovim načinom leži u velikom kapacitetu ali nedostaci uključuju nisku učinkovitost kao i geografsko ograničenje lokacije“, prema autoru literature [1].

3.1.2 Pohrana električne energije pomoću crpno – akumulacijskih hidroelektrana

Uobičajena vrsta crpno – akumulacijskih hidroelektrana posjeduje dva spremnika koja su predodređena za vodu te se spremnici ne nalaze na istima visinama. Za vrijeme malih opterećenja, proces punjenja podrazumijeva uzimanje vode iz donjeg spremnika koja će teći prema gornjem spremniku kao što je i prikazano slikom 2.3. Ukoliko ima potrebe za tim, nakon završetka procesa punjenja će voda poteći iz gornjeg u donji spremnik što rezultira pokretanjem turbine s generatorom i analogno tome se proizvodi električna energija, a to se upravo naziva procesom pražnjenja [1].

Otpriblike 99% sustava za pohranu energije koji su instalirani u svijetu obuhvaćaju crpno – akumulacijske hidroelektrane [1].

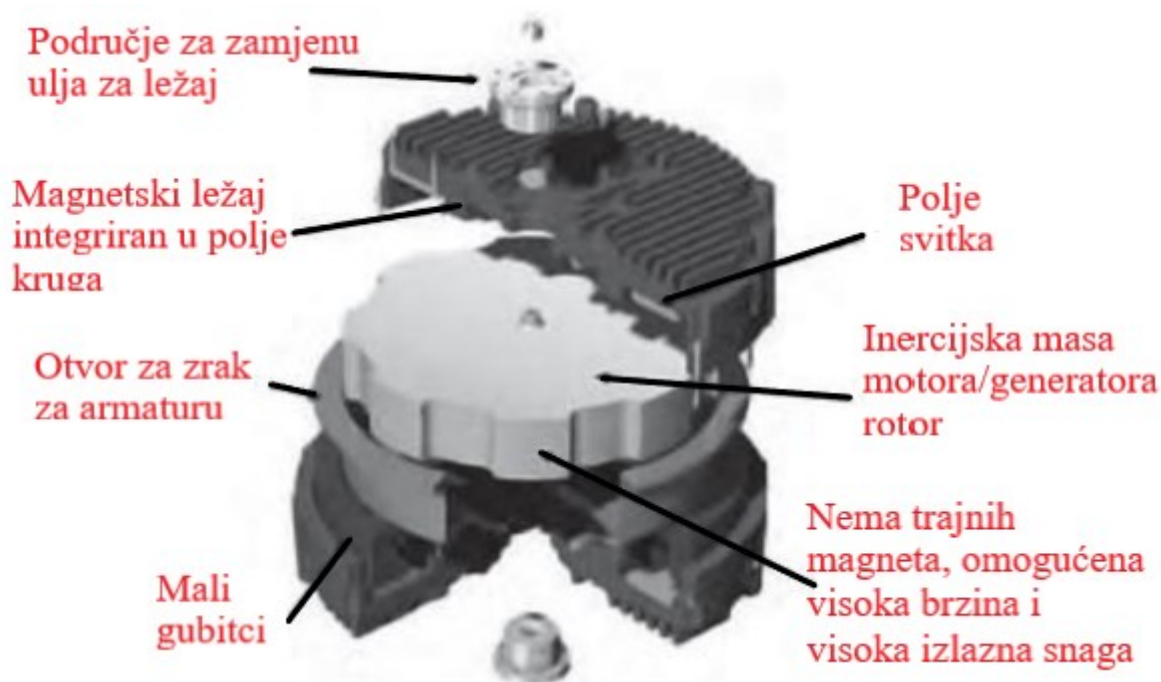


Slika 3.3 „Princip rada akumulacijske hidroelektrane“ [1]

Vrijeme pražnjenja crpno – akumulacijskih hidroelektrana varira između par sati i par dana te im je učinkovitost u rasponu 70-80% [1]. Kod njihovih prednosti treba naglasiti duži vijek trajanja. Što se tiče nedostataka, valja naglasiti ovisnost o topografskim uvjetima te upotrebljavanje većeg dijela zemljišta [1].

3.1.3 Pohrana električne energije uz pomoć zamašnjaka

Literatura [1] navodi da se „pohrana energije pomoću zamašnjaka odvija na način da se rotacijska energija pohranjuje u rotoru masivnog rotirajućeg cilindra, koji je ubrzan“. Iz slike 2.4 se daju primjetiti glavni dijelovi zamašnjaka što podrazumijeva ležajeve, cilindar tj. rotirajuće tijelo te uređaj zadužen za prijenos. Održavanje energije u zamašnjaku se odvija na način zadržavanja konstantne brzine rotirajućeg cilindra. Povećanje brzine uzrokuje i veću pohranu energije. Prilikom dovođenja električne energije, uređaj za prijenos ima svrhu ubrzavanja zamašnjaka, kao i prilikom odvođenja električne energije ima svrhu usporavanja zamašnjaka [1].



Slika 3.4 Prikaz zamašnjaka sa pripadajućim dijelovima [1]

Glavne prednosti zamašnjaka :

- Dugačak vijek trajanja
- Niska potreba za održavanjem
- Kvalitetna stabilnost ciklusa

Glavni nedostaci zamašnjaka :

- Gubici u ležajevima
- Velika razina samopražnjenja uslijed otpora zraka
- Niska učinkovitost

3.2 Pohrana električne energije pomoću elektrokemijskih sustava

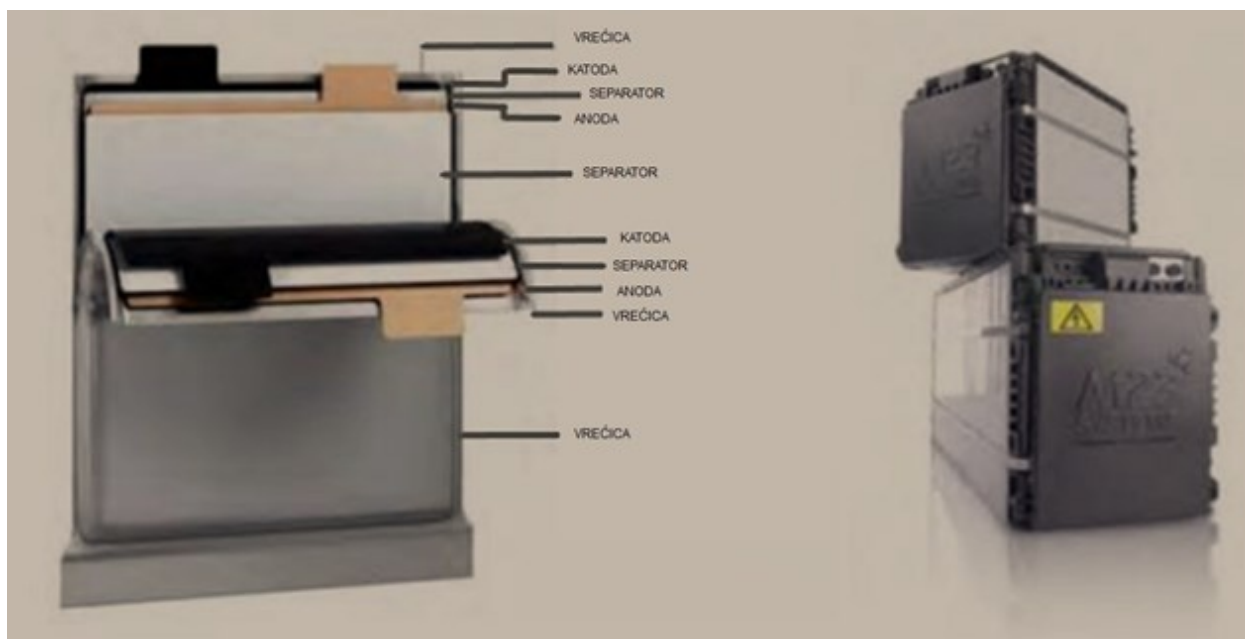
Postoje razne vrste i izvedbe baterija. Zbog važnosti i učestale primjene osobito su razrađene olovno kiselinske i litij – ionske baterije. Uz njih, postoje još četiri vrste sekundarnih baterija kao što su natrij nikal – klorid, nikal metal hibrid tj. starije nikal kadmij, natrij – sumpor te metal zrak. Osim sekundarnih baterija postoje još i dvije vrste protočnih baterija : redoks protočna koja je razrađena posebno, te hibrid protočna. Prema literaturi [1] : „aktivna masa elektroda služi kao mjesto punjenja i pražnjenja energije u konvencionalnim sekundarnim baterijama“ [1].

3.2.1 Pohrana energije pomoću olovno – kiselinskih baterija

Olovno – kiselinske baterije koriste se u komercionalnoj upotrebi još od 1890. godine, te važe za najupotrebljivije baterije u svijetu. Mogu se koristiti i kao mobilne i kao stacionarne. Uobičajeno su upotrebljive kao sustavi napajanja u nuždi, autonomni sustavi s fotonaponom, akumulatori koji se nalaze u vozilima te sustav baterija koje ublažavaju izlazne fluktuacije pomoću energije vjetra. Olovno – kiselinske baterije posjeduju tehnologiju koja je bolje istražena uz nisku cijenu. Glavne prednosti leže u : jednostavnoj i istraženijoj tehnologiji, jednostavnoj reciklaži i kvalitetnom omjeru cijene i performasne. Glavni nedostaci se očituju u njihovoj upotrebi olova, u nižoj gustoći energije i prilikom pražnjenja velike količine energije smanjuje im se korisni kapacitet [1].

3.2.2 Pohrana energije pomoću litij – ionskih baterija

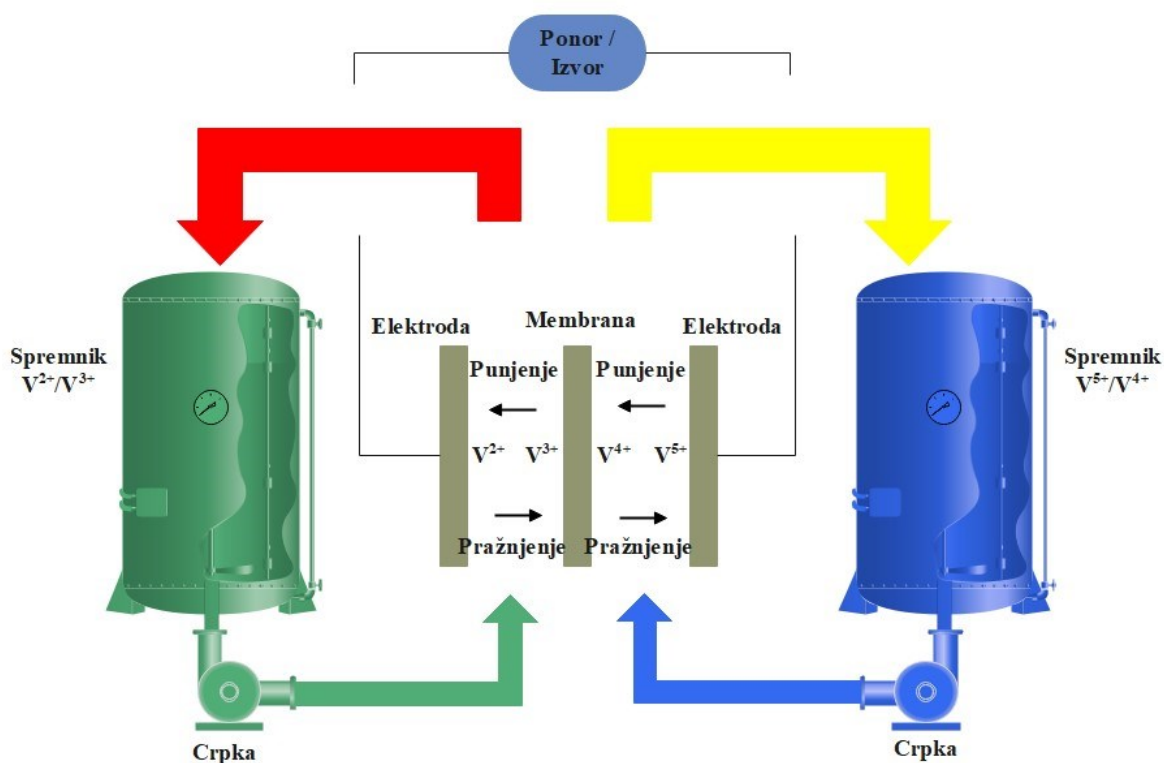
Kada je tema područje mobilnih i prijenosnih uređaja, litij – ionske baterije trenutno važe za jednu od najbitnijih tehnologija pohrane energije [1]. Raspon učinkovitosti litij – ionskih baterija varira između 95 – 98%, što se smatra visokom učinkovitosti. Vrijeme koje je potrebno kako bi se ispraznile varira između jedne sekunde i jednog tjedna. Upravo zbog tog vremena se smatraju kao fleksibilna tehnologija pohrane električne energije, kao i univerzalna tehnologija. Unatoč mogućim većim stopama ciklusa, standardna ćelija posjeduje 5000 ciklusa punjenja u ovisnosti materijala za elektrode [1]. Litij – ionske baterije, odnosno njihova tehnologija, posjeduju i manu, a to je njihova sigurnost [1].



Slika 3.5 Prikaz prizmatnog dizajna i baterijskih modula litij – ionske baterije [1]

3.2.3 Pohrana energije pomoću redoks protočnih baterija

Redoks protočne baterije (RFB) predstavljaju jednu klasu elektrokemijskih uređaja za pohranu energije. Naziv "redoks" odnosi se na reakcije kemijske redukcije i oksidacije koje se koriste u RFB za pohranjivanje energije u tekućim otopinama elektrolita koji teku kroz bateriju elektrokemijskih ćelija tijekom punjenja i pražnjenja. Prema literaturi [2] : „tijekom pražnjenja, elektron se oslobađa reakcijom oksidacije iz stanja visokog kemijskog potencijala na negativnoj ili anodnoj strani baterije. Elektron se kreće kroz vanjski krug kako bi obavio koristan rad. Konačno, elektron se prihvaća reakcijom redukcije u nižem stanju kemijskog potencijala na pozitivnoj ili katodnoj strani baterije. Smjer struje i kemijske reakcije su obrnuti tijekom punjenja“.



Slika 3.6 Prikaz sheme te procesa punjenja i pražnjenja redoks protočne baterije [2]

3.3 Pohrana električne energije pomoću kemijskih sustava

3.3.1 Pohrana energije pomoću vodika

Sukladno autoru literature [1] : „u slučaju sekundarnog nosača energije, vodik ima bitan utjecaj kada se električna energija skladišti u velikim količinama. Primarni cilj mu je to što upotrebljava „višak“ struje kako bi se vodik proizveo elektrolizom preko vode“. Glavna prednost vodika leži u njegovom korištenju u raznim sektorima, npr. grijanje, transport i mobilnost“.

3.3.2 Pohrana energije pomoću sintetičkog prirodnog plina

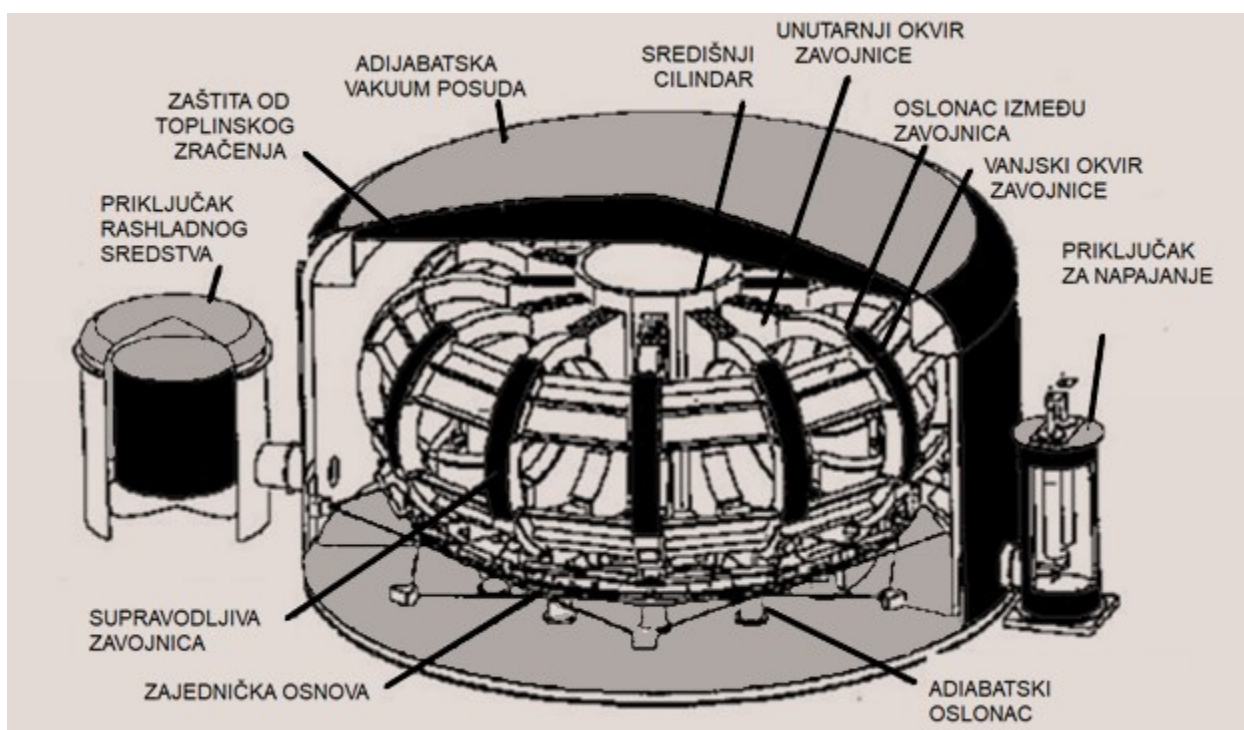
Iduća opcija pohrane električne energije pomoću kemijskog sustava vrši se pomoću sintetičkog prirodnog plina, odnosno sinteze metana. Poslije završetka razgradnje vode nužan je korak gdje se događa reakcija ugljičnog dioksida i vodika u metan. Sama pohrana sintetičkog prirodnog plina može se vršiti tlakom, u spremnicima koji se nalaze u zemlji te direktnim uvođenjem u plinsku mrežu. Prema literaturi [1], „moguće je koristiti različite vrste izvora CO_2 kako bi se dobio metan. Neki od tih izvora podrazumijevaju : elektrane na fosilna goriva, bioplinska te industrijska postrojenja“. Glavni nedostatak sintetičkog prirodnog plina leži u njegovoj niskoj učinkovitosti,

do koje dolazi zbog gubitaka tijekom transporta, elektrolize, skladištenja i samog procesa dobivanja metana [1].

3.4 Pohrana električne energije pomoću električnih sustava

3.4.1 Pohrana energije pomoću supravodljivog magnetskog svitka

Literatura [1] kaže da se „pohranjena energija, koju stvara struja istosmjernog karaktera u supravodljivom svitku, nalazi u magnetskom polju. Upravo ta energija je čuvana na temperaturi koja je niža od supravodljive kritične temperature svitka“. Primarna i najvažnija komponenta supravodljivog magnetskog svitka je zavojnica koja je izrađena pomoću materijala supravodljivog karaktera. Pojedini dijelovi supravodljivog magnetskog svitka prikazani su slikom 3.7.



Slika 3.7 Prikaz pojedinih dijelova supravodljivog magnetskog svitka [3]

Jedna od glavnih prednosti supravodljivog magnetskog svitka je brzi odziv, što podrazumijeva dostupnost tražene snage u istom trenu [1]. Autor literature [1] navodi kako, dok radi sustav hlađenja, „energija ima mogućnost pohrane na neodređen vremenski period. U tom slučaju vremenski rok skladištenja energije je ograničen jedino zbog osobnih potreba samog rashladnog sustava“.

3.4.2 Pohrana energije pomoću ultra kondenzatora

Ultra kondenzatori su elektrokemijski kondenzatori s dvostrukim slojem te su u opticaju već 60 godina [1]. Autor literature [1] navodi da oni „popunjavaju potrebnu prazninu između klasičnih kondenzatora i standardne baterije jer posjeduju jako visoku snagu i skoro neograničenu stabilnost ciklusa te imaju veću sposobnost pohrane energija u odnosu na tradicionalne baterije“. Analogno tome, posjeduju dosta raznih prednosti među kojima su [1] :

- Dobra pouzdanost
- Jeftinije održavanje
- Dug vijek trajanja
- Lako recikliranje
- Visoka učinkovitost (oko 90%)

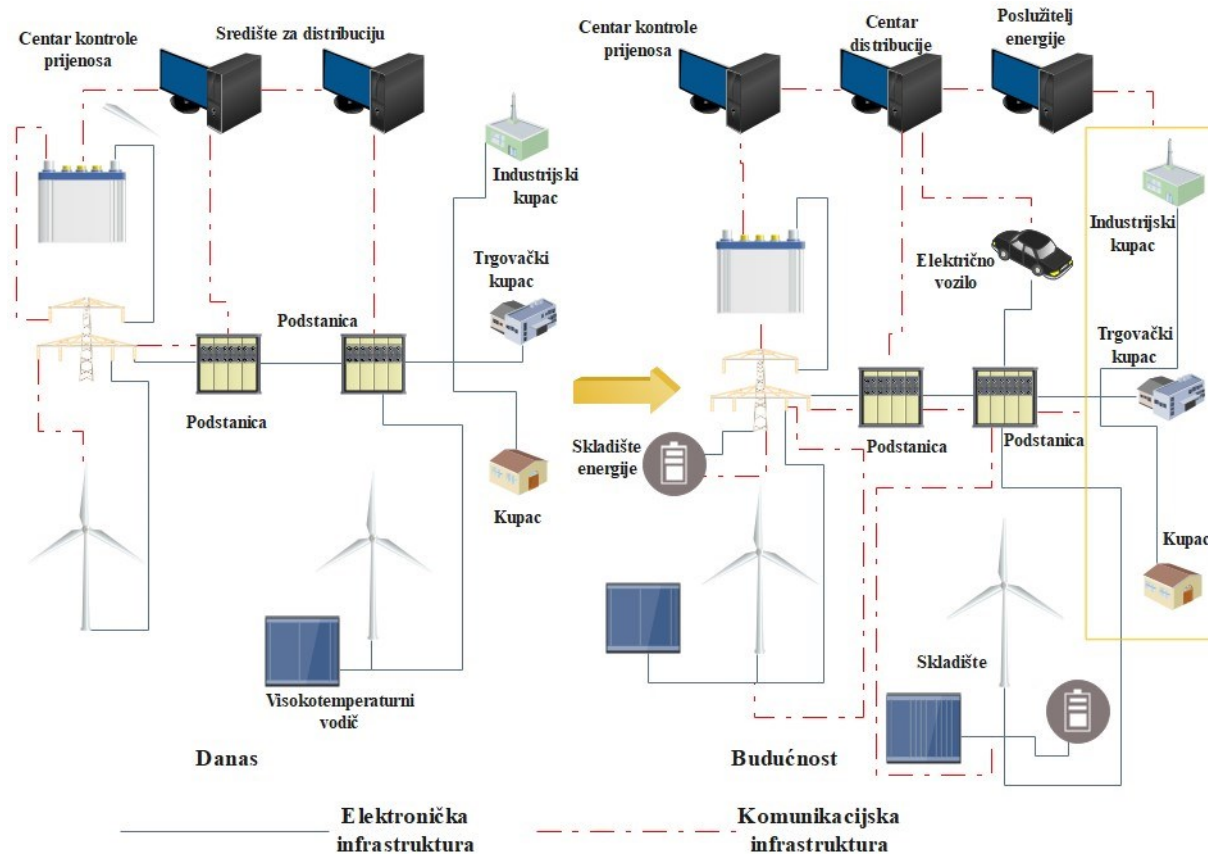
3.5 Pohrana električne energije pomoću termičkih sustava

3.5.1 Pohrana energije kao topline

Termički sustavi korišteni za pohranu energije koncipirani su na način da se energija skladišti u obliku toplinske energije. Jedan od najboljih načina da se velika količina topline pohrani je pomoću promjene stanja materijala. Određeni materijali posjeduju sposobnost da zadrže veliku količinu energije tijekom prelaska iz jednog stanja u drugo. Prema [1] : „spomenuti efekt se događa na primjeru kocke leda, gdje kocka leda ostaje na 0°C skroz do svog otapanja, iako se cijelo vrijeme zagrijavala. Količina energije koja je bila potrebna da se kocka leda otopi je jednaka onoj količini energije koja je potrebna da se voda zagrije na 80°C“. Sustav zadužen za ravnotežu solar-nih termoelektrana je bitan jer solarna termoelektrana upotrebljava toplinu sunca za istovremenu proizvodnju električne energije i punjenje toplinskih spremnika tijekom dana, što omogućava generiranje energije tijekom noći [1].

4. MIKROMREŽE

Mikromreža je naziv koji se koristi za elektroenergetsku mrežu koja upotrebljava digitalne i druge naprednije tehnologije kako bi upravljala i pratila tokove električne energije. Povodom sve veće potražnje i potrošnje električne energije, obnovljivi izvori energije sve brže se troše. Upravo iz tog razloga, primarni cilj je smanjiti proizvodnju energije iz takvih izvora i okrenuti se izvorima električne energije obnovljivog karaktera, kao što su vjetar, sunčeve zrake, morske struje i druge. Autor literature [4] navodi da su „mikromreže zapravo skup tehnologija u razvoju te se kao takve primjenjuju u raznim okruženjima širom svijeta“. Slikom 4.1. prikazan je karakter evolucije mikromreže [4].



Slika 4.1 Karakter evolucije mikromreže [4]

4.1 Usporedba svojstava mikromreže i konvencionalne distribucijske mreže

Kada bi se uspoređivala mikromreža sa konvencionalnom distribucijskom po međusobnim svojstvima, da se primjetiti koliko zapravo poboljšanja mikromreža posjeduje u odnosu na konvencionalnu distribucijsku. Neke od značajki mikromreže podrazumijevaju što bolju iskoristivost imovine uz minimalne troškove, potrošači aktivno sudjeluju te imaju mogućnost većeg izbora i

interakciju s mrežom, te su mikromreže sustav koji posjeduje samooporavak tj. predviđa i reagira na neželjene poremećaje. U nastavku, tablicama 4.1 i 4.2, su prikazana pojedina svojstva mikromreže kao i konvencionalne distribucijske mreže [5].

Tablica 4.1 Svojstva mikromreže [6]

MIKROMREŽA	Digitalna	Automatsko nadziranje
	Dvosmjerna komunikacija	Potpuna upravljivost
	Distribuirana proizvodnja	Maksimalan broj senzora
	Prilagodljiva i otočna	Veliki izbor za potrošače

Tablica 4.2 Svojstva konvencionalne distribucijske mreže [6]

KONVENCIONALNA DISTRIBUCIJSKA MREŽA	Elektromehanička	Ručno nadziranje
	Jednosmjerna komunikacija	Ograničena upravljivost
	Centralizirana proizvodnja	Manji broj senzora
	Kvarovi i ispadi mreže	Mali izbor za potrošače

4.2 Prednosti mikromreža

Autor literature [7] navodi da „elektroenergetski sustav koji je napravljen na temelju mikromreža posjeduje puno računala korištenih kako bi se razmijenile informacije te se također koriste u svrhu regulacije“. U slučaju neželjenih havarija i kvarova u elektroenergetskom sustavu, mikromreže pomažu u kontinuiranom opskrbljivanju električnom energijom. Analogno tome, ostale prednosti mikromreža podrazumijevaju njezinu pouzdanost, efikasnost te održivost.

5. OPTIMIZACIJSKE METODE ODREĐIVANJA ALOKACIJE SUSTAVA POHRANE ENERGIJE

Različiti parametri su uključeni u pronalaženje najbolje lokacije i snage za sustave pohrane energije. Kako bi se ostvarile najveće koristi od integracije sustava pohrane energije u mrežu, funkcija cilja i ograničenja rada moraju biti dobro specificirani. Odabir najboljeg položaja za sustav pohrane energije i njegovo skaliranje može biti zadatak s jednim ili više parametara. Jedinствене karakteristike uključuju minimiziranje gubitaka aktivne i jalove snage, poboljšanje razine napona, optimizaciju snage jedinice za pohranu energije, minimalne varijacije napona kao i manji trošak proizvodnje. Pojedinačne ciljne funkcije kombiniraju se pomoću varijabli ponderiranja za postizanje višestrukih ciljnih funkcija [8]. Minimalni gubici u distribucijskom sustavu nastaju kao rezultat optimalnog dimenzioniranja i lokacije jedinice za pohranu energije. Ukupni gubici djelatnih snaga u distribucijskom sustavu se prema [8], [9], [10] mogu prikazati izrazima:

$$P_L = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [\alpha_{ij}(P_i P_j + Q_i Q_j) + \beta_{ij}(Q_i P_j - P_i Q_j)] \quad (4-1)$$

gdje je :

$$\alpha_{ij} = \frac{R_{ij}}{|V_i V_j|} \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (4-2)$$

$$\beta_{ij} = \frac{R_{ij}}{|V_i V_j|} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (4-3)$$

$$Z_{ij} = R_{ij} + jX_{ij} \quad (4-4)$$

gdje : Z_{ij} predstavlja impedanciju između sabirnice i i sabirnice j ; R_{ij} predstavlja otpor između sabirnice i i sabirnice j ; V_i predstavlja vrijednost napona na sabirnici i ; V_j predstavlja vrijednost napona na sabirnici j ; δ_i predstavlja kut napona na sabirnici i ; δ_j predstavlja kut napona na sabirnici j ; P_i i Q_i predstavljaju injektiranu djelatnu i reaktivnu snagu sabirnice i ; P_j i Q_j predstavljaju injektiranu djelatnu i reaktivnu snagu sabirnice j .

Najčešća ograničenja pri dimenzioniranju jedinica za pohranu energije te njihovom postavljanju podrazumijevaju :

- Ograničenje napona
- Ograničenje aktivne snage
- Ograničenje jalove snage
- Ograničenje protoka snage
- Ograničenje omjera kratkog spoja
- Ograničenje maksimalnog broja jedinica za pohranu energije

Budući da je potrebno zadovoljiti ponudu i potražnju, za svaku sabirnicu treba biti provedena jednadžba za ravnotežu opterećenja [9], [10]:

$$\sum_{i=1}^N P_{DGi} = \sum_{i=1}^N P_{Di} + P_L \quad (4-5)$$

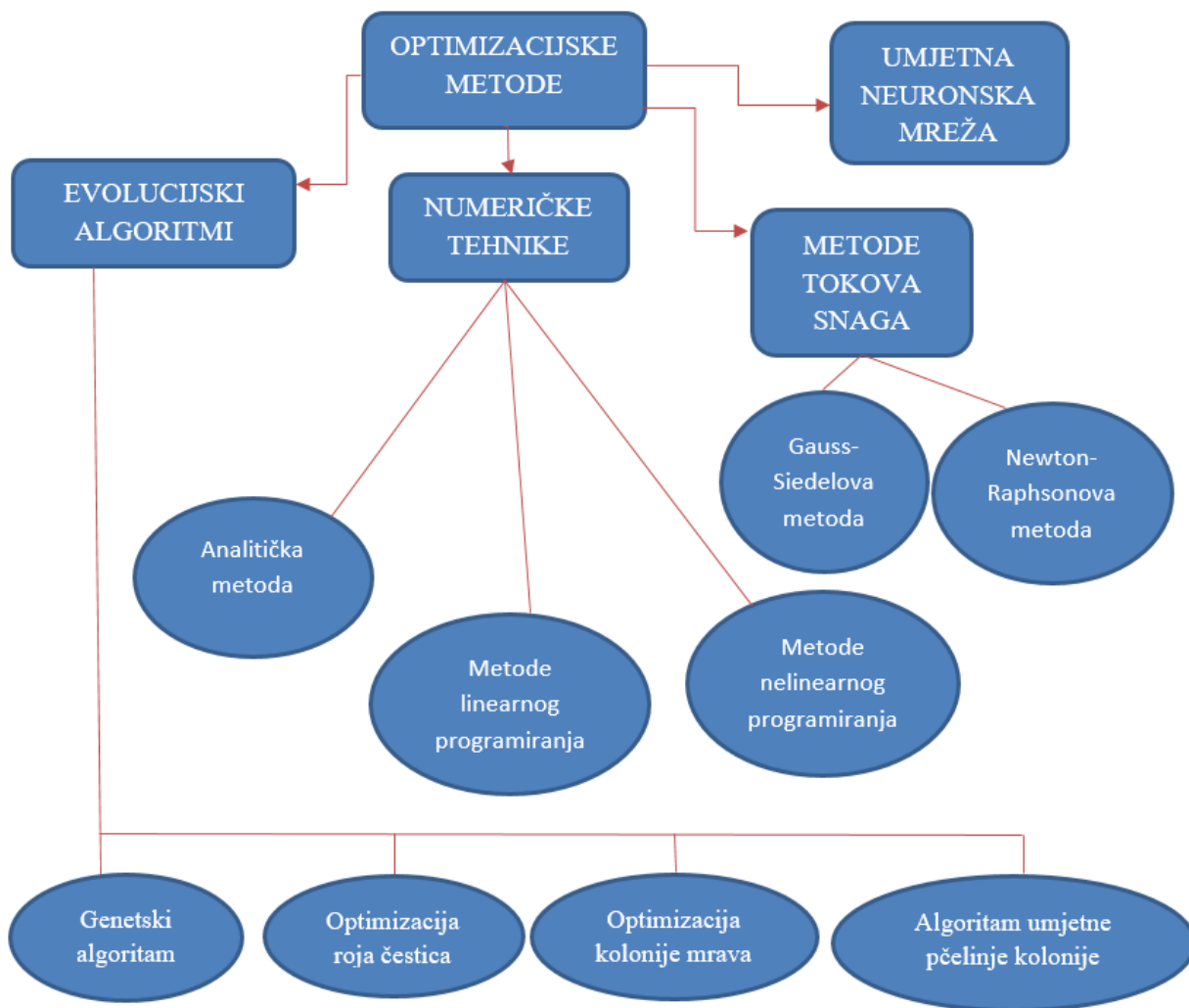
gdje : P_L predstavlja gubitak djelatne snage u sustavu; P_{DGi} predstavlja proizvedenu djelatnu snagu jedinica za pohranu energije; P_{Di} predstavlja potražnju za energijom na sabirnici i .

Analogno tome, napon na svakoj sabirnici treba ograničiti sa gornjim i donjim tzv. graničnim naponom, što je i prikazano sljedećim izrazom [8], [9], [10] :

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} ; i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4-6)$$

gdje : V_i^{min} predstavlja minimalni napon sabirnice i ; V_i^{max} predstavlja maksimalni napon sabirnice i .

Razvijeno je nekoliko pristupa za procjenu najbolje lokacije i veličine jedinica za pohranu energije kako bi se poboljšao naponski profil i smanjili gubici. Ostali ciljevi optimizacijskih metoda koji podrazumijevaju pouzdanost, maksimiziranje kapaciteta jedinica pohrane energije i minimizacija troškova, također su uzeti u obzir kod drugih istraživačkih članaka. Slika 5.1 prikazuje klasifikaciju nekoliko strategija za rješavanje problema dodjele i veličine jedinica za pohranu energije u mrežnom sustavu [8].



Slika 5.1 Optimizacijske metode [8]

5.1 Evolucijski algoritmi

5.1.1. Genetski algoritam

Genetski algoritam (GA) je optimizacijska metoda čiji je glavni cilj poboljšati fitness funkcije [8]. To je tehnologija umjetne inteligencije korištena za rješavanje poteškoća poput određivanja najbolje lokacije za sustave pohrane energije. Genetski algoritam (GA) je alat za optimizaciju koji se temelji na genetici i prirodnoj selekciji. Fitness funkcija se može koristiti za smanjenje gubitaka, poboljšanje profila napona i uštedu troškova u slučaju arhitekture jedinice za pohranu energije. Među fazama pretraživanja GA su [11]:

1. Stvaranje početne populacije
2. Vrijednovanje fitness funkcije

3. Proizvodnja nove populacije

Genetska pretraga započinje nasumičnim odabirom početne populacije u kojoj fitness funkcija svakog pojedinca biva procjenjena. Ovisno o vrijednosti funkcije fitnessa, pojedinac se reproducira ili odbacuje. Kao rezultat toga, nastaje generacija vrlo uspješnih ljudi. Genetski algoritam ima sljedeće prednosti [11]:

- Ima mogućnost korištenja širokog raspona optimizacijskih problema zbog svoje otpornosti na zaostajanje u lokalnim optimumima
- Ima mogućnost brzog ispitivanja širokog skupa rješenja
- Zbog jednostavnog odbacivanja, loši prijedlozi nemaju negativnog utjecaja na krajnje rješenje
- Uslijed pokretanja vlastitih internih pravila, ne mora posjedovati prethodno znanje o pravilima problema

5.1.2. Optimizacija temeljena na roju čestica

Kontinuirane nelinearne funkcije optimiziraju se putem optimizacije roja čestica (PSO). Optimizacija temeljan na roju čestica je algoritam inteligencije roja koji je koncipiran na temelju društvene dinamike kao i ponašanja koji su viđeni u kolonijama društvene strukture [12]. Rojenje čestica je model sustava odnosno društvene strukture organizama koji čine grupu s određenim ciljem na umu, kao na primjer pronalazak hrane. Ključno je okupiti grupu životinja koje dijele zajedničku aktivnost. Primjerice rojevi pčela i jato ptica, kao grupa stvorenja koje posjeduje ovo relativno ponašanje [9]. Uspoređujući PSO algoritam i druge metode optimizacije, PSO algoritam posjeduje više prednosti. Neke od prednosti su [13] :

- Laka implementacija
- Zahtjeva manje memorije
- Sposobnost za postizanje optimalno globalnih rješenja
- Mogućnost dobivanja dobrog rješenja za kratko vrijeme

Razlikujemo više vrsta PSO-a kako bi smo dobili optimalnu veličinu sustava pohrane energije, među kojima su : Tradicionalna optimizacija roja čestica, Evolucijska optimizacija roja čestica (EPSO), Iteracijska optimizacija roja čestica (IPSO) te Rank Evolucijska optimizacija roja čestica (REPSO).

5.1.3. Optimizacija temeljena na koloniji mrava

Optimizacija kolonije mrava je pristup optimizaciji koji je prvi put razvijen ranih 1990-ih. Ponašanje pravih kolonija mrava u potrazi za hranom izvor je inspiracije za optimizaciju kolonija mrava. Umjetne kolonije mrava koriste ovo ponašanje kako bi pronašle približna rješenja za diskretne probleme optimizacije, probleme kontinuirane optimizacije i ključne telekomunikacijske izazove poput usmjeravanja i simetriranja opterećenja. To je pristup optimizaciji koji se temelji na ponašanju mrava u stvarnom životu [8]. Algoritam kolonije mrava regulira raspored tri različita zadatka. Prvi zadatak je pronalaženje izvora hrane koju obavlja jedan mrav. On se zatim vraća natrag u gnijezdo te ostavlja trag feromona za sobom. Drugi zadatak obuhvaća korištenje četiri moguće rute do izvora hrane. U zavisnosti o kvaliteti rute, mravi također ostavljaju određenu količinu feromona. U trećem zadatku određuje se put koji sadrži najviše feromona i upravo je ovaj put najkraći za pronalazak izvora hrane te se u drugim stazama gubi trag feromona pomoću isparavanja [14]. Kako bih se uspješno riješio problem optimalnih dimenzija i položaja sekcija sustava pohrane energije unutar mreže radijalnog karaktera distribucijskog sustava, implementira se algoritam mravlje kolonije [8].

5.1.4. Algoritam temeljen na umjetnoj pčelinjoj koloniji

Algoritam umjetne kolonije pčela (ABC) je novija meta-heuristička metoda koja je uvedena od strane Karabiga 2005. godine te se bazira na simuliranju inteligentnog ponašanja korištenom za hranjenje roja pčela. Prema literaturi [11], umjetna pčelinja kolonija obuhvaća zaposlene pčele, promatračke pčele te izviđačke pčele. Neke od karakteristika umjetne pčelinje kolonije uključuju : nekonvergiranje prije vremena, dobitak dobrog rješenja u vremenski razumnom roku te brzo otkriva dobro rješenje.

Tri su kontrolna parametra o kojima ovisi izvedba ABC algoritma. Prvi parametar je broj izvora hrane, određen veličinom populacije promatranih ili zaposlenih pčela. Drugi parametar, događaj kada je napušten izvor hrane, podrazumijeva unaprijed određenu vrijednost granice za petlju koja nije promjenjena. Treći parametar, i posljednji, podrazumijeva maksimalnu petlju za mogućnost pretraživanja hrane [15].

5.2. Numeričke metode

5.2.1. Analitička metoda

Analitička metoda se koristi u slučaju određivanja optimalne lokacije sustava pohrane energije pri minimalnim gubicima. U ovoj metodi se, prema unaprijed određenom scenariju, određuju tokovi snaga. Također, na lokacijama najvećeg iznosa reaktivnih snaga se dodaju jedinice za pohranu energije [17]. U trenutku pronalaska optimalnog rješenja završava se algoritam. Algoritam u sljedećim koracima glasi [8] :

1. korak : Pokrenuti izračun tokova snaga te otkriti napon svake sabirnice, kao i izračunati ukupne gubitke pomoću jednadžbe gubitaka snage, za unaprijed određeni testni sustav bez jedinice za pohranu energije.
2. korak : Odabirom bilo koje sabirnice kao nove lokacije jedinice za pohranu energije, smatrati sve druge sabirnice potrošačkim sabirnicama.
3. korak : Otkriti napon svake sabirnice pomoću pokretanja proračuna tokova snaga u slučaju instaliranog sustava pohrane energije na novom položaju.
4. korak : Izračunati gubitke djelatne snage i reaktivne snage pomoću jednadžbe za izračun gubitaka snage.
5. korak : Potrebno je pojedinačno odabrati sve sabirnice koje su ostale kao novu lokaciju sustava pohrane energije te zatim ponoviti 2., 3. i 4. korak.
6. korak : Poredati sabirnice prema gubicima na tom mjestu, i to od najmanje ka najvećoj.
7. korak : Izabrati sabirnicu najmanjeg iznosa gubitaka za lokaciju sustava pohrane energije.
8. korak : Odrediti snagu sustava pohrane energije jedinice na izabranoj sabirnici.
9. korak : Potrebno je instalirati jedinicu za pohranu energije na izabrano mjesto te je zatim potrebno aktivirati proračun tokova snaga i otkriti napon svake sabirnice
10. korak : Uz pomoć Indeksa naponske stabilnosti (L) provjeriti stabilnosti sustava
11. korak : Ukoliko se L smanji, potrebno je ponoviti korake 2-10 kako bi pronašli iduće optimalnije mjesto za dodjelu sustava pohrane energije.

12. korak : Konstantno povećavati broj instaliranih jedinica za pohranu energije u sustavu sve dok se L ne smanji. Ukoliko L krene rasti potrebno je prestati dodavati jedinice za pohranu energije u sustav.

5.2.2. Metode linearnog programiranja

Ukoliko je optimizacijski problem nelinearan, neophodno je provesti njegovu linearizaciju. To se čini kako bi se koristile neke od metoda linearnog programiranja. Prema [16], „prednosti korištenja metode linearnog programiranja su brzo detektiranje ukoliko nije moguće provesti optimizaciju te velika pouzdanost kao i sigurno primjenjivanje u elektrotehnici za optimizaciju. Nedostatak korištenja ove metode su rješenja optimizacije koja su manje točna naspram nelinearnih metoda“. Točnost koju pružaju metode linearnog programiranja smatraju se dovoljnom za rješavanje raznih problema EES-a, kao što su na primjer optimizacija reaktivne snage, pronalazak optimalnih tokova snaga te dimenzioniranje i pronalazak optimalne lokacije instalacije distribuirane proizvodnje [17].

5.2.3. Metode nelinearnog programiranja

Ukoliko su problemi optimizacije u elektroenergetskom sustavu nelinearni, koriste se metode nelinearnog programiranja. Kada bi se uspoređivale metode linearnog i nelinearnog programiranja, metoda nelinearnog programiranja posjeduje veću točnost, ali primarni nedostatak je sporo konvergiranje. Literatura [16] navodi „kako se problemi ne mogu riješiti određenom univerzalnom metodom, uspoređujući nelinearnu sa linearnom metodom. U ovisnosti modela i karaktera nelinearnosti, postoji više raznih metoda kojim se problem može optimizirati“.

5.3. Metode tokova snaga

Krajnji cilj metoda tokova snaga je upravo određivanje napona i snaga svih mrežnih komponenata. Problem pri provođenju ove metode se javlja kada u elektroenergetskom sustavu pokušavamo locirati stacionarnu radnu točku. Literatura [8] govori kako „za vrijeme dnevnog rada mreže, tokovi snaga karakterizirani su kao primarni alat za korištenje prilikom prepoznavanja sigurnosnih problema, preopterećenja u mreži te odstupanja napona od zadanih vrijednosti“. Metode tokova snaga daju mogućnost inženjeru za potrebne simulacije scenarija koje se mogu dogoditi u mreži. Postoje dvije osnovne metode tokova snaga: Newton – Raphsonova metoda i Gauss - Seidelova metoda.

5.3.1. Newton - Raphsonova metoda

Jedna od najpopularnijih metoda za rješavanje jednadžbi je upravo Newton-Raphsonova metoda. Razlog tomu je što ova metoda posjeduje dosta prednosti. Prva od prednosti su brojevi potrebnih iteracija koje su neovisne o veličini sustava. U velikoj većini slučajeva se dobivaju točna rješenja uz samo dvije do tri iteracije, neovisno bio to mali ili veliki sustav. Sljedeća prednost koju ova metoda ima je konvergencija. Naime, ona posjeduje kvadratne karakteristike konvergencije što čini konvergenciju vrlo brzom te ona nije osjetljiva na izbor slabe sabirnice. Nedostaci Newton-Raphsonove metode karakterizirani su tehnikom rješavanja koja je teška, te je potreba za memorijom računala velika [18].

Za vrijeme izračuna razlike između stvarne vrijednosti snage i izračunate vrijednosti snage, oznake ΔS , ova metoda unaprijed pretpostavi početne vrijednosti napona [19].

$$\Delta S = S_{ij-i}^{sch} - (V_i^{|k|}) \cdot \left(\sum Y_{ij} V_j^k \right) \quad (4-7)$$

Kada se određuje kriterij konvergencije ($\Delta S \leq \varepsilon$, ε - specifična tolerancija), iz inverzne Jakobijeve matrice jednadžbi izvodi se matrica osjetljivosti te indeks točnosti :

$$P_i = |V_i| \sum |Y_{ij}| |V_j| \cos(\theta_i - \theta_j - \Psi_{ij}) \quad (4-8)$$

$$Q_i = |V_i| \sum |Y_{ij}| |V_j| \sin(\theta_i - \theta_j - \Psi_{ij}) \quad (4-9)$$

Gdje kut θ_i predstavlja kut između V_i i V_j , a Ψ_{ij} predstavlja kut admitancije.

5.3.2. Gauss – Siedelova metoda

Gauss – Siedelova metoda je koncipirana na iteracijama koje se koriste na jednadžbama snaga čvorova. Prednost ove metode je jednostavna implementacija i primjenjivost na bilo kojoj topologiji mreže. Unatoč sporij konvergenciji, cijena svake iteracije je vrlo niska. Glavni nedostatak metode je slabo skaliranje sheme jer se broj iteracija povećava sukladno povećanju broja čvorova [20]. Pošto se pokazalo konvergiranjem sustava u velikoj većini slučajeva, u praksi je korišten sljedeći algoritam [20] :

$$\overline{V_i^{(k+1)}} = \frac{1}{y_{11}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{(\overline{V_1^{(k)}})^*} - \sum_{j=1}^n \overline{y_{1j}} \overline{V_j^{(k)}} \right]; i = 2, 3, \dots, n \quad (4-10)$$

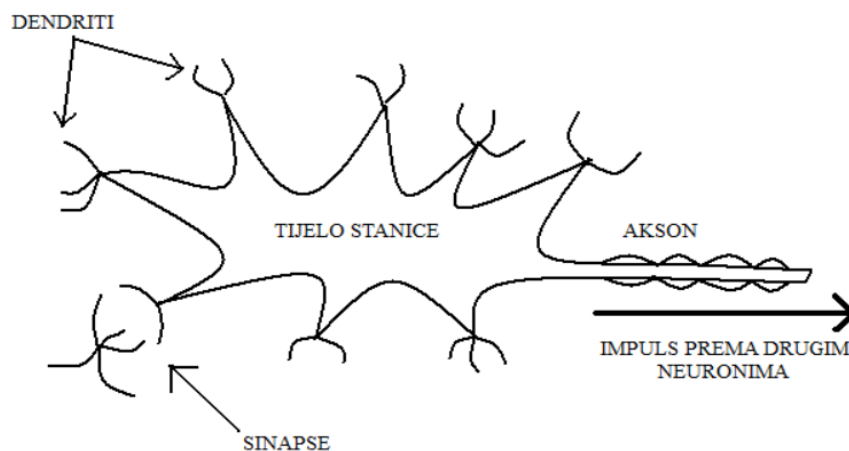
Autor literature [19] navodi „kada je unutar iteracije određen napon čvora, tada se stavlja nova vrijednost na raspolaganje preostalim jednadžbama unutar te iste iteracije, a također i za naknadnu iteraciju. Proces iteracije linearno konvergira ako su početne vrijednosti napona približno jednake stvarnim vrijednostima napona“. Također, literatura [19] navodi da „prilikom manjka veza između većeg broja okolnih sabirnica, učinak Gauss – Siedelove metode je lošiji u radijalnim distribucij-skim mrežama“.

5.4. Umjetna neuronska mreža

Umjetna neuronska mreža podrazumijeva mrežu baziranu prema biološkim faktorima samih neurona u ljudskome mozgu. Kako bi se lakše shvatila umjetna neuronska mreža, potrebno je prvobitno objasniti i sam biološki neuron. Dakle, neuron je zapravo živčana stanica koja je sastavni dio ljudskog mozga. Sastoji se od četiri dijela među kojima su [21] :

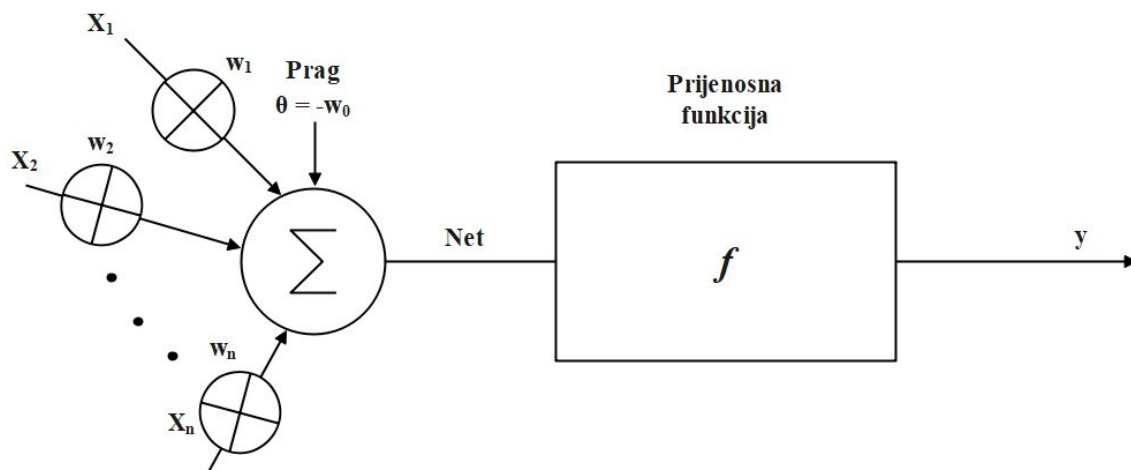
- Tijelo stanice, odnosno soma
- Skup dendrita, odnosno ogranaka
- Aksoni, odnosno duge cjevčice koje imaju zadatak prenošenja električnih signala te
- Niz završnih članaka

Analogno tome, postoji i mali razmak između kraja aksona prethodnog neurona i dendrita ili tijela sljedećeg neurona, kao što je prikazano i slikom 5.2, te se taj razmak naziva sinapsa [21].



Slika 5.2 Prikaz građe neurona [21]

Umjetna neuronska mreža s druge strane je zapravo umjetna replika ljudskog mozga koja ima svrhu simuliranja postupka učenja. Kada bi se uspoređivala sa biološkim uzorkom, podudarnost je mala. Razlog tome je što, iako se naprave brojna pojednostavljenja, postoji dosta fenomena u živčanom sustavu nemodeliranih pomoću umjetnih neuronskih mreža. Analogno tome, neke karakteristike mreže se ne mogu slagati sa karakteristikama samog biološkog sustava. Općenito, prema autoru literature [21], „neuronske mreže imaju sjajnu mogućnost rješavanja problema koji zahtjevaju klasifikaciju i predviđanje tj. općenito riješavaju sve probleme gdje postoji odnos između ulaznih i izlaznih varijabli, iako je ta veza jako složena“. Slikom 5.2 je prikazan općeniti model umjetnog neurona gdje „ x_1, x_2, \dots, x_n “ predstavljaju ulazne signale koji su općenito realni brojevi koji se nalaze u intervalu $[-1,1]$ ili $[0,1]$, „ w_1, w_2, \dots, w_n “ predstavljaju težine, „ net “ predstavlja težinsku sumu te „ θ “ predstavlja vrijednost praga.



Slika 5.2 Prikaz modela umjetnog neurona [21]

Težinska suma „ net “ prikazana je sa izrazom :

$$net = w_1x_1 + w_2x_2 + \dots + w_nx_n - \theta \quad (4-11)$$

međutim, iz razloga kompaktnosti, za vrijednost praga uzima se $\theta = -w_0$, usputno se dodaje ulazni signal x_0 sa vrijednosti 1 koja je fiksirana, pa se izraz može pojednostavljeno napisati :

$$net = w_0x_0 + w_1x_1 + w_2x_2 + \dots + w_nx_n = \sum_{i=1}^n w_ix_i \quad (4-12)$$

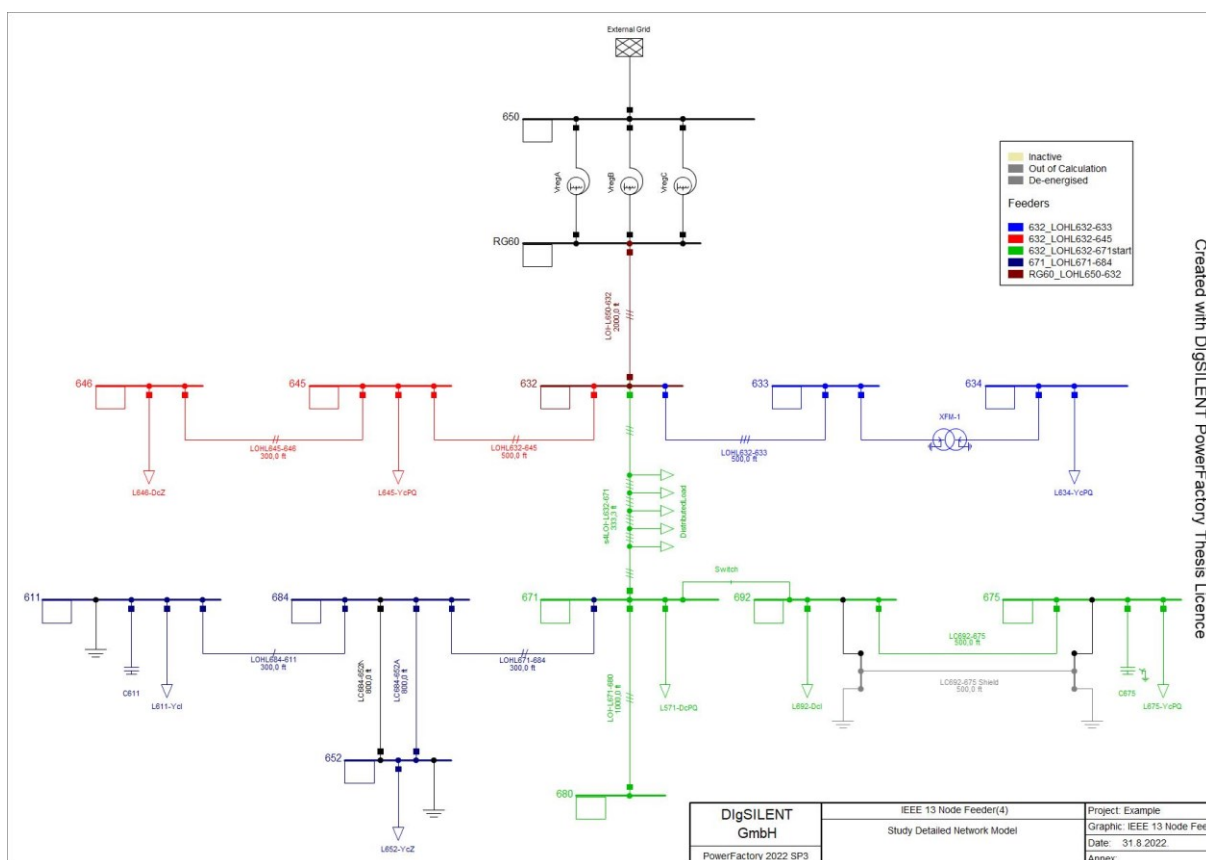
Te se za izlaz Y može napisati rezultat prijenosne funkcije koja je primjenjena na izrazu (4-13) :

$$y = f\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i\right) = f(\text{net}) \quad (4-13)$$

Umjetne neuronske mreže mogu se upotrebljavati u svrhu određivanja optimalnog opterećenja elektroenergetske mreže. Međutim, prije nego što se neuronske mreže obrade, potrebno je neuronsku mrežu „naučiti“ odnosno „trenirati“. Autor literature [21] navodi da je „znanje o obradi podataka pohranjeno primarno u težinama veza među neuronima. Već spomenute težine se postupno prilagođavaju tijekom postupka učenja neuronske mreže pa se do trenutka kada je izlaz iz mreže zadovoljavajući“. Postupak učenja podrazumijeva iterativan pristup predočavanja ulaznih primjera i očekivanih izlaza. Neuronska mreža može se također upotrijebiti u svrhu određivanja alokacije sustava pohrane energije u mikromreži, sa naglaskom na minimalne gubitke u mreži te naponske prilike mreže [21].

6. ANALIZA ALOKACIJE SUSTAVA ZA POHRANU ENERGIJE U PROGRAMSKOJ PODRŠCI DIGSILENT POWER FACTORY

Analiza i simulacija je provedena na IEEE 13 Bus ispitnom sustavu koja je prikazana slikom 6.1. IEEE ispitni sustav sa 13 sabirnica sadrži radijalne izvore te je mreža nesimetrična. Unutar mreže nalaze se trafostanice, pojni vodovi napona 4,16 kV, podzemni i nadzemni vodovi i nesimetrična opterećenja. Pomoću ovog sustava se nastoji prikazati alokacija sustava pohrane električne energije na mjestima gdje je napon niži od 1 p.u. Integracija sustava za pohranu električne energije izaziva promjene tokova snaga u mreži te pasivnu mrežu pretvaraju u aktivnu.



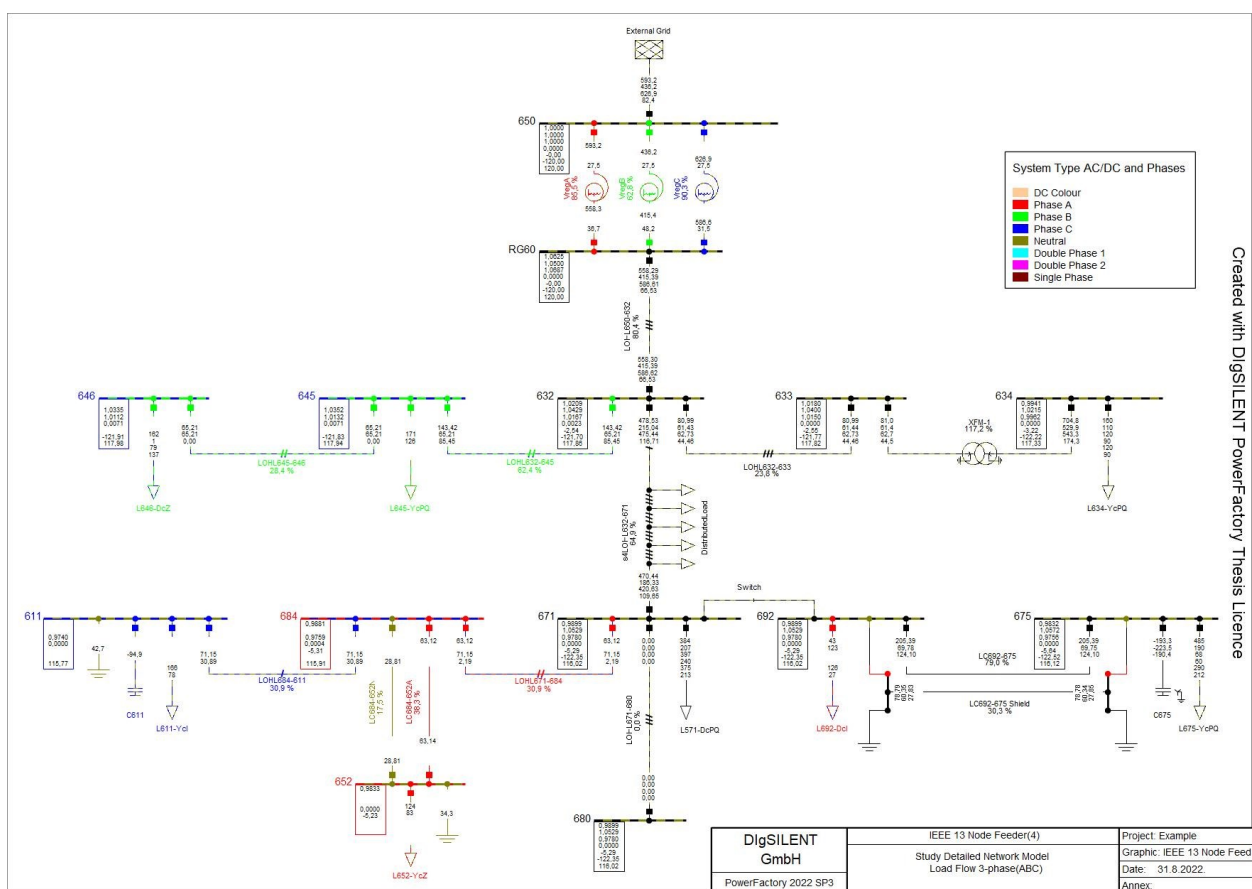
Slika 6.1 Prikaz IEEE testnog sustava sa 13 sabirnica

Analiza se provodi u četiri slučaja :

- Prvi slučaj – analiza strujno – naponskih prilika sustava bez integracije baterijskog spremnika
- Drugi slučaj – integracija baterijskih spremnika na sabirnice najnižeg napona
- Treći slučaj – povećanje snage baterijskih spremnika
- Četvrti slučaj – integracija baterijskih spremnika na sve sabirnice u sustavu

6.1 Prvi slučaj – analiza strujno – naponskih prilika sustava bez integracije baterijskog spremnika

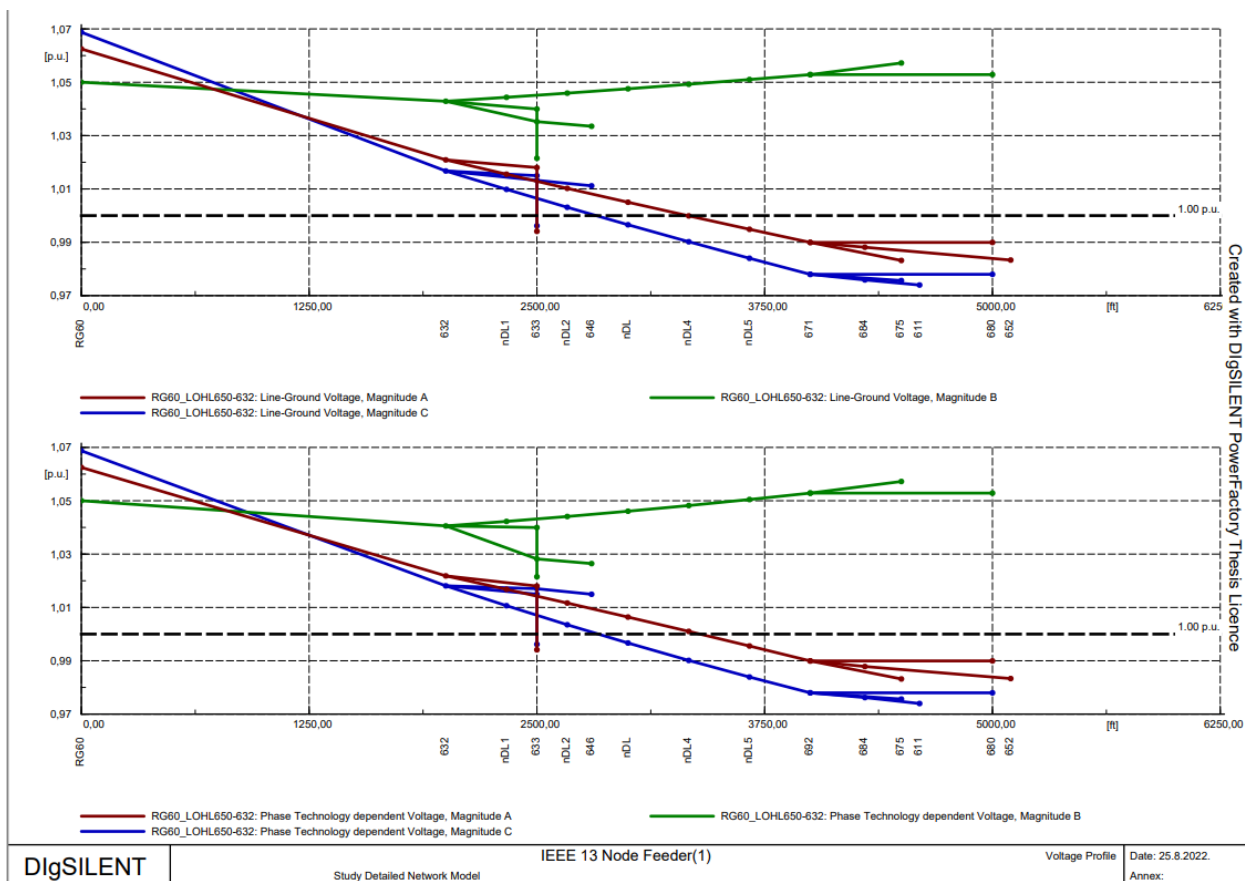
U prvom slučaju provedena je simulacija proračuna tokova snaga kada na sabirnice u sustavu nije spojen nijedan sustav za pohranu električne energije. Cilj je bio pronaći sabirnicu s najnižim naponom kako bi se u narednom slučaju napon nadomjestio sa baterijskim spremnikom. Provedena je „Load Flow“ simulacija te pomoću opcije „Output Calculation Analysis“ prikazali su se podaci snaga u sustavu.



Slika 6.2 Rezultantni tokovi snaga za prvi slučaj

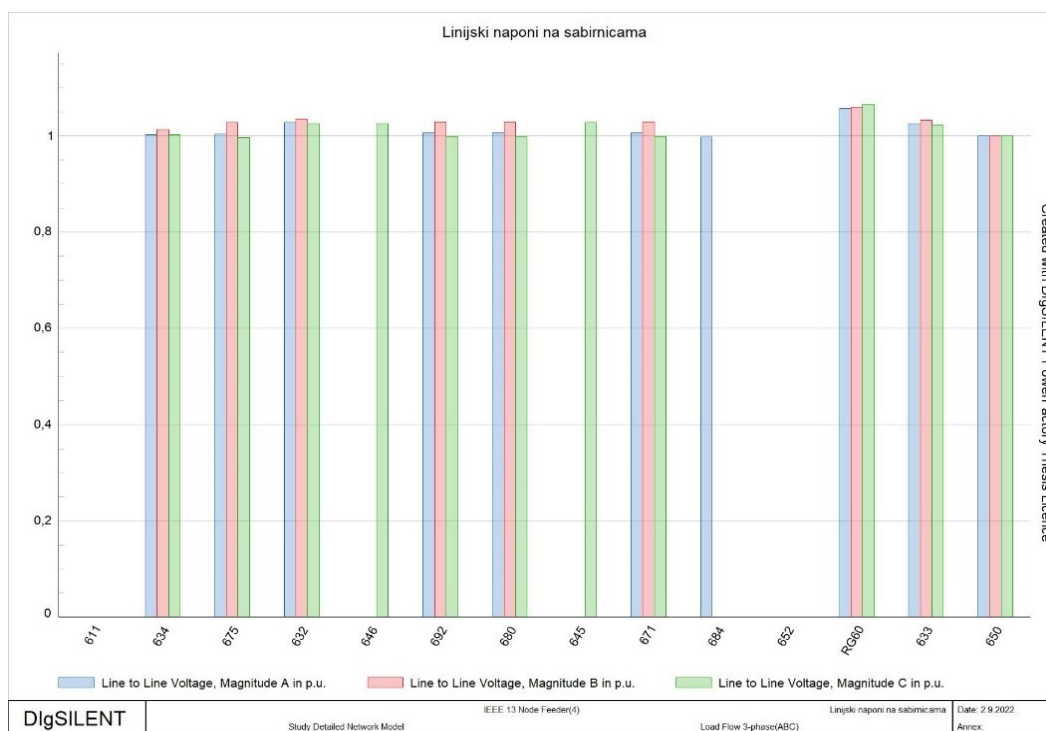
Rezultati su prikazani na slici 6.2. Tokovi snaga daju smjer snage u sustavu, a pošto nije izvršena integracija baterijskih spremnika, djelatnu snagu uzimaju tereti na sabirnicama.

6. ANALIZA ALOKACIJE SUSTAVA ZA POHRANU ENERGIJE U PROGRAMSKOJ PODRŠCI DIGSILENT POWER FACTORY



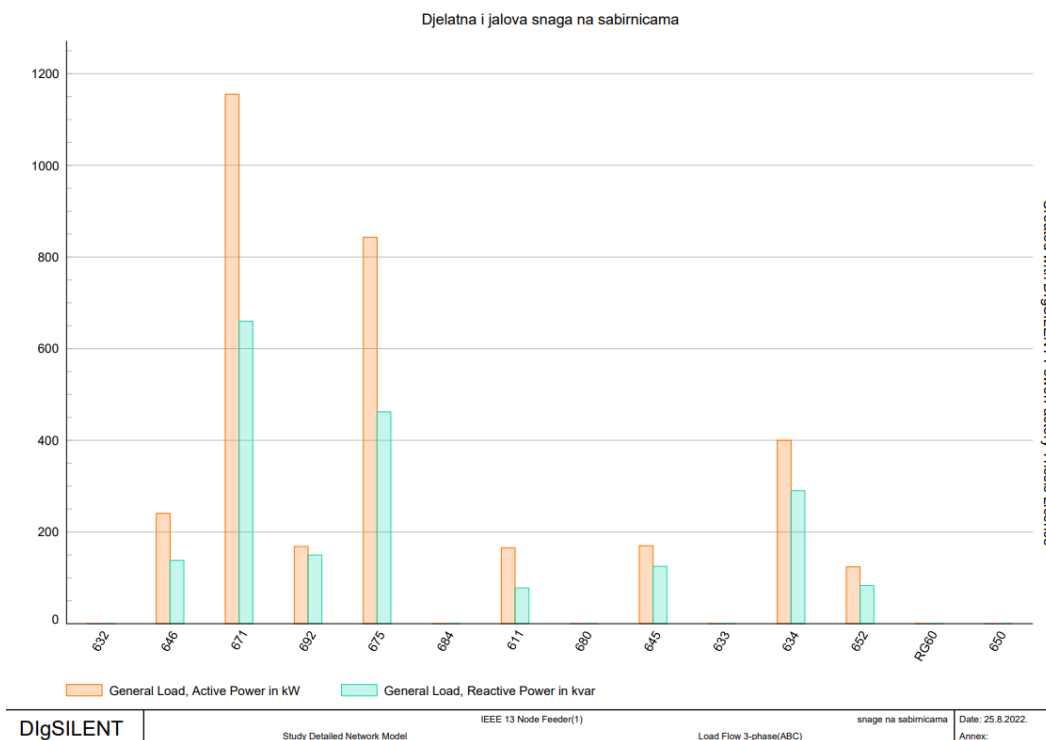
Slika 6.3 Prikaz naponskog profila mreže

Na slici 6.3 je vidljivo kako je najniži fazni napon iznosa 0,974 p.u. sabirnice 611, a najveći fazni napon iznosa 1,062 p.u. sabirnice RG60. Prikazom naponskog profila mreže odabire se upravo sabirnica 611 kao mjesto postavljanja baterijskog spremnika električne energije.



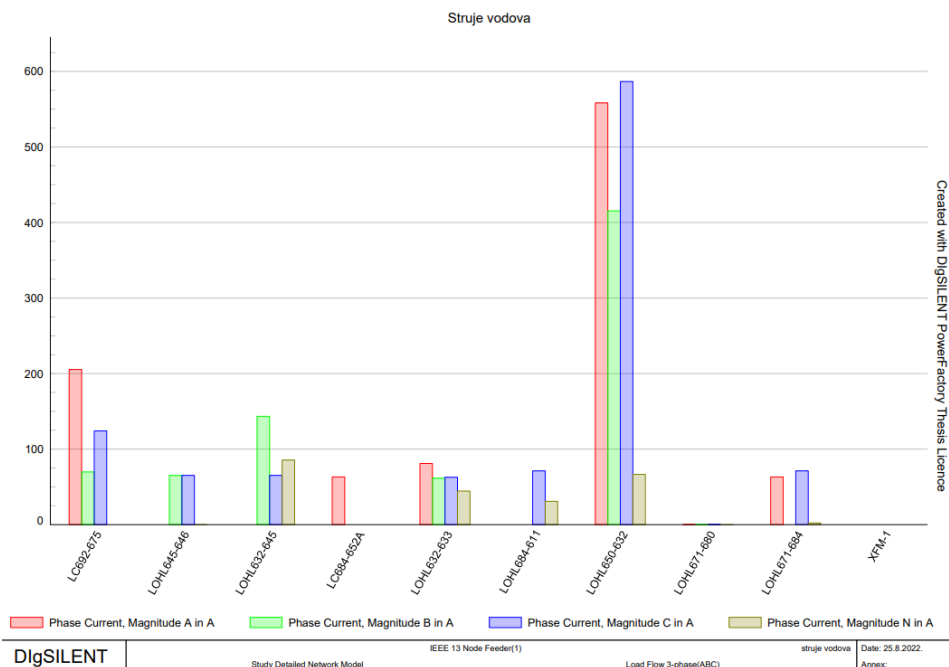
Slika 6.4 Prikaz linijskih napona na sabirnicama

Najveći linijski napon prikazan je na slici 6.4 iznosa 1,07 p.u. sabirnice RG60 , a najmanji iznosa 0,99 p.u. sabirnice 684 koja je dvofazna.



Slika 6.5 Prikaz djelatne i jalove snage na sabirnicama

Na slici 6.5 su prikazani iznosi potrošnje djelatne i jalove snage na sabirnicama u sustavu, a najveći teret se nalazi na sabirnici 671 iznosa djelatne snage oko 1150 kW i 650 kvar jalove snage. Sabirnice na koje nije spojen nikakav teret su 632, 684, 680, 633, RG60 i 650.



Slika 6.6 Prikaz struja vodova u mreži

Prikaz amplituda struja nakon provedenih tokova snaga u mreži priložen je na slici 6.6. Najveća amplituda struje je voda LOHL650-632 iznosa 586,6 A faze C, dok je najmanja amplituda struje na vodu LC684-652A iznosa 63,12 A faze A. Vod LOHL650-632 ima najveću amplitudu iz razloga što napaja ostatak mreže.

Tablica 6.1 Strujno – naponske prilike u mreži u slučaju kad nije spojen nijedan sustav za pohranu električne energije

	Djelatna snaga [kW]	Jalova snaga [kvar]	Prividna snaga [kVA]
Proizvodnja električne energije	0,00	0,00	0,00
Tok snage iz nadređene mreže	3578,32	1725,13	3972,46
Opterećenje mreže	3466,38	2101,75	4053,78
Opterećenje mreže pri nazivnom naponu	3466,00	2102,00	4053,59
Gubici u mreži	111,94	325,49	

Pošto u mreži nije spojen niti jedan element koji bi generirano snagu u mrežu, proizvedena djelatna i jalova snage su jednake nuli. Gubici mreže iznose 111,94 kW djelatne snage i 325,49 kvar jalove snage kao što je prikazano na slici u tablici 6.1. Pored navedenog ukupan teret mreže iznosi 3972,42 kVA prividne snage.

6.2 Drugi slučaj – integracija baterijskih spremnika na sabirnice najnižeg napona

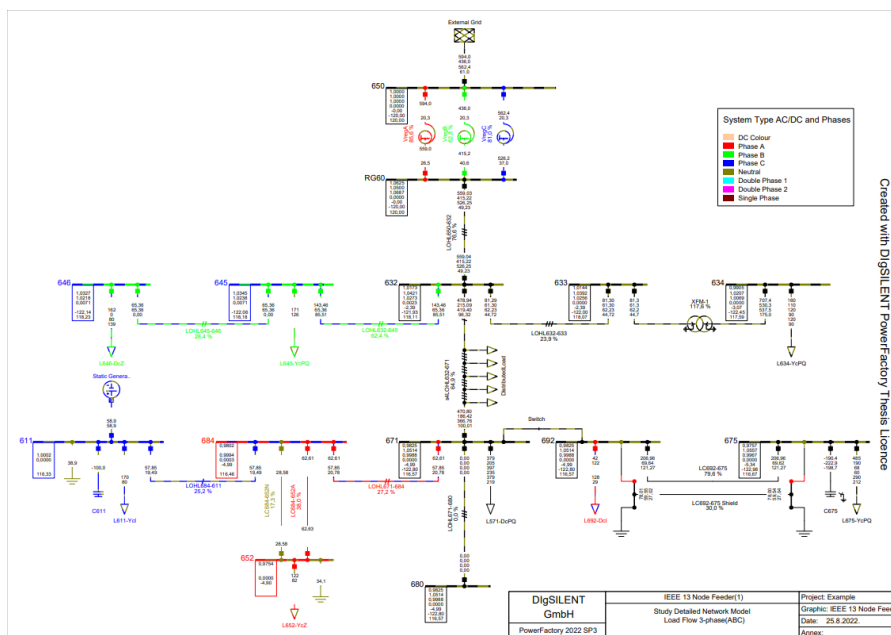
U drugom slučaju provedena je simulacija temeljena na analitičkoj metodi. Postavljen je baterijski spremnik energije na sabirnicu najnižeg iznosa napona iz prvog slučaja, sabirnicu 611. Nakon provedenog proračuna tokova snaga, prikazano slikom 6.11, na temelju naponskog profila mreže odredila se iduća sabirnica najnižeg iznosa napona, sabirnica 652. Zatim, nakon ponovno provedene simulacije proračuna tokova snaga, odredila se posljednja sabirnica najnižeg iznosa napona, sabirnica 675. U simulaciji su praćene sabirnice kojima je iznos napona manji od 1 p.u. Dakle, simulacija je u drugom slučaju provedena na tri načina, a pritom je snaga baterijskih spremnika ostala nepromjenjena, odnosno 100 kW i 100 kvar.

Tablica 6.2 Načini spajanja baterijskih spremnika u mrežu

Mjesto spajanja baterijskih spremnika	Djelatna snaga baterijskog spremnika [kW]	Jalova snaga baterijskog spremnika [kvar]
Sabirnica 611	100	100
Sabirnice 611 i 652	100	100
Sabirnice 611, 652 i 675	100	100

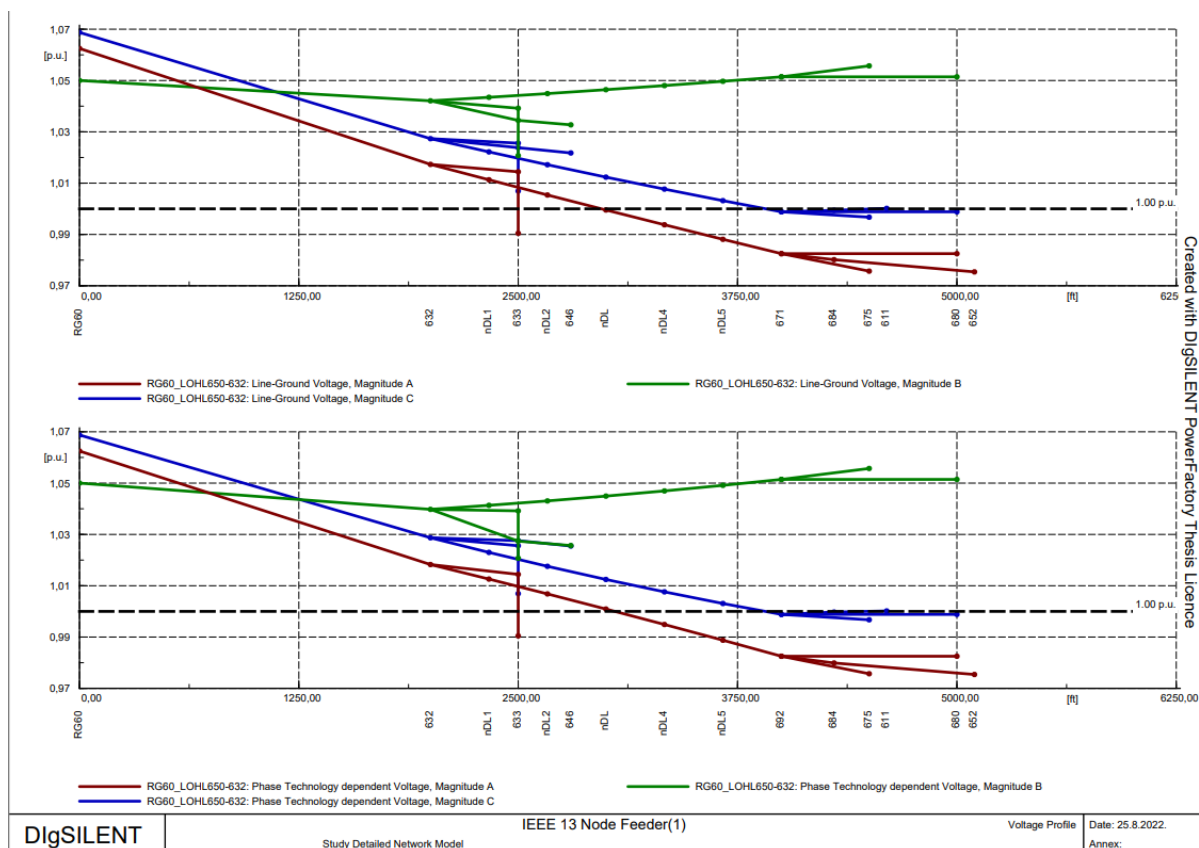
1. NAČIN – mjesto spajanja baterijskog spremnika je sabirnica 611, pošto je na njoj prikazan najniži iznos napona. Djelatna i jalova snaga baterije je za potrebe simulacije postavljena na 100 kW odnosno 100 kvar.

6. ANALIZA ALOKACIJE SUSTAVA ZA POHRANU ENERGIJE U PROGRAMSKOJ PODRŠCI DIGSILENT POWER FACTORY



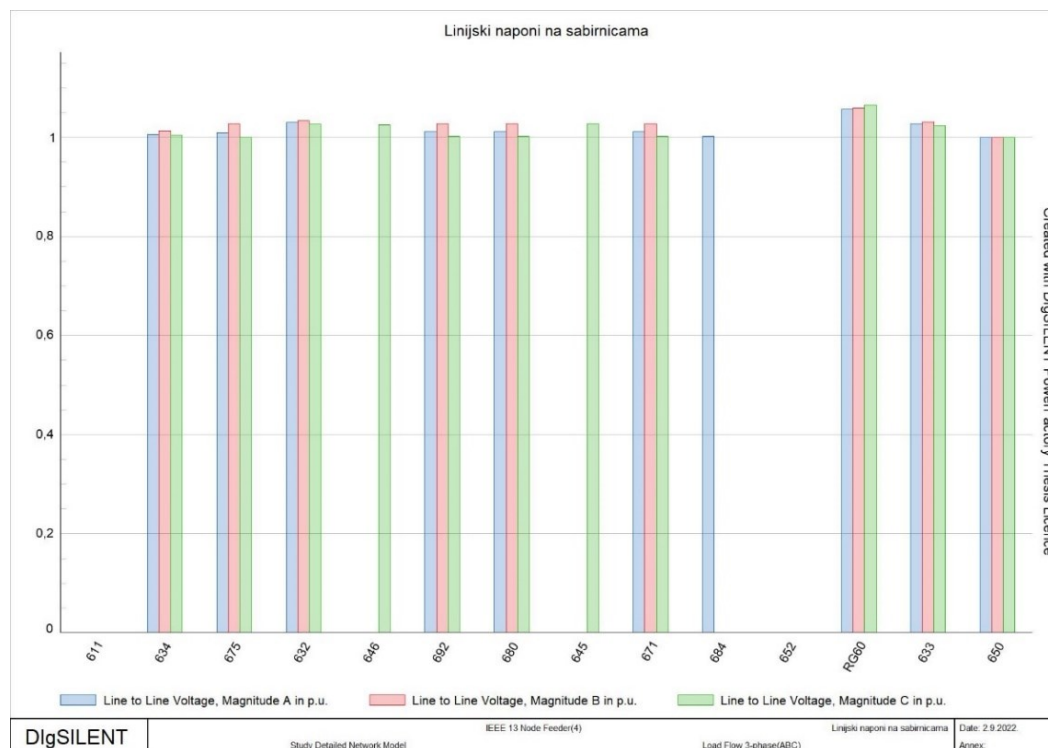
Slika 6.7 Prikaz sheme sa spojenim baterijskim spremnikom na sabirnici 611

Na slici 6.7 su prikazi rezultati nakon provednog proračuna tokova snaga u IEEE 13 sabirničkom testnom sustavu nakon integracije baterijskog spremnika djelatne snage iznosa 100 kW i jalove snage iznosa 100 kvar.



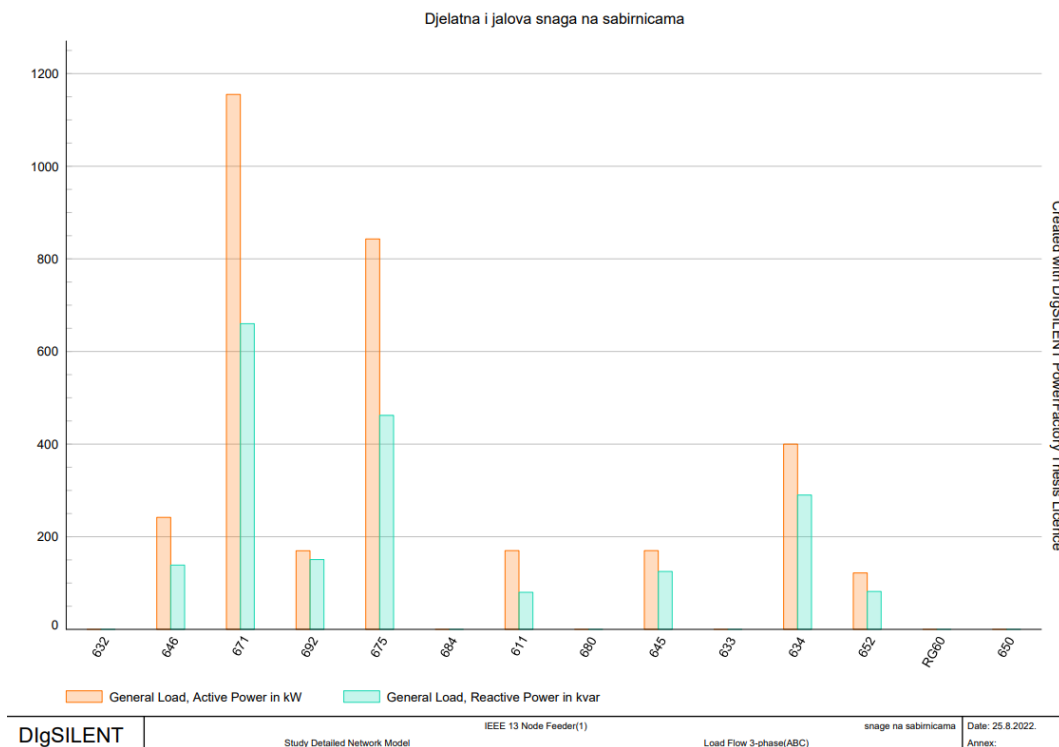
Slika 6.8 Prikaz naponskog profila mreže sa spojenim baterijskim spremnikom na sabirnicu 611

Naponski profili sabirnicama nakon provedenih tokova sange su prikazani na slici 6.8, gdje je vidljiv porast faznog napona iznosa 1 p.u. na sabirnici 611 nakon priključenja baterijskog spremnika električne energije. Najmanji fazni napon iznosa 0,98 p.u. je na sabirnici 652 te se odabire kao iduće mjesto postavljanja baterijskog spremnika električne energije.



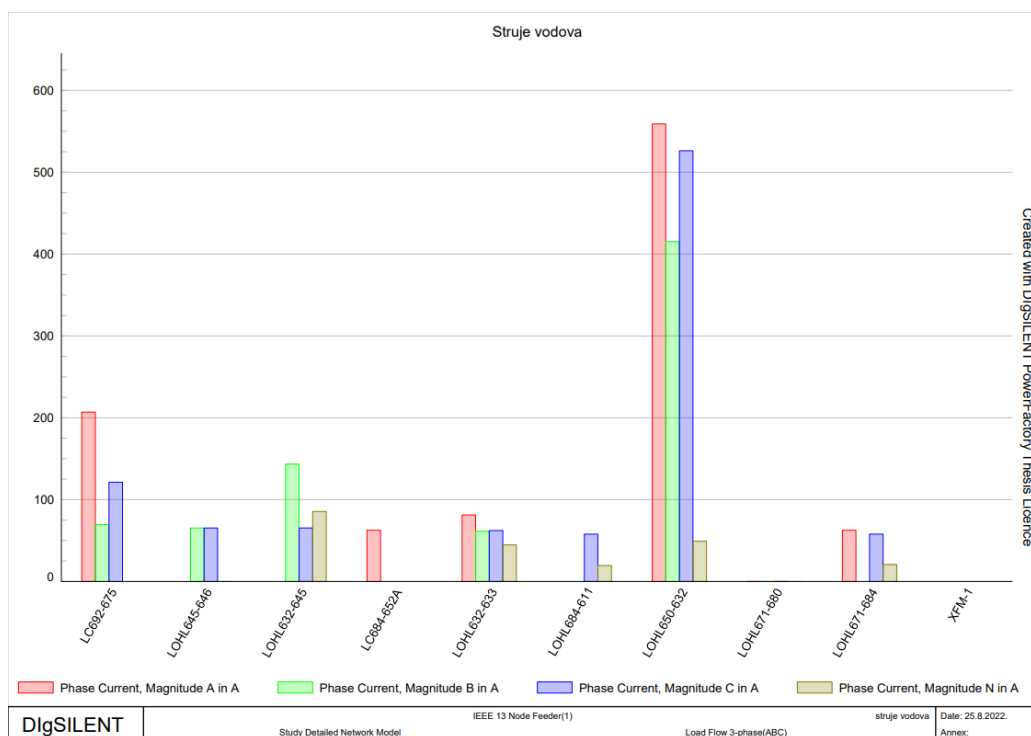
Slika 6.9 Prikaz linijskih napona na sabirnicama

Prikazom iznosa linijskih napona na sabirnicama na slici 6.9, najmanji linijskog napona iznosa 1 p.u. je na sabirnici 652, dok je najveći linijski napon iznosa 1,07 p.u. sabirnice RG60 nakon integracije baterijskog spremnika na sabirnici 611.



Slika 6.10 Prikaz djelatne i jalove snage na sabirnicama

Opterećenje na sabirnicama, prikazano slikom 6.10, je ostalo isto kao i u prethodnom slučaju kada je na sabirnicu 611 priključen baterijski spremnik koji predaje snagu u mrežu i kao takav ne predstavlja teret.



Slika 6.11 Prikaz struja vodova u mreži

Amplituda struje voda LOHL684-611 je ostala ista kao i u prethodnom slučaju nakon spajanja baterijskog spremnika na sabirnicu 611 kao što je prikazano na slici 6.11.

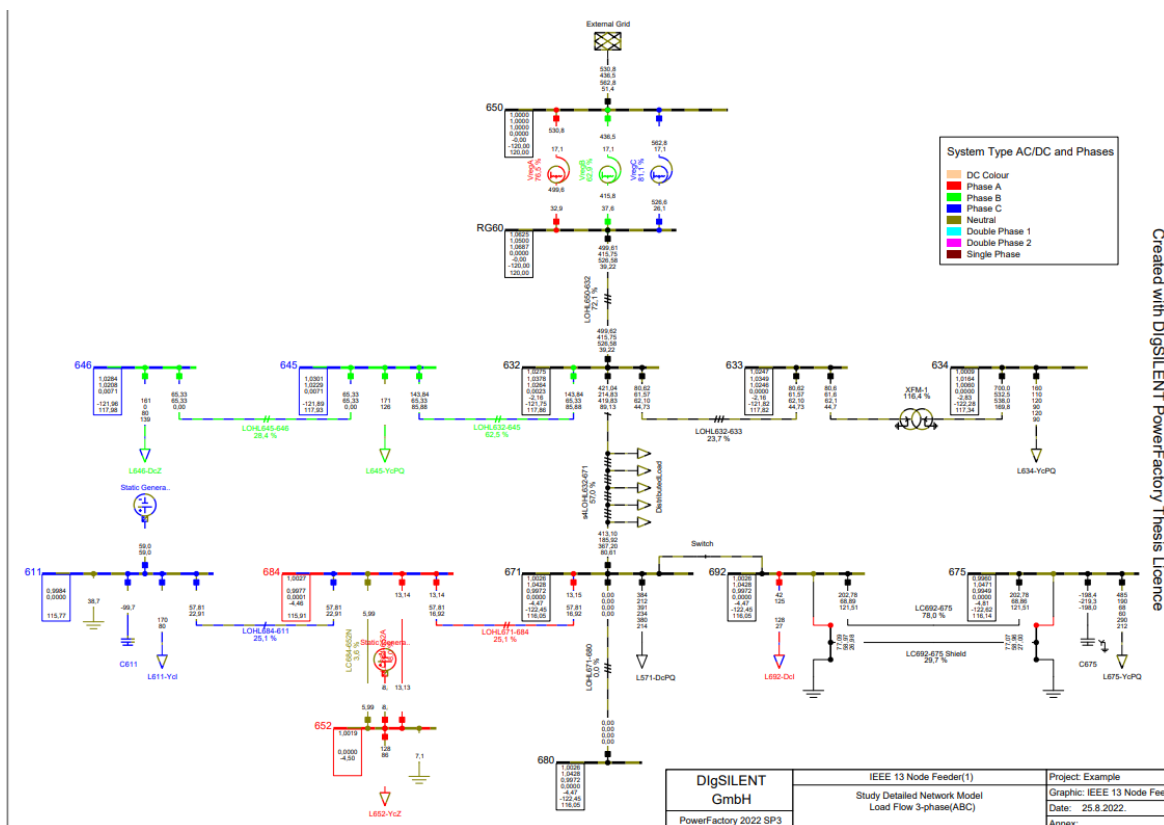
Tablica 6.3 Strujno – naponske prilike u mreži u slučaju kad je spojen sustav za pohranu električne energije

	Djelatna snaga [kW]	Jalova snaga [kvar]	Prividna snaga [kVA]
Proizvodnja električne energije	100,00	100,00	141,42
Tok snage iz nadređene mreže	3473,65	1586,64	3818,86
Opterećenje mreže	3471,33	2104,36	4059,37
Opterećenje mreže pri nazivnom naponu	3466,00	2102,00	4053,59
Gubici u mreži	102,31	294,31	

Kao što je vidljivo u tablici 6.3, došlo je do smanjenja djelatnih i jalovih gubitaka nakon integracije baterijskog spremnika energije na sabirnicu 611. Gubici u mreži iznose 102,31 kW djelatne snage i 294,31 kvar jalove snage. Za smanjenje gubitaka je zaslužno postavljanje baterijskog spremnika energije što je rezultiralo kompenzacijom djelatnih i jalovih gubitaka. Proizvedena djelatna snaga iznosi 100 kW, a jalova snaga iznosi 100 kvar kao rezultat predaje enegije od strane baterijskog spremnika.

2. NAČIN – nakon provedenog proračuna tokova snaga, iduća sabirnica koja ima najmanji iznos napona je sabirnica 652, te se na nju spaja baterijski spremnik energije koji je također parametiran sa djelatnom i jalovom snagom iznosa 100 kW, odnosno 100 kvar.

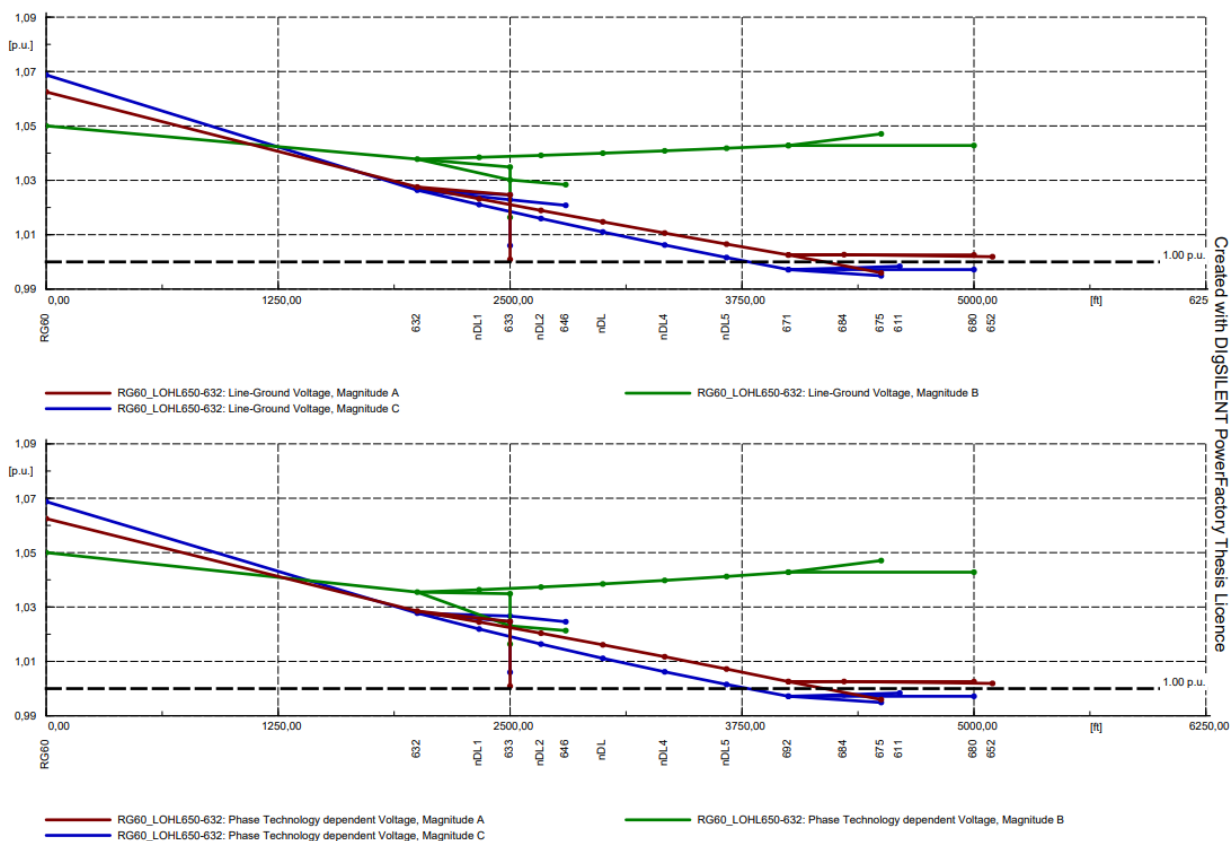
6. ANALIZA ALOKACIJE SUSTAVA ZA POHRANU ENERGIJE U PROGRAMSKOJ PODRŠCI DIGSILENT POWER FACTORY



Slika 6.12 Prikaz sheme sa spojenim baterijskim spremnikom na sabirnice 611 i 652

Slika 6.12 prikazuje rezultate dobivene nakon proračuna tokova snaga mreže nakon integracije baterijskog spremnika na sabirnicu 652 djelatne snage 100 kW i 100 kvar jalove snage iz razloga nižeg napona na toj sabirnici.

6. ANALIZA ALOKACIJE SUSTAVA ZA POHRANU ENERGIJE U PROGRAMSKOJ PODRŠCI DIGSILENT POWER FACTORY



DigSILENT
Study Detailed Network Model
IEEE 13 Node Feeder(1)
Voltage Profile
Date: 25.8.2022.

Slika 6.13 Prikaz naponskog profila mreže sa spojenim baterijskim spremnikom na sabirnice 611 i 652

Na slici 6.13 prikazani su naponski profili mreže, te je vidljivo da je najmanji fazni napon iznosa 0,99 p.u. na sabirnici 675 faze C, dok je najveći fazni napon iznosa 1,062 p.u. na sabirnici RG60 faze C. Kako bi se povećao napon, na sabirnicu 675 se priključuje baterijski spremnik djelatne snage 100 kW i jalove snage 100 kvar.

Tablica 6.4 Parametri mreže u slučaju kad je spojen sustav za pohranu električne energije

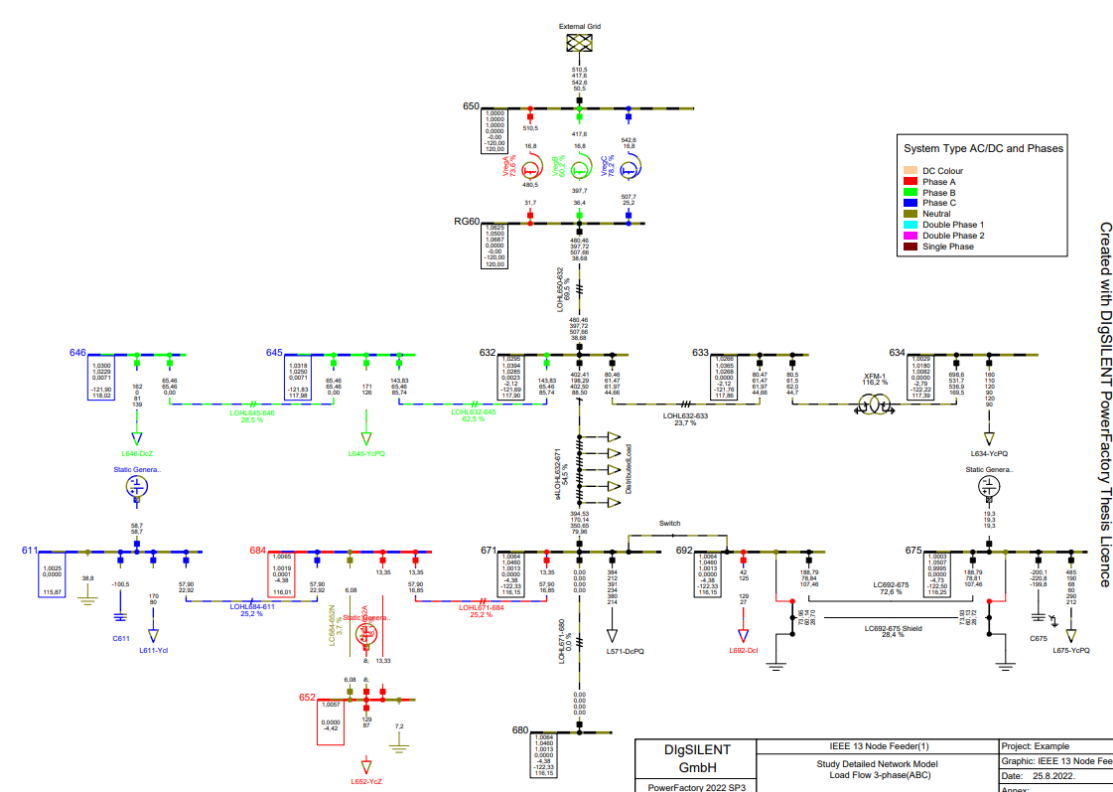
	Djelatna snaga [kW]	Jalova snaga [kvar]	Prividna snaga [kVA]
Proizvodnja električne energije	200,00	200,00	282,84
Tok snage iz nadređene mreže	3370,64	1459,96	3673,25
Opterećenje mreže	3478,23	2109,23	4067,79
Opterećenje mreže pri nazivnom naponu	3466,00	2102,00	4053,59

6. ANALIZA ALOKACIJE SUSTAVA ZA POHRANU ENERGIJE U PROGRAMSKOJ PODRŠCI DIGSILENT POWER FACTORY

Gubici u mreži	92,41	266,04	
----------------	-------	--------	--

Nakon priključenja baterijskih spremnika na sabirnice 611 i 652, vidljivo je smanjenje gubitaka u mreži kao što je prikazano u tablici 6.4. Gubici djelatne snage iznose 92,41 kW, a gubici jalove sange iznose 266,04 kvar. Proizvedena snaga je porasla zbog integracije dodatnog baterijskog spremnika na sabirnicu 652.

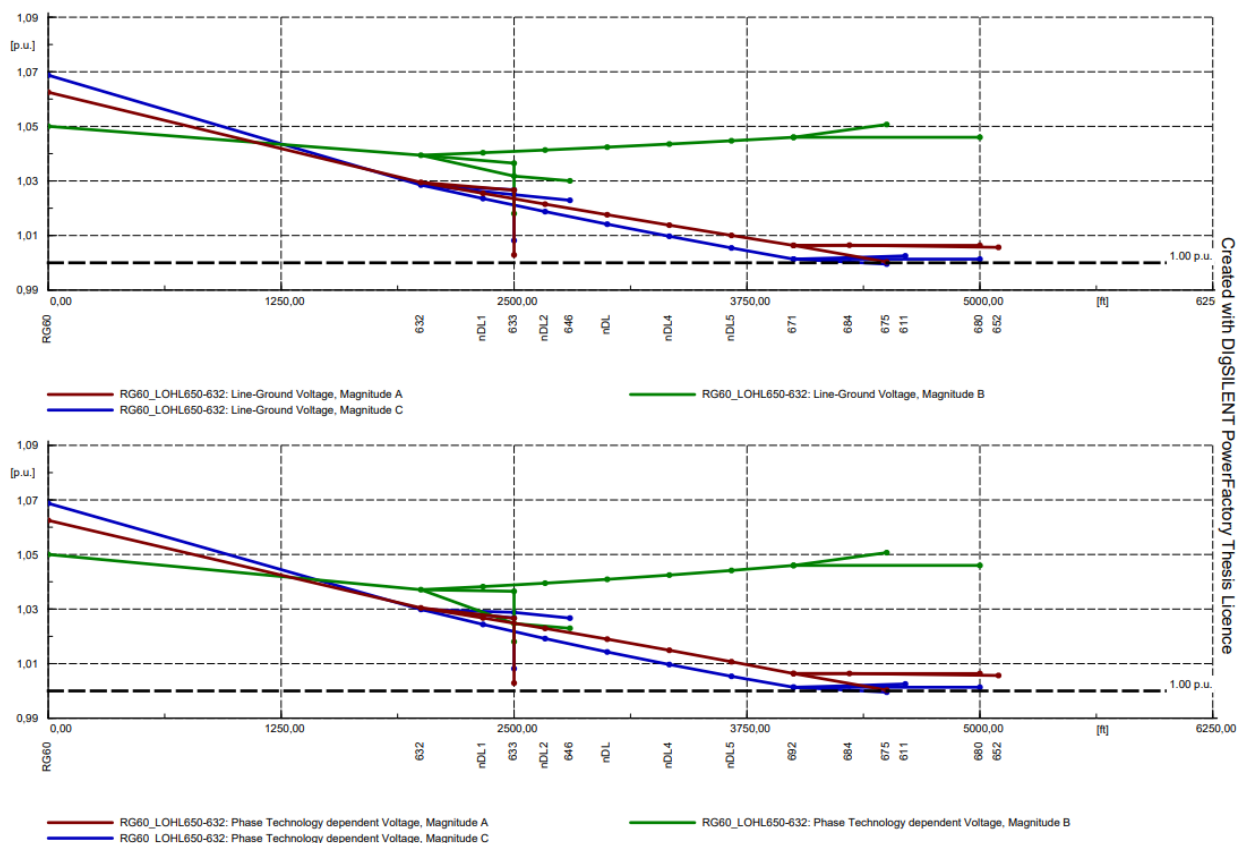
3. NAČIN – nakon provedenog proračuna tokova snaga, vidljivo je da je sljedeća sabirnica sa najmanjim iznosom napona upravo sabirnica 675. Na nju se postavlja dodatni baterijski spremnik istog iznosa djelatne i jalove snage, točnije 100 kW i 100 kvar.



Slika 6.14 Prikaz sheme sa spojenim baterijskim spremnikom na sabirnice 611, 652 i 675

Prikaz provedenog proračuna tokova snaga nakon integracije baterijskog spremnika na sabirnicu 675 je dan na slici 6.14.

6. ANALIZA ALOKACIJE SUSTAVA ZA POHRANU ENERGIJE U PROGRAMSKOJ PODRŠCI DIGSILENT POWER FACTORY



DlgSILENT | Study Detailed Network Model | IEEE 13 Node Feeder(1) | Voltage Profile | Date: 25.8.2022. Annex:

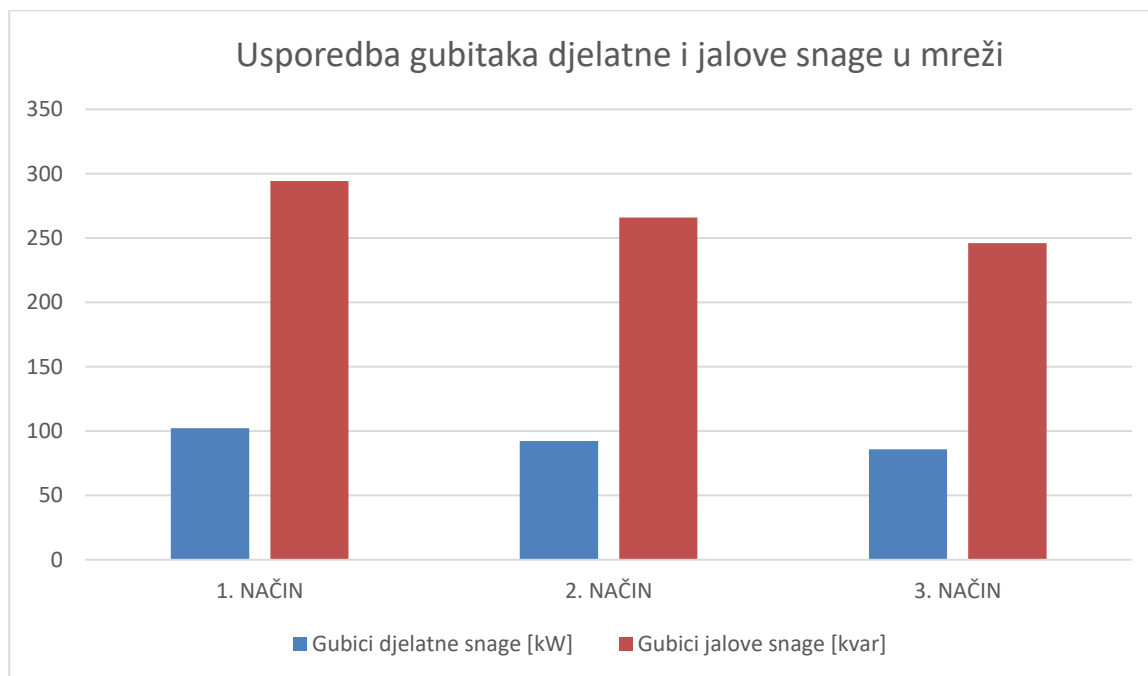
Slika 6.15 Prikaz naponskog profila mreže sa spojenim baterijskim spremnikom na sabirnice 611, 652 i 675

Na slici 6.22 su prikazani naponski profili nakon integracije baterijskog spremnika djelatne snage 100 kW i 100 kvar jalove snage, te je vidljivo da naponi na svim sabirnicama prelaze nominalnu vrijednost od 1 p.u.

Tablica 6.5 Strujno – naponske prilike u mreži u slučaju kad je spojen sustav za pohranu električne energije

	Djelatna snaga [kW]	Jalova snaga [kvar]	Prividna snaga [kVA]
Proizvodnja električne energije	300,00	300,00	424,26
Tok snage iz nadređene mreže	3267,42	1336,16	3530,06
Opterećenje mreže	3481,51	2111,35	4071,69
Opterećenje mreže pri nazivnom naponu	3466,00	2102,00	4053,59
Gubici u mreži	85,91	246,04	

Dodatnim priključenjem baterijskog spremnika na sabirnicu 675 se izazvalo povećanje proizvedene djelatne snage iznosa 300 kW i jalove snage iznosa 300 kvar, kao rezultat predaje snage u mrežu. Analogno tome smanjili su se i gubici koji iznose 85,91 kW djelatne snage i 246,04 kvar jalove snage. Navedeni podaci su prikazani u tablici 6.5.



Slika 6.16 Usporedba gubitaka u mreži u drugom slučaju

Kako bi se lakše prikazali rezultati provedeni u tri slučaja integriranja baterijskih spremnika na sabirnice 611, 652 i 675, prikazana je slika 6.16 na kojoj je vidljivo smanjenje gubitaka u mreži. Integracija baterijskih spremnika na navedene sabirnice je izazvala kompenziranje djelatnih i jalovih gubitaka u mreži dajući pritom snagu u mrežu. Baterijski spremnici su u ovom slučaju kapacitivnog karaktera.

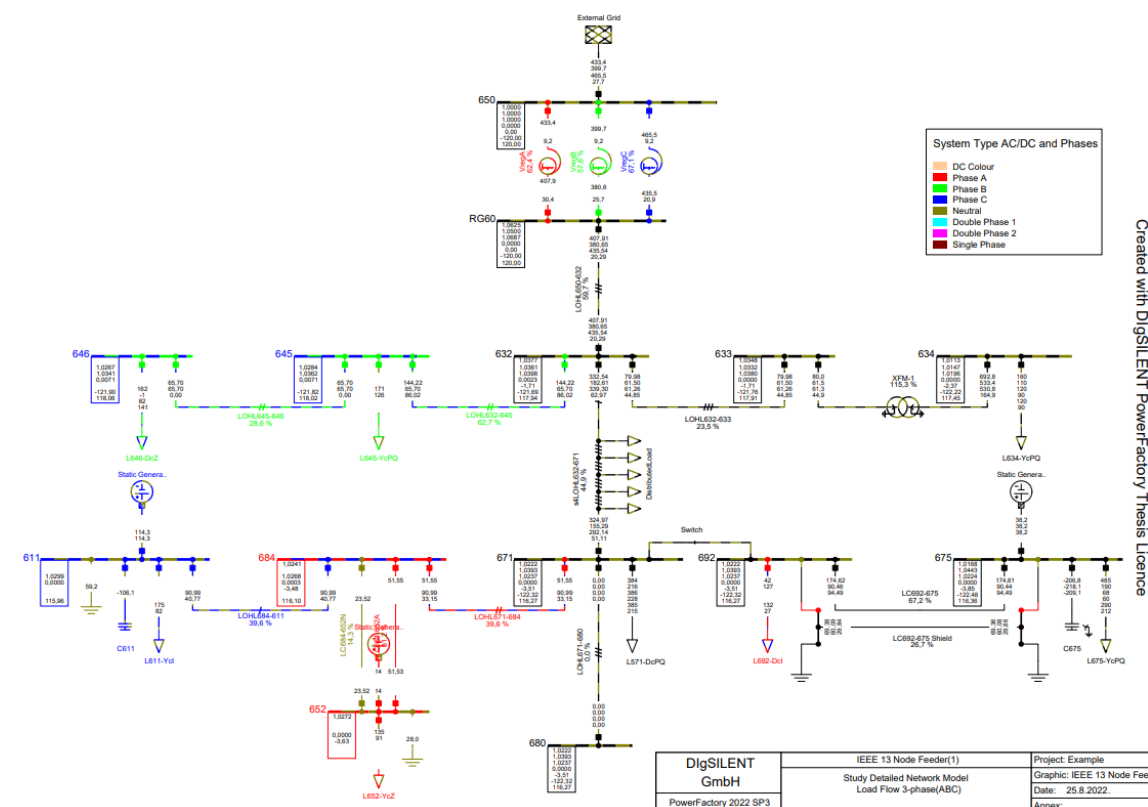
6.3 Treći slučaj – povećanje snage baterijskih spremnika

U trećem slučaju provodila se simulacija na način da su baterijski spremnici energije ostavljeni na istom mjestu, točnije na sabirnicama 611, 652 i 675. U ovom slučaju mjesto je ostalo isto, ali su se povećavali parametri djelatne i jalove snage svih baterijskih spremnika. Iznosi snaga su se povećavali dok god su gubici u mreži se smanjivali, pazeći pritom da iznos napona na sabirnicama ne prelazi unaprijed određenu normu od +10%. Simulacija se provodila do trenutka kad su gubici počeli rasti, odnosno kad je napon prešao +10%.

Tablica 6.6 Načini spajanja baterijskih spremnika u mrežu

Mjesto spajanja baterijskih spremnika	Djelatna snaga baterijskog spremnika [kW]	Jalova snaga baterijskog spremnika [kvar]
Sabirnice 611, 652 i 675	200	200
Sabirnice 611, 652 i 675	300	300
Sabirnice 611, 652 i 675	400	400
Sabirnice 611, 652 i 675	500	500

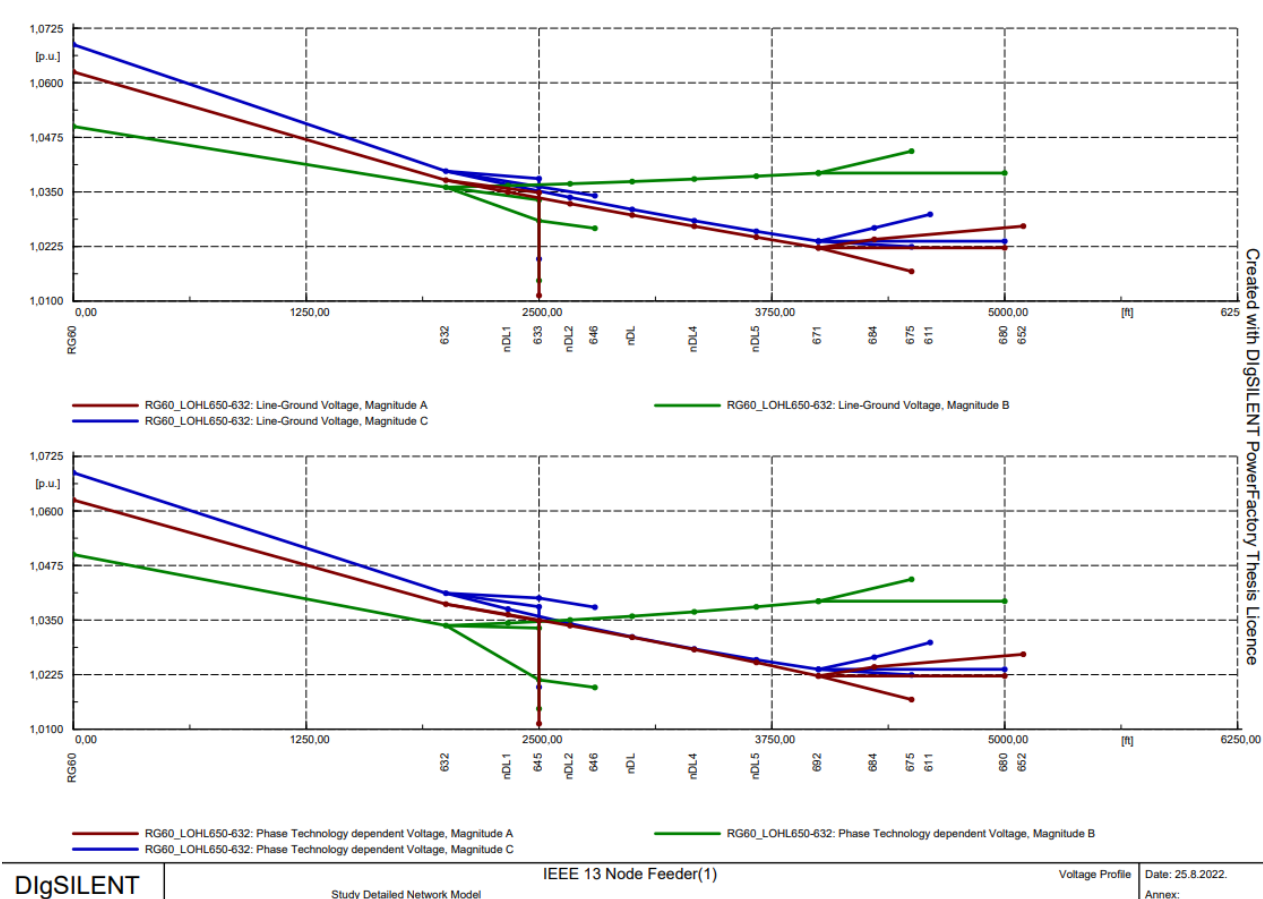
1. NAČIN – mjesto spajanja baterijskih spremnika ostaje isto, odnosno na sabirnice 611, 652 i 675, kao što je i prikazano slikom 6.26. Vrijednosti djelatne i jalove snage u ovom slučaju su se postavile na iznose 200 kW i 200 kvar.



Slika 6.17 Prikaz sheme sa spojenim baterijskim spremnikom na sabirnice 611, 652 i 675

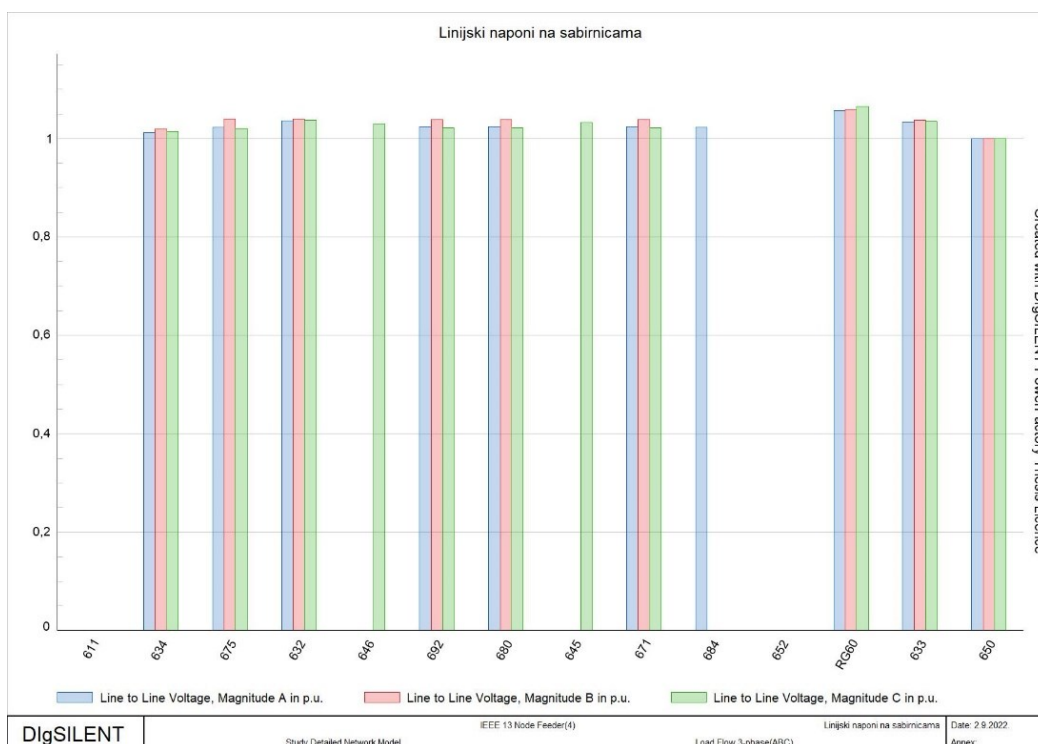
Na slici 6.17 su prikazani rezultati proračuna tokova snaga kada su na sabirnice 611, 652 i 675 spojeni baterijski spremnici djelatne snage 200 kW i jalove snage 200 kvar.

6. ANALIZA ALOKACIJE SUSTAVA ZA POHRANU ENERGIJE U PROGRAMSKOJ PODRŠCI DIGSILENT POWER FACTORY



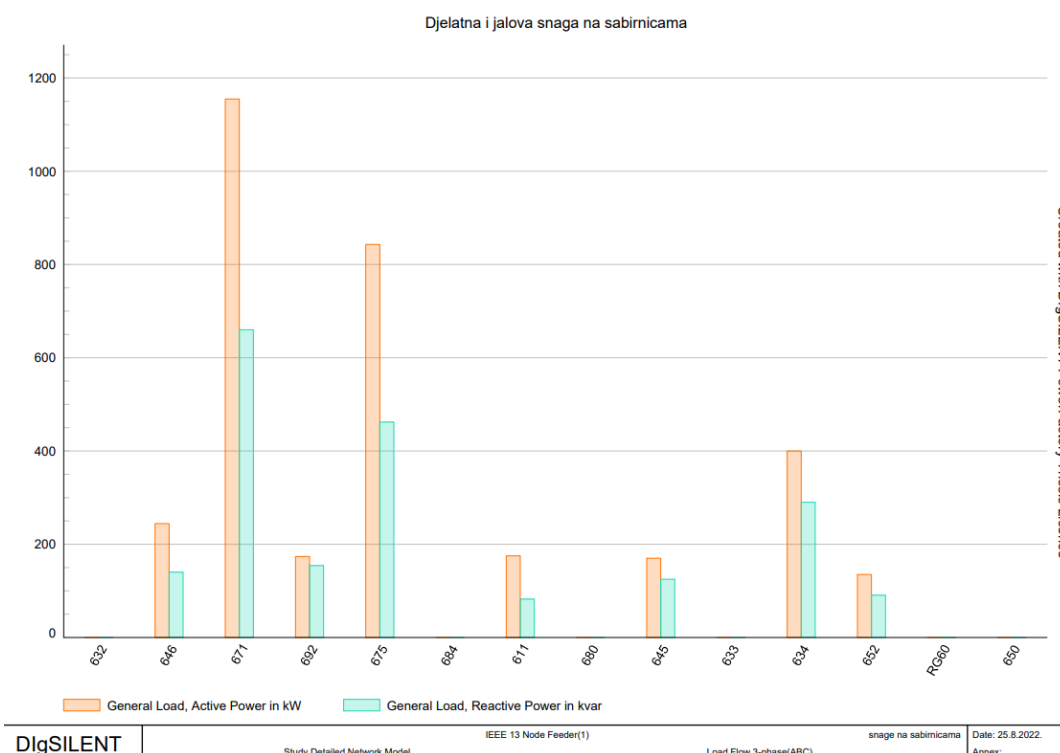
Slika 6.18 Prikaz naponskog profila mreže sa spojenim baterijskim spremnikom na sabirnice 611, 652 i 675

Naponski profili prikazani su na slici 6.27 nakon provedenog proračuna tokova snaga i vidljiv je porast iznosa faznih napona na sabirnicama zbog povećanja snaga baterijskih spremnika. Najmanji napon fazni napon iznosa 1,03 p.u. na sabirnici 645.



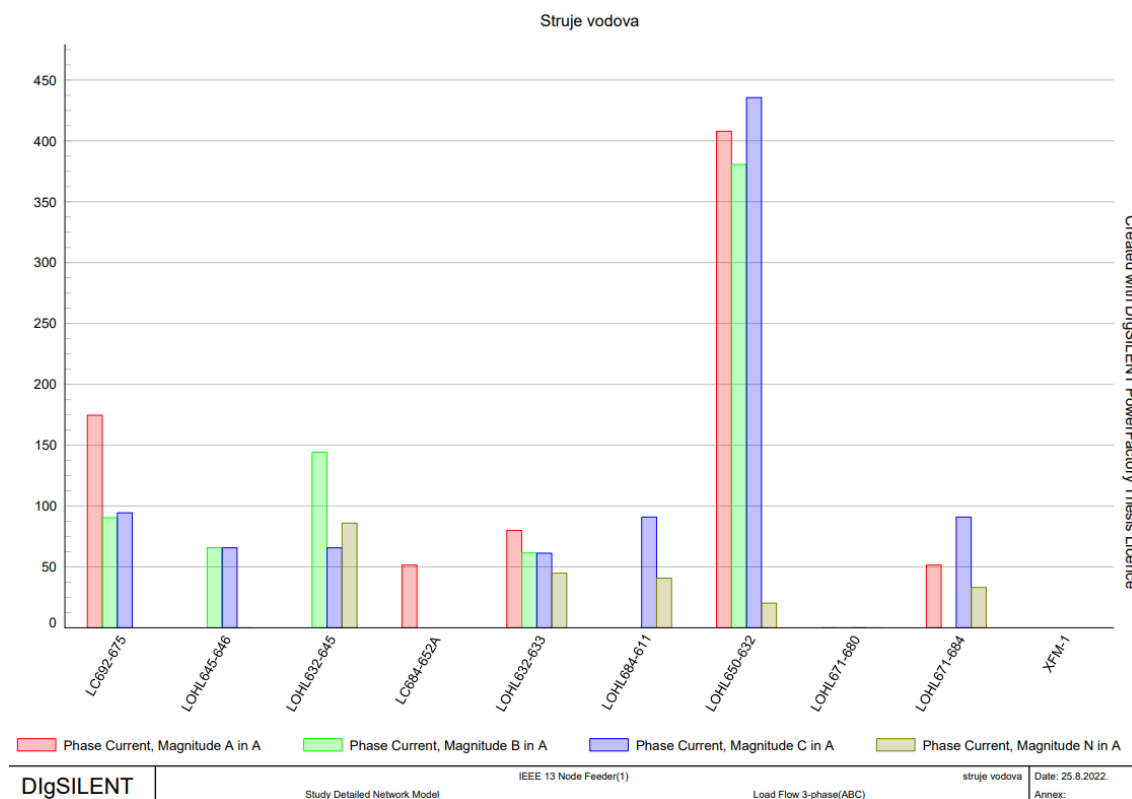
Slika 6.19 Prikaz linijskih napona na sabirnicama

Nakon postavljanja baterijskih spremnika na višu snagu, došlo je do porasta iznosa linijskih napona na svim sabirnicama u sustavu kao što je prikazano na slici 6.19.



Slika 6.20 Prikaz djelatne i jalove snage na sabirnicama

Kao i u prethodnim slučajevima, vrijednosti tereta djelatne i jalove snage su ostale iste, kao što je prikazano na slici 6.20, iz razloga što baterijski spremnici predaju snagu u mrežu.



Slika 6.21 Prikaz struja vodova u mreži

Iz slike 6.21 je vidljivo smanjenje amplituda struja vodova LC692-675, LOHL684-611 i LC684-652A nakon priključenja baterijskih spremnika energije djelatne snage 200 kW i jalove snage 200 kvar na sabirnice 611, 652 i 675.

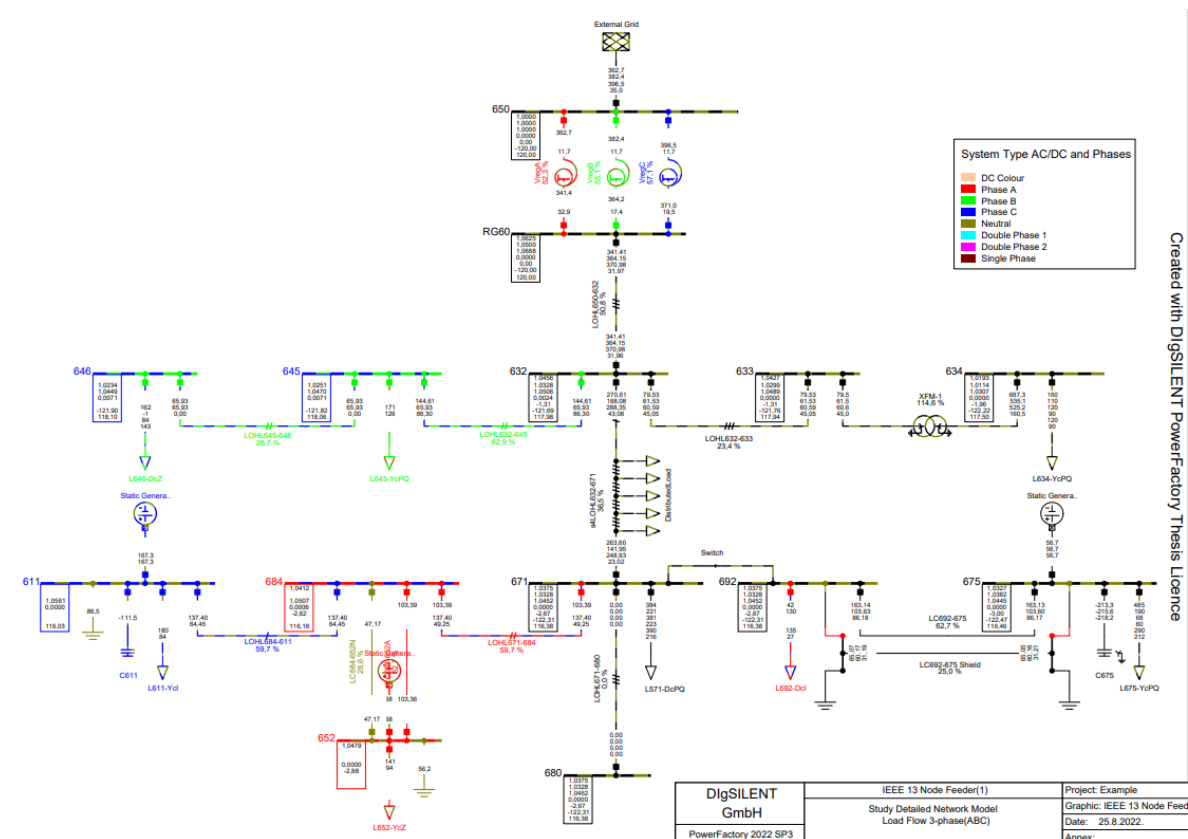
Tablica 6.7 Strujno – naponske prilike u mreži u slučaju kad je spojen sustav za pohranu električne energije

	Djelatna snaga [kW]	Jalova snaga [kvar]	Prividna snaga [kVA]
Proizvodnja električne energije	600,00	600,00	848,53
Tok snage iz nadređene mreže	2964,55	967,59	3118,46
Opterećenje mreže	3496,12	2120,62	4089,00
Opterećenje mreže pri nazivnom naponu	3466,00	2102,00	4053,59
Gubici u mreži	68,43	187,00	

6. ANALIZA ALOKACIJE SUSTAVA ZA POHRANU ENERGIJE U PROGRAMSKOJ PODRŠCI DIGSILENT POWER FACTORY

Iz tablice 6.7 je vidljivo kako se povećala proizvedena djelatna snaga iznosa 600 kW i jalova snaga iznosa 600 kvar zbog predaje snage u mrežu od strane baterijskih spremnika. Analogno tome došlo je do smanjenja gubitaka djelatne snage u mreži iznosa 68,43 kW i jalove snage 187,00 kvar.

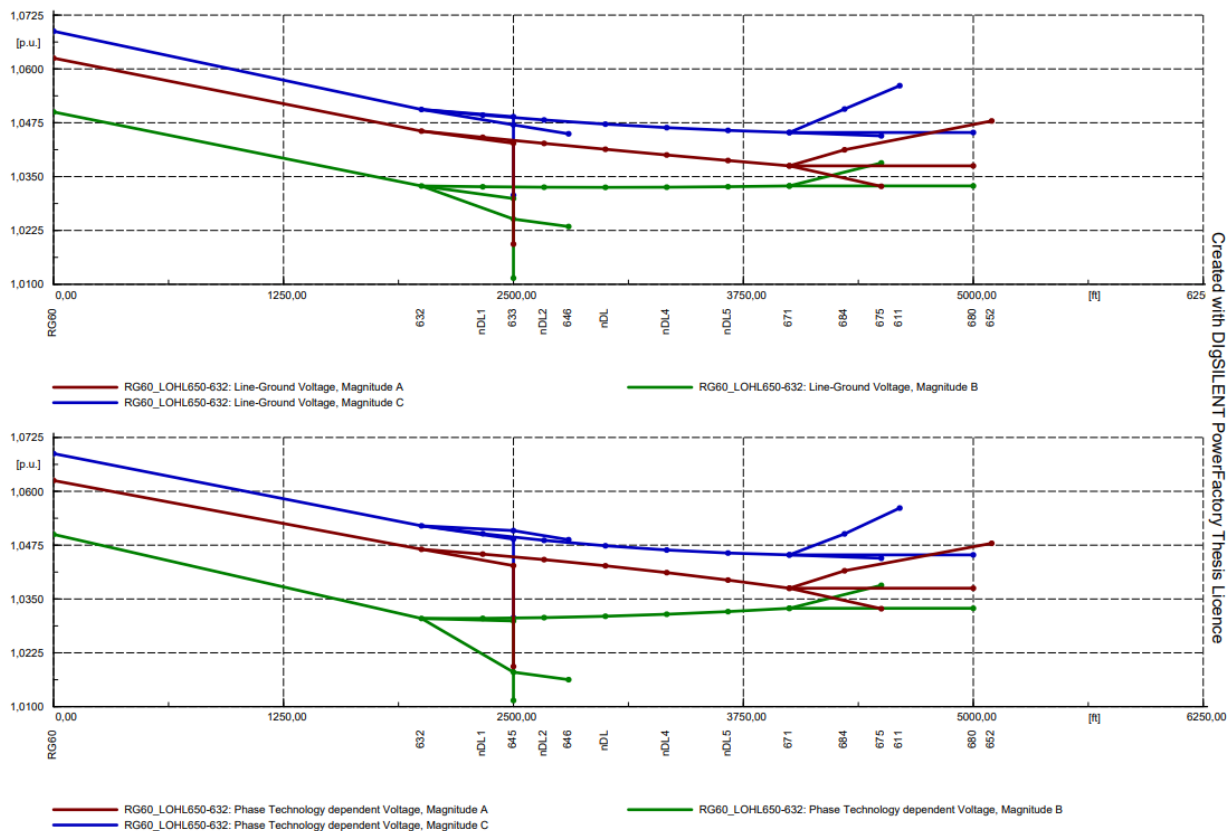
2. NAČIN – u ovom slučaju mjesto priključenja baterijskih spremnika također je nepromjenjeno, ali su se postavile veće vrijednosti djelatne i jalove snage baterijskog spremnika energije te one iznose 300 kW i 300 kvar.



Slika 6.22 Prikaz sheme sa spojenim baterijskim spremnikom na sabirnice 611, 652 i 675

Slika 6.22 prikazuje rezultate proračuna tokova snaga nakon postavljanja snaga baterijskih spremnika na 300 kW djelatne i 300 kvar jalove snage na sabirnicama 611, 652 i 675.

6. ANALIZA ALOKACIJE SUSTAVA ZA POHRANU ENERGIJE U PROGRAMSKOJ PODRŠCI DIGSILENT POWER FACTORY



DlgSILENT | Study Detailed Network Model | IEEE 13 Node Feeder(1) | Voltage Profile | Date: 25.8.2022. | Annex:

Slika 6.23 Prikaz naponskog profila mreže sa spojenim baterijskim spremnikom na sabirnice 611, 652 i 675

Kao i u prethodnom slučaju na slici 6.32 se prikazuju naponski profili sabirnica u mreži, te su svi naponi unutar granica +10%, a najmanji fazni napon je iznosa 1,03 p.u. na sabirnici 633 nakon povećanja snaga integriranih baterijskih spremnika.

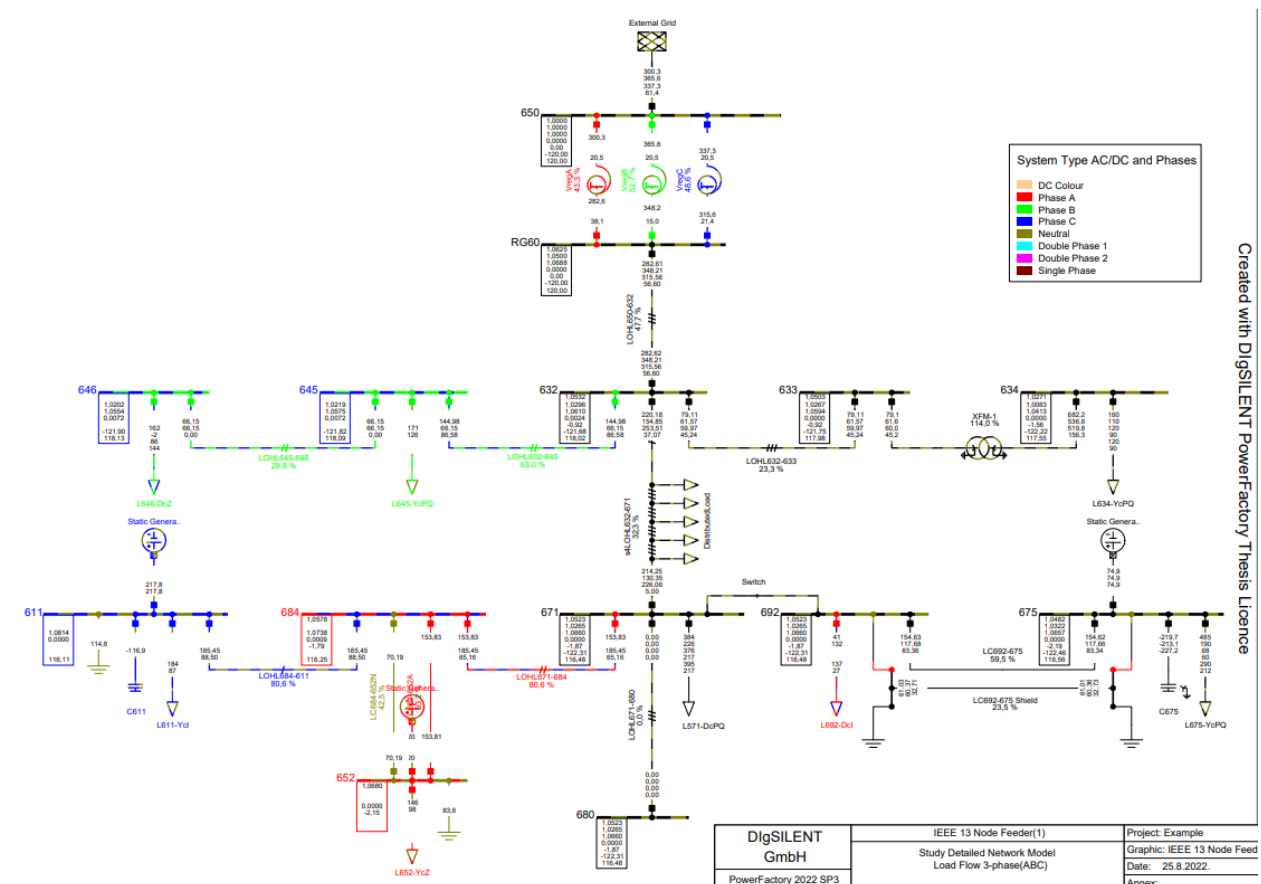
Tablica 6.8 Strujno – naponske prilike u mreži u slučaju kad je spojen sustav za pohranu električne energije

	Djelatna snaga [kW]	Jalova snaga [kvar]	Prividna snaga [kVA]
Proizvodnja električne energije	900,00	900,00	1272,79
Tok snage iz nadređene mreže	2668,79	617,04	2739,19
Opterećenje mreže	3510,28	2129,60	4105,76
Opterećenje mreže pri nazivnom naponu	3466,00	2102,00	4053,59
Gubici u mreži	58,51	146,02	

6. ANALIZA ALOKACIJE SUSTAVA ZA POHRANU ENERGIJE U PROGRAMSKOJ PODRŠCI DIGSILENT POWER FACTORY

Iz tablice 6.8 je vidljivo smanjenje gubitaka djelatne snage na iznos od 58,51 kW i jalove snage na iznos od 146,02 kvar u mreži. Proizvedena prividna snaga se povećala na iznos od 1272,79 kVA, nakon povećanja snage baterijskih spremnika spojenih na sabirnice 611, 652 i 675.

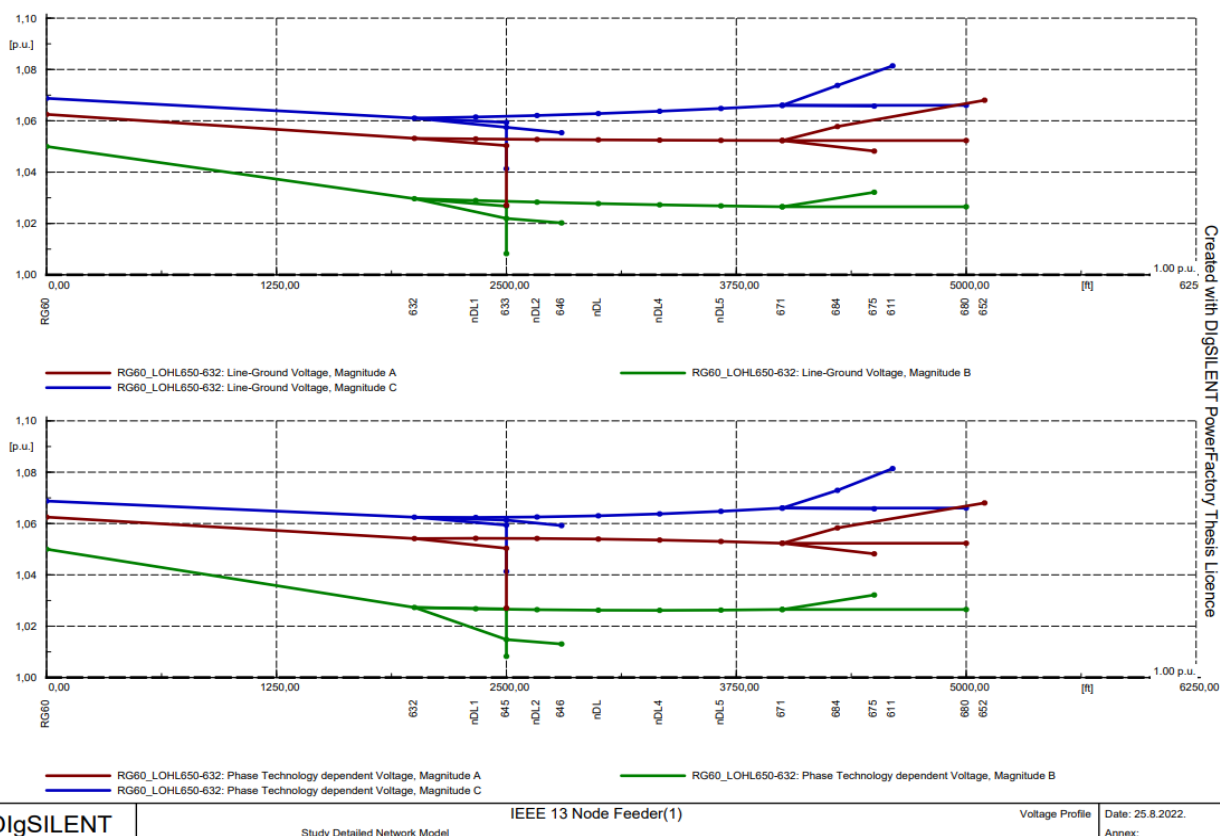
3. NAČIN – u ovom slučaju mjesto postavljanja baterijskih spremnika također ostaje ne-promjenjeno, na sabirnicama 611, 652 i 675 ali su se povećale vrijednosti djelatne i jalove snage baterijskog spremnika te one iznose 400 kW i 400 kvar.



Slika 6.24 Prikaz sheme sa spojenim baterijskim spremnikom na sabirnice 611, 652 i 675

Nakon što su postavljene vrijednosti baterijskih spremnika na 400 kW djelatne snage i 400 kvar proveden je proračun tokova snaga, a rezultati su prikazani na slici 6.24.

6. ANALIZA ALOKACIJE SUSTAVA ZA POHRANU ENERGIJE U PROGRAMSKOJ PODRŠCI DIGSILENT POWER FACTORY



Slika 6.25 Prikaz naponskog profila mreže sa spojenim baterijskim spremnikom na sabirnice 611, 652 i 675

Naponski profili sabirnica nakon provedenoih tokova sange su prikazani na slici 6.25, gdje je vidljiv porast faznog napona iznosa 1,081 p.u. na sabirnici 611, dok je najmanji fazni napon, iznosa 1,03 p.u., na sabirnici 633.

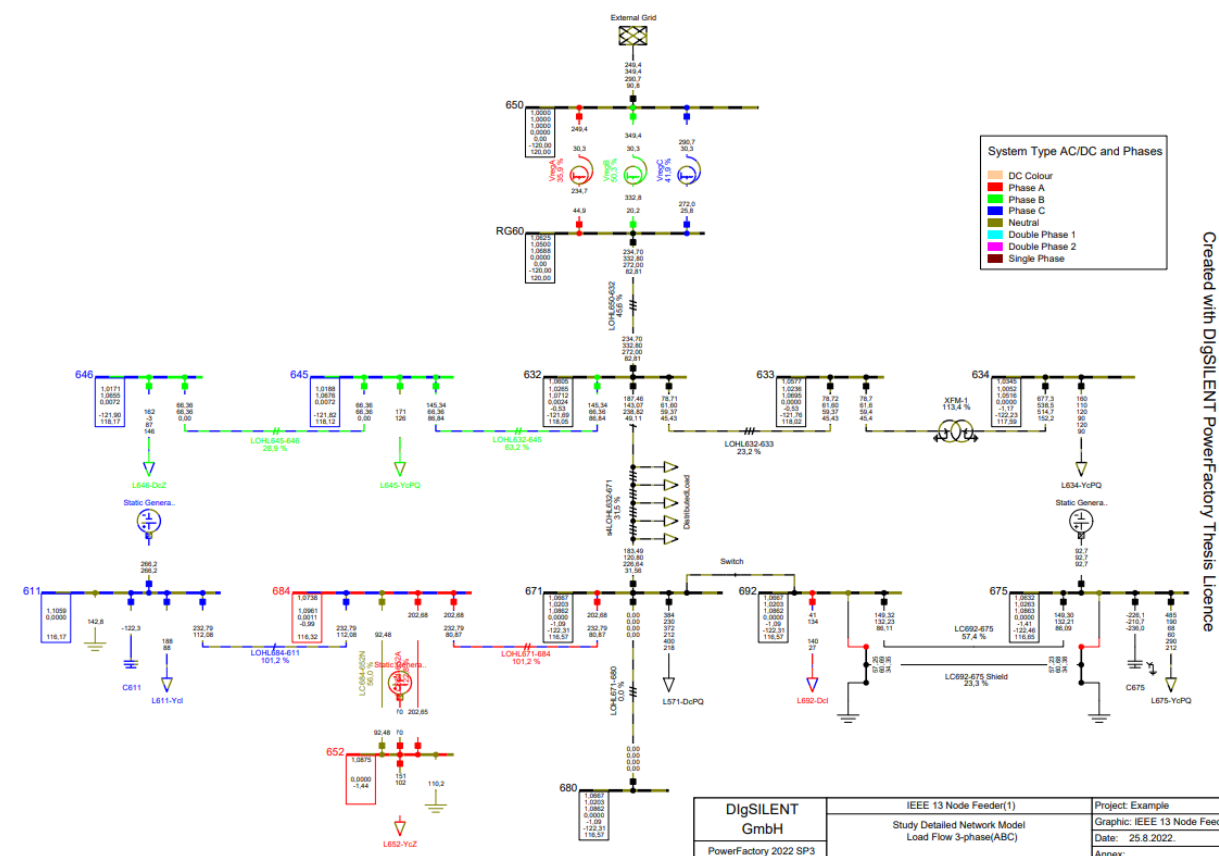
Tablica 6.9 Strujno – naponske prilike u mreži u slučaju kad je spojen sustav za pohranu električne energije

	Djelatna snaga [kW]	Jalova snaga [kvar]	Prividna snaga [kVA]
Proizvodnja električne energije	1200,00	1200,00	1697,06
Tok snage iz nadređene mreže	2379,38	282,61	2396,11
Opterećenje mreže	3524,04	2138,33	4122,05
Opterećenje mreže pri nazivnom naponu	3466,00	2102,00	4053,59
Gubici u mreži	55,35	121,20	

6. ANALIZA ALOKACIJE SUSTAVA ZA POHRANU ENERGIJE U PROGRAMSKOJ PODRŠCI DIGSILENT POWER FACTORY

U tablici 6.9 su prikazane snage u mreži nakon što se povećala snaga baterijskih spremnika spojenih na sabirnice 611, 652 i 675. Proizvedena snaga se povećala na iznos od 1200 kW djelatne i 1200 kvar jalove snage, dok su se gubici u mreži smanjili na vrijednost od 55,35 kW djelatne i 121,2 kvar jalove snage.

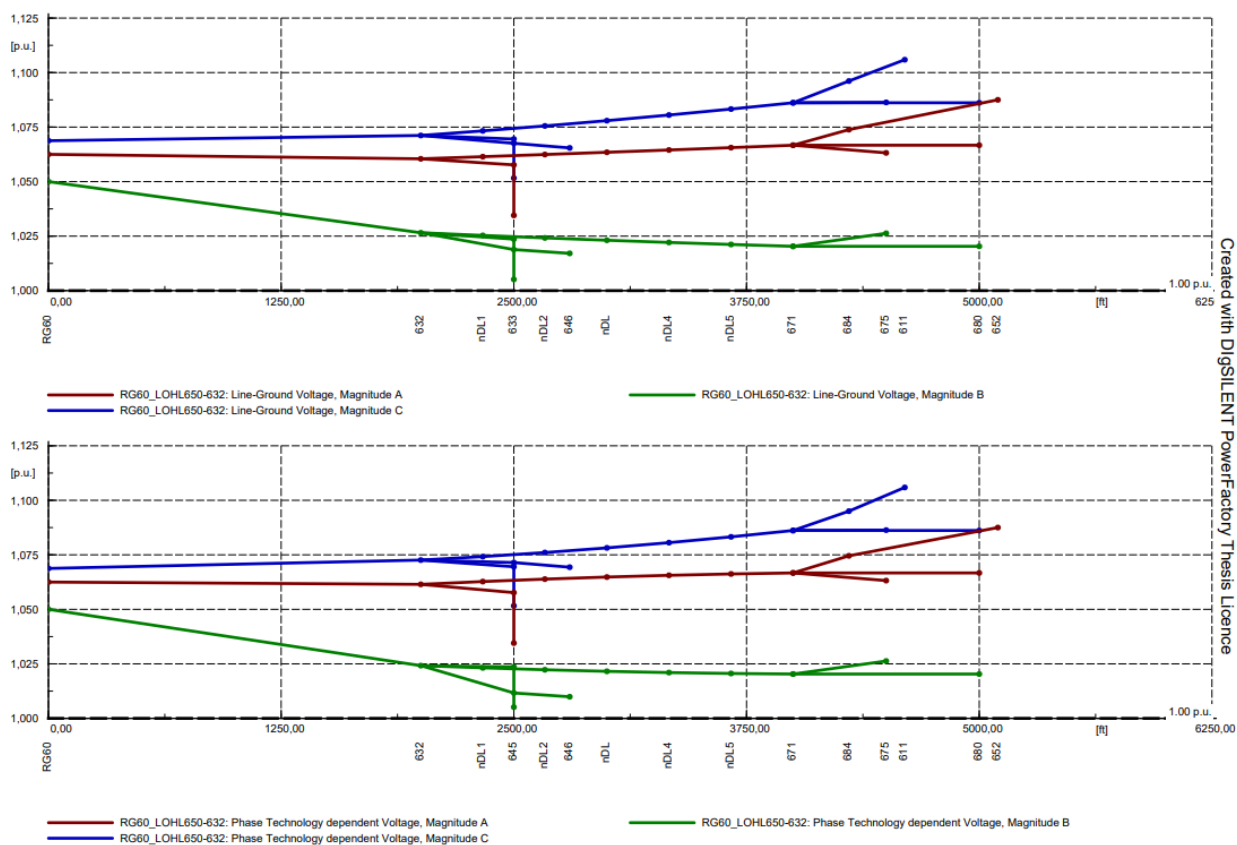
4. NAČIN – u ovom slučaju mjesta postavljanja baterijskih spremnika također su nepromjenjena, na sabirnicama 611, 652 i 675, ali su se povećali iznosi djelatne i jalove snage na baterijskim spremnicima te oni iznose 500 kW i 500 kvar.



Slika 6.26 Prikaz sheme sa spojenim baterijskim spremnikom na sabirnice 611, 652 i 675

Slika 6.26 prikazuje rezultate proračuna tokova snaga nakon povećanja snage baterijskih spremnika na 500 kW djelatne snage i 500 kvar jalove snage.

6. ANALIZA ALOKACIJE SUSTAVA ZA POHRANU ENERGIJE U PROGRAMSKOJ PODRŠCI DIGSILENT POWER FACTORY



DlgSILENT | Study Detailed Network Model | IEEE 13 Node Feeder(1) | Voltage Profile | Date: 25.8.2022. Annex:

Slika 6.27 Prikaz naponskog profila mreže sa spojenim baterijskim spremnikom na sabirnice 611, 652 i 675

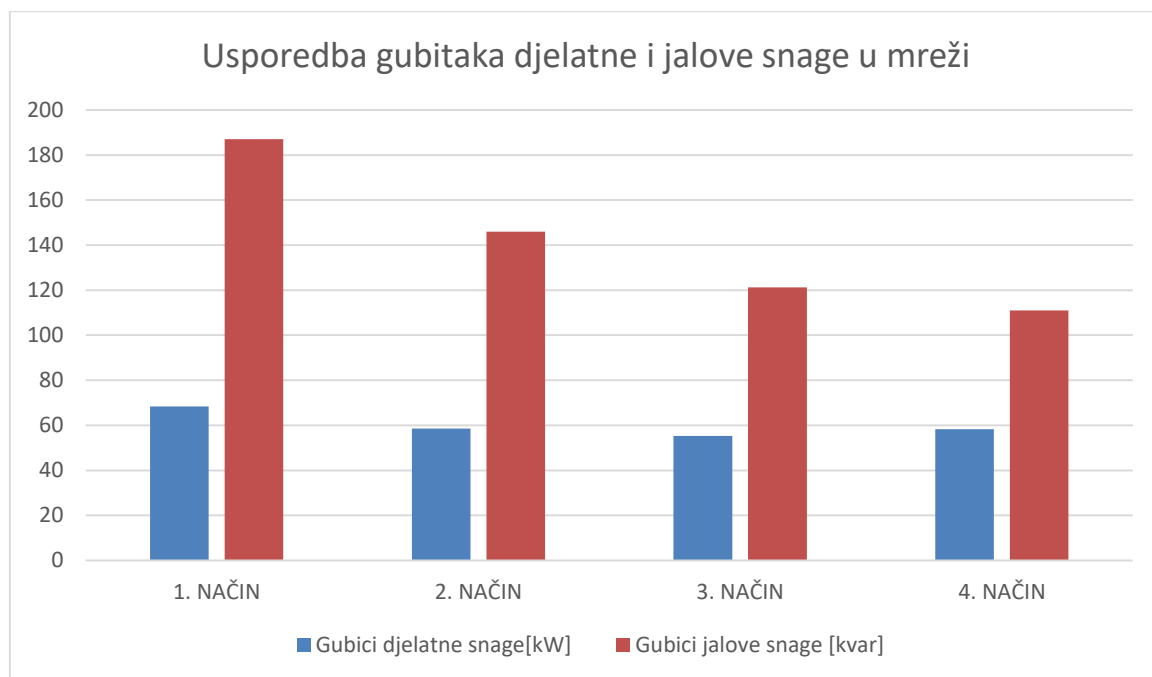
Povećanje snage baterijskih spremnika je izazvalo povećanje faznih napona na sabirnicama u sustavu, a to je prikazano na slici 6.27 naponskih profila mreže. Najveći fazni napon iznosa 1,106 p.u. je na sabirnici 611 faze C, dok je najmanji fazni napon iznosa 1,02 p.u. na sabirnici 633 faze B.

Tablica 6.10 Strujno – naponske prilike u mreži u slučaju kad je spojen sustav za pohranu električne energije

	Djelatna snaga [kW]	Jalova snaga [kvar]	Prividna snaga [kVA]
Proizvodnja električne energije	1500,00	1500,00	2121,33
Tok snage iz nadređene mreže	2095,70	-37,28	2096,03
Opterećenje mreže	3537,44	2146,82	4137,91
Opterećenje mreže pri nazivnom naponu	3466,00	2102,00	4053,59

Gubici u mreži	58,27	110,96	
----------------	-------	--------	--

Kao i u prethodnim slučajevima, u tablici 6.10 su prikazane snage u mreži nakon povećanja snage baterijskih spremnika. Vidljiv je porast djelatnih gubitaka na 58,27 kW djelatne snage, dok su se jalovi gubici smanjili na iznos od 110,96 kvar.



Slika 6.28 Usporedba gubitaka u mreži u trećem slučaju

Na slici 6.28 su prikazani svi provedeni načini povećanja snaga baterijskih spremnika na sabirnicama 611, 652 i 675. Povećanjem djelatne i jalove snage baterijskog spremnika dolazi do smanjenja gubitaka u mreži. U četvrtom načinu došlo je do porasta djelatnih gubitaka u mreži, dok su se jalovi gubici smanjivali. Analogno tome, fazni napon na sabirnici 611 prelazi unaprijed dopušteni limit od +10%. Baterijskim spremnicima se nastoje kompenzirati gubici u sustavu te oni daju snagu u mreži.

6.4 Četvrti slučaj – integracija baterijskih spremnika na sve sabirnice u sustavu

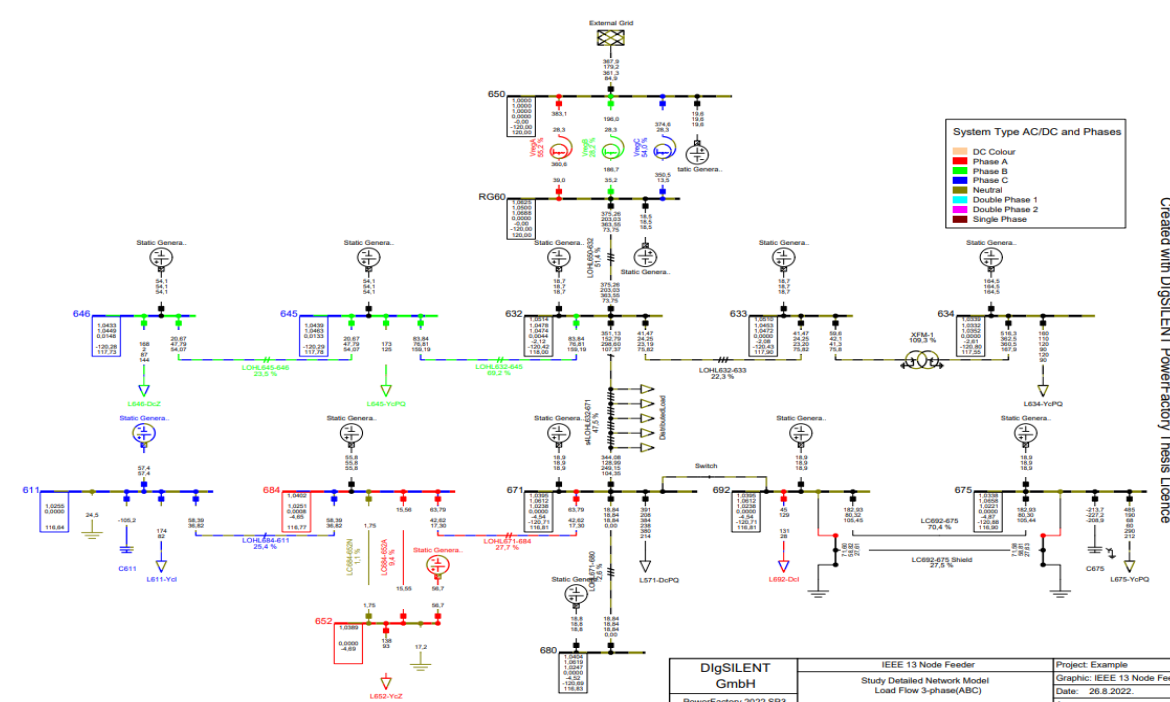
Simulacija se u četvrtom slučaju provodila na način da su se baterijski spremnici energije spojili na sve sabirnice u mreži. Za potrebe simulacije, početna vrijednost snage baterijskih spremnika je postavljena na 100 kW te se postupno povećavala dok god su se gubici smanjivali, pazeći pritom da napon sabirnica ne prelazi dopuštenu normu od +10%. U trenutku povećanja

gubitaka ili prelaska napona izvan dopuštene norme od +10% simulacija četvrtog slučaja se završava.

Tablica 6.11 Načini spajanja baterijskih spremnika u mrežu

Mjesto spajanja baterijskih spremnika	Djelatna snaga baterijskog spremnika [kW]	Jalova snaga baterijskog spremnika [kvar]
1. Sve sabirnice	100	100
2. Sve sabirnice	200	200
3. Sve sabirnice	300	300

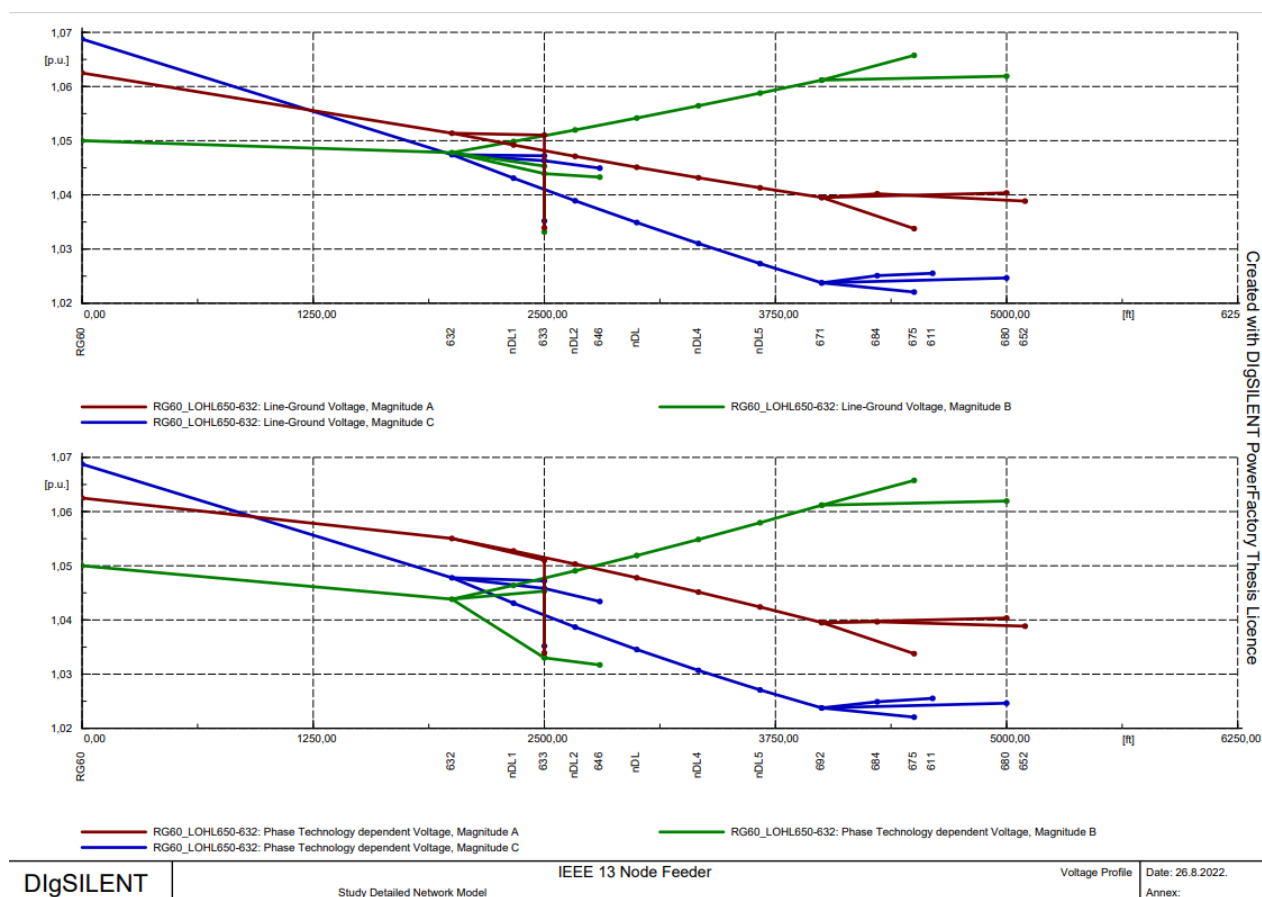
1. NAČIN - u ovom slučaju postavljeni parametri djelatne i jalove snage baterijskih spremnika električne energije iznose 100 kW i 100 kvar. Baterijski spremnici energije postavili su se na sve sabirnice u mreži.



Slika 6.29 Prikaz sheme sa spojenim baterijskim spremnicima na svim sabirnicama u sustavu

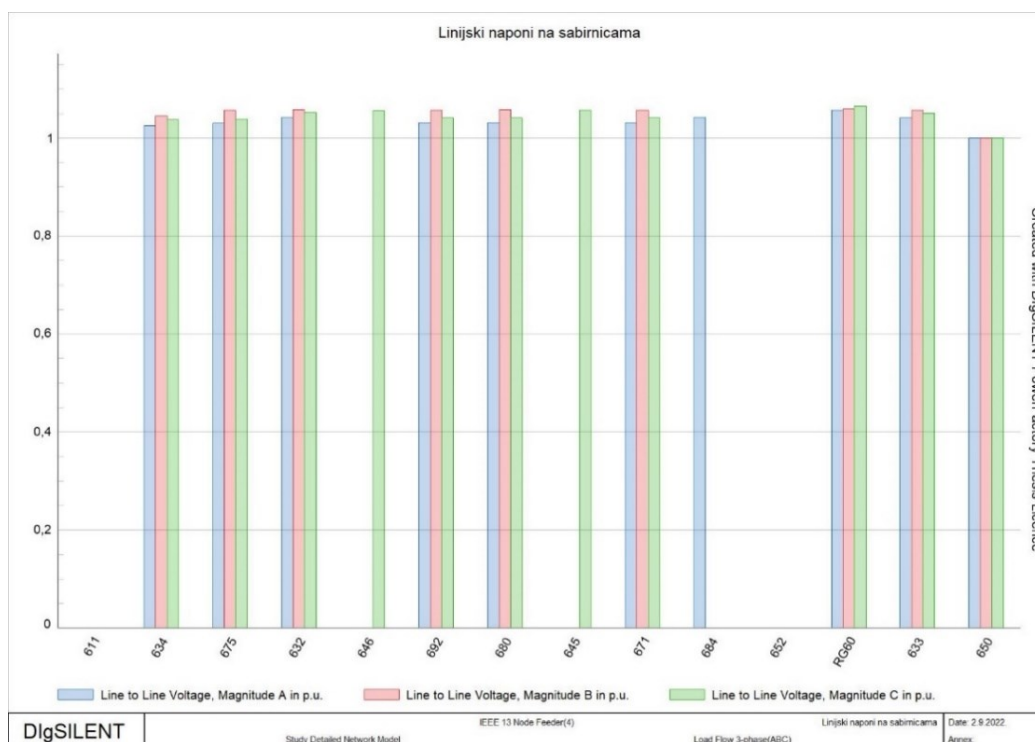
Slika 6.29 prikazuje rezultate nakon provedenih tokova sanga u mreži nakon integracije baterijskih spremnika na svaku sabirnicu u sustavu. Snaga svih baterijskih spremnika u ovom slučaju je 100 kW djelatne i 100 kvar jalove snage.

6. ANALIZA ALOKACIJE SUSTAVA ZA POHRANU ENERGIJE U PROGRAMSKOJ PODRŠCI DIGSILENT POWER FACTORY



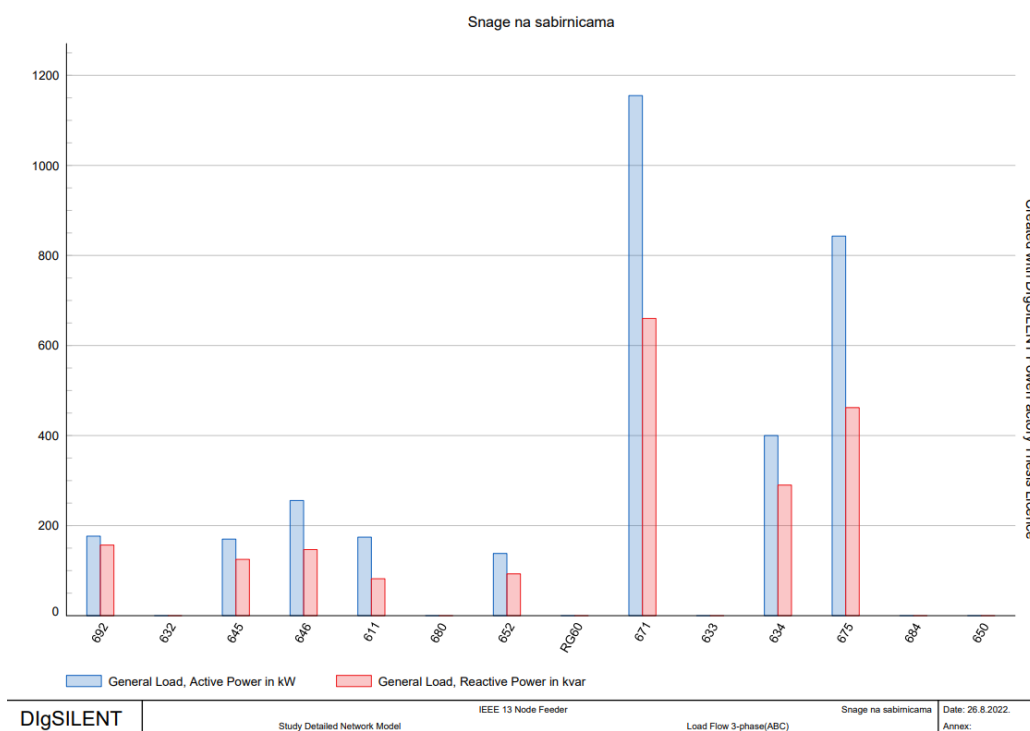
Slika 6.30 Prikaz naponskog profila mreže sa spojenim baterijskim spremnicima na sve sabirnice u sustavu

Naponski profili su prikazani na slici 6.30 nakon što su priključeni baterijski spremnici na sve sabirnice u sustavu. Vidljivo je kao je najveći fazni napon iznosa 1,06 p.u. na sabirnici RG60 faze C, dok je najmanji fazni napon iznosa 1,02 p.u. na sabirnici 675 faze C. Za razliku od prethodnog slučaja došlo je do smanjenja iznosa faznih napona u mreži.



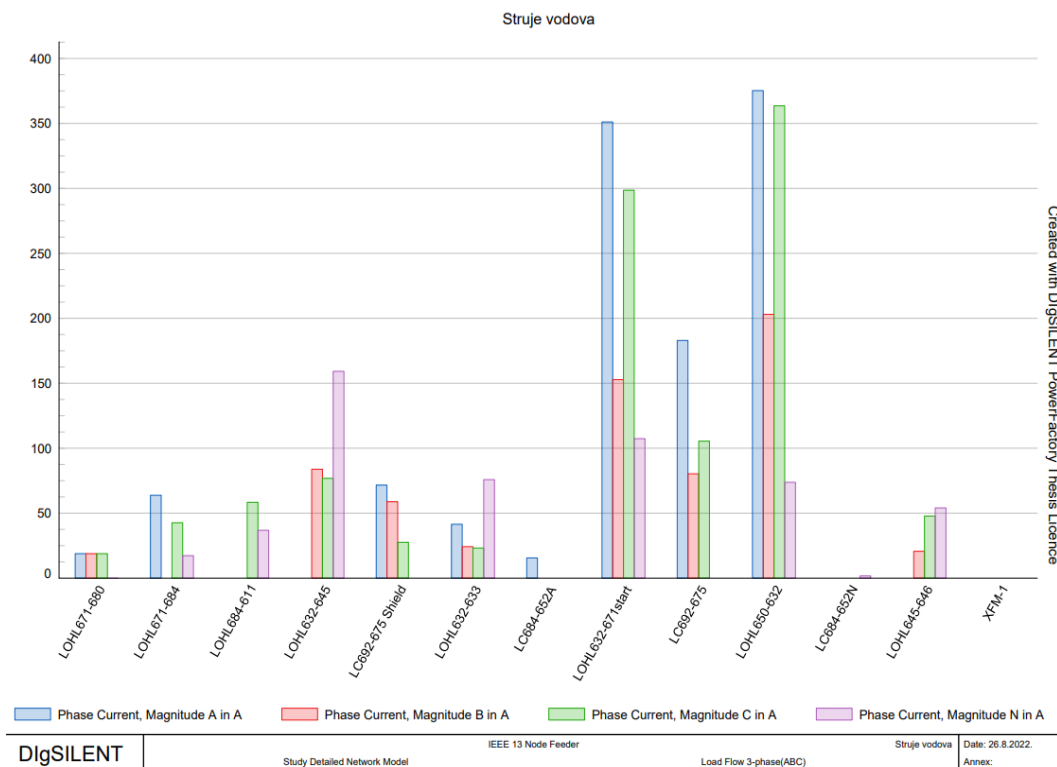
Slika 6.31 Prikaz linijskih napona na sabirnicama

Na slici 6.31 su prikazani iznosi linijskih napona na sabirnicama u sustavu nakon priključenja baterijskih spremnika na sve sabirnice djelatne snage 100 kW i jalove snage 100 kvar.



Slika 6.32 Prikaz djelatne i jalove snage na sabirnicama

Baterijski spremnici koji su integrirani na spomenutim sabirnicama, mijenjaju tokove snaga u nadređenoj mreži kao rezultat davanja snage u istu. Teret na sabirnicama je ostao isti nakon integracije baterijskih spremnika kao što je prikazano na slici 6.32.



Slika 6.33 Prikaz struja vodova u mreži

Najveću amplitudu ima vod LOHL650-632 koja iznosi 360 A faze A, pri integraciji svih baterijskih spremnika na sabirnice, dok vod LOHL671-680 ima najmanji iznos amplitude od 18,8 A.

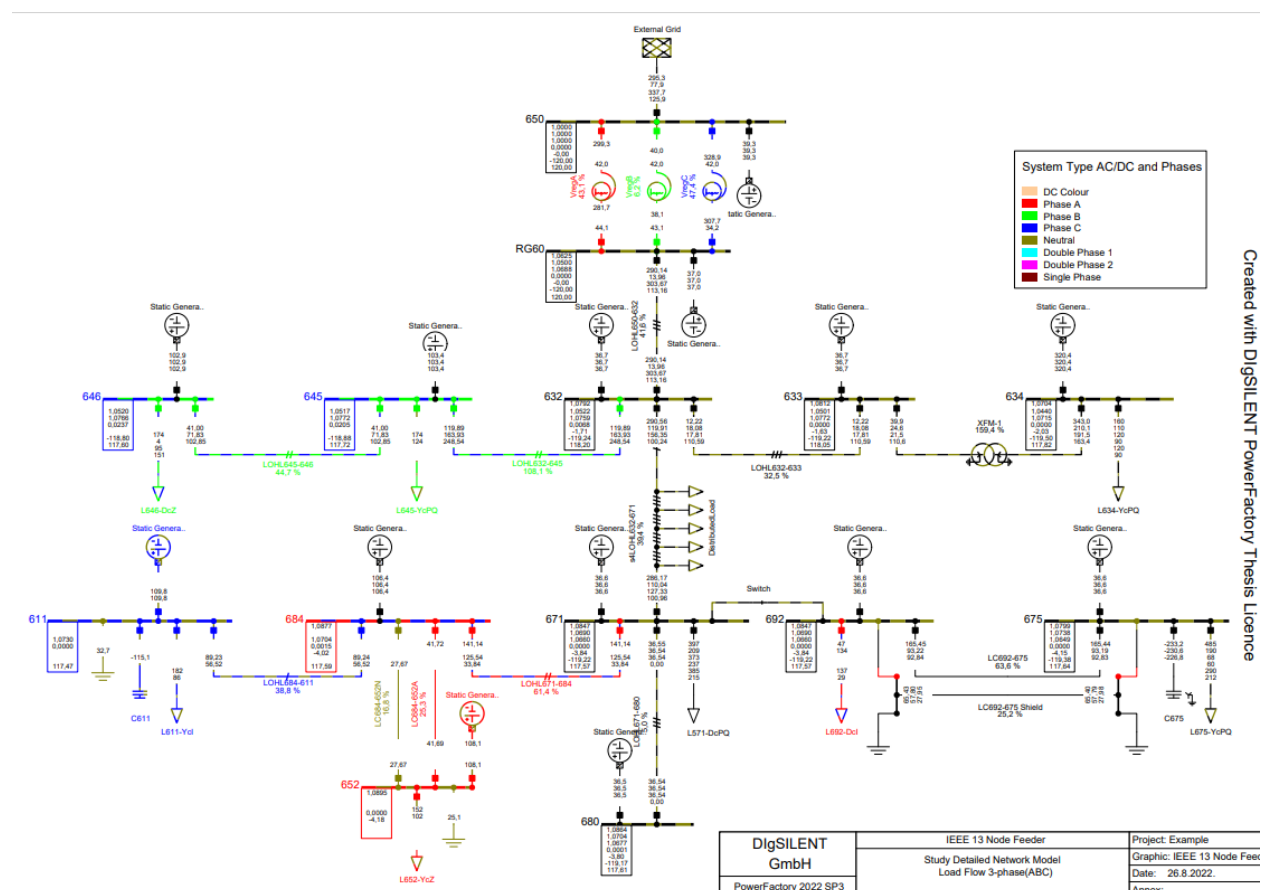
Tablica 6.12 Strujno – naponske prilike u mreži u slučaju kad je spojen sustav za pohranu električne energije

	Djelatna snaga [kW]	Jalova snaga [kvar]	Prividna snaga [kVA]
Proizvodnja električne energije	1400,00	1400,00	1979,89
Tok snage iz nadređene mreže	2166,37	117,42	2169,55
Opterećenje mreže	3512,74	2131,43	4108,81
Opterećenje mreže pri nazivnom naponu	3466,00	2102,00	4053,59
Gubici u mreži	53,62	140,97	

6. ANALIZA ALOKACIJE SUSTAVA ZA POHRANU ENERGIJE U PROGRAMSKOJ PODRŠCI DIGSILENT POWER FACTORY

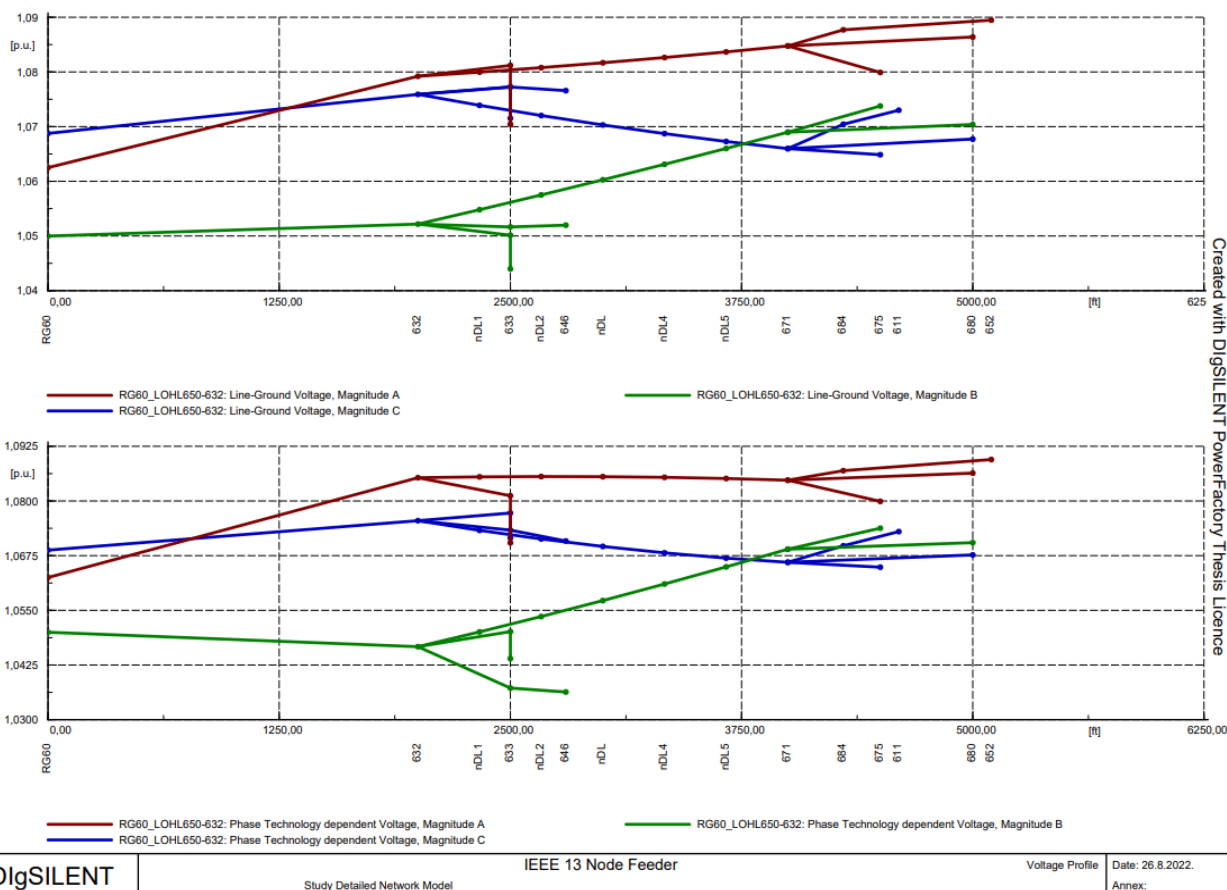
Tablica 6.12 prikazuje iznose snaga nakon priključenja baterijskih spremnika djelatne snage 100 kW i 100 kvar na sve sabirnice u sustavu, te gubici mreže iznose 53,62 kW djelatne i 140,97 kvar jalove snage.

2. NAČIN – u ovom slučaju baterijski spremnici također su postavljeni na sve sabirnice u mreži ali su povećani njihovi parametri djelatne i jalove snage te oni iznose 200 kW i 200 kvar.



Slika 6.34 Prikaz sheme sa spojenim baterijskim spremnicima na svim sabirnicama u sustavu. Prikaz rezultata nakon provedenog proračuna tokova snage je dan na slici 6.34, za slučaj kada se poveća snaga na baterijskim spremnicima na 200 kW djelatne i 200 kvar jalove snage.

6. ANALIZA ALOKACIJE SUSTAVA ZA POHRANU ENERGIJE U PROGRAMSKOJ PODRŠCI DIGSILENT POWER FACTORY



Slika 6.35 Prikaz naponskog profila mreže sa spojenim baterijskim spremnicima na sve sabirnice u sustavu

Povećanje snage baterijskih spremnika je izazvalo povećanje faznih napona na sabirnicama u sustavu, a to je prikazano na slici 6.35 naponskih profila mreže. Najveći fazni napon iznosa 1,09 p.u. je na sabirnici 652 faze A, dok je najmanji fazni napon iznosa 1,03 p.u. na sabirnici 633 faze B.

Tablica 6.13 Strujno – naponske prilike u mreži u slučaju kad je spojen sustav za pohranu električne energije

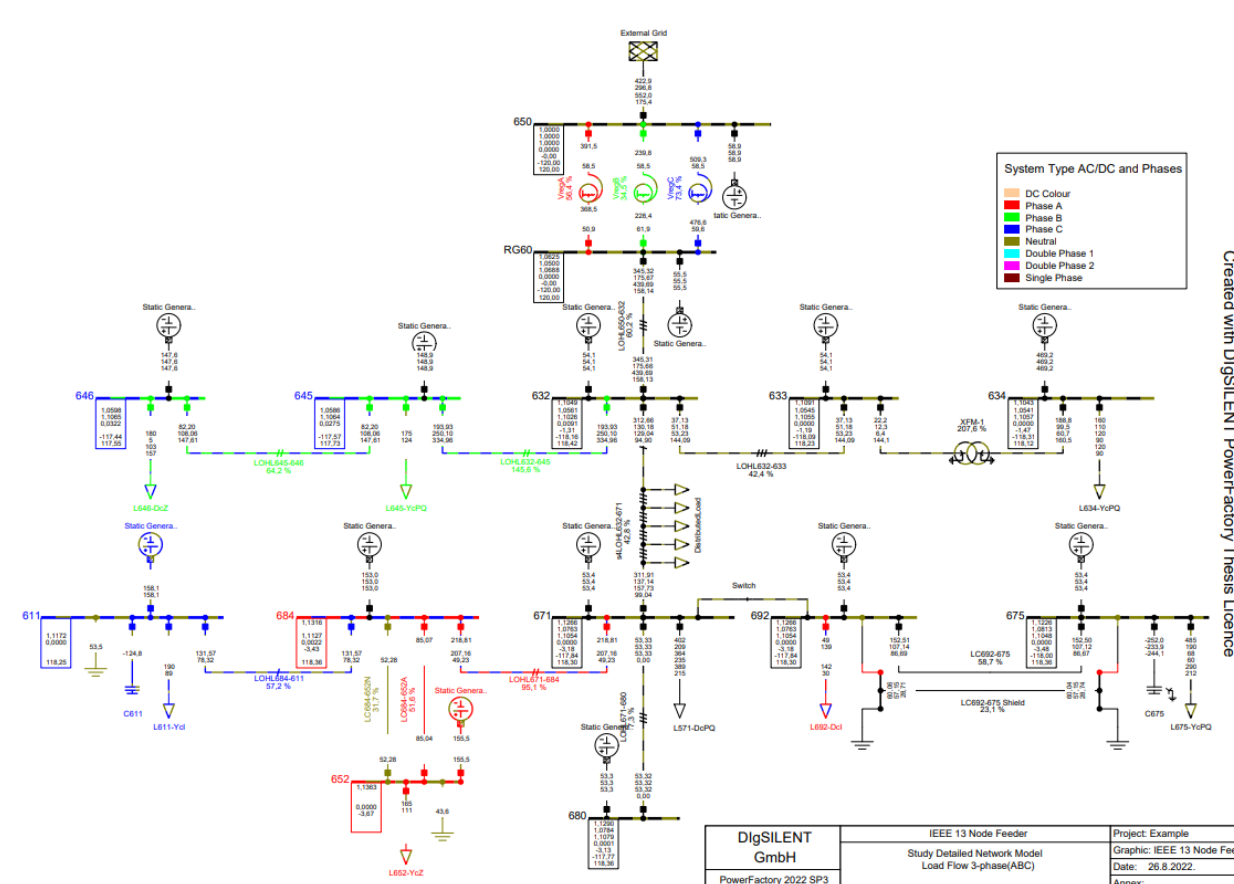
	Djelatna snaga [kW]	Jalova snaga [kvar]	Prividna snaga [kVA]
Proizvodnja električne energije	2800,00	2800,00	3959,79
Tok snage iz nadređene mreže	803,21	-1349,82	1570,72
Opterećenje mreže	3556,23	2159,28	4160,44
Opterećenje mreže pri nazivnom naponu	3466,00	2102,00	4053,59

6. ANALIZA ALOKACIJE SUSTAVA ZA POHRANU ENERGIJE U PROGRAMSKOJ PODRŠCI DIGSILENT POWER FACTORY

Gubici u mreži	46,98	96,65	
----------------	-------	-------	--

Za razliku od prethodnog slučaja u tablici 6.13 je prikazao smanjenje gubitaka mreže na 46,98 kW i 96,65 kvar jalove snage. Povećanje snage baterijskih spremnika je prouzrokovalo kompenziranje gubitaka u mreži.

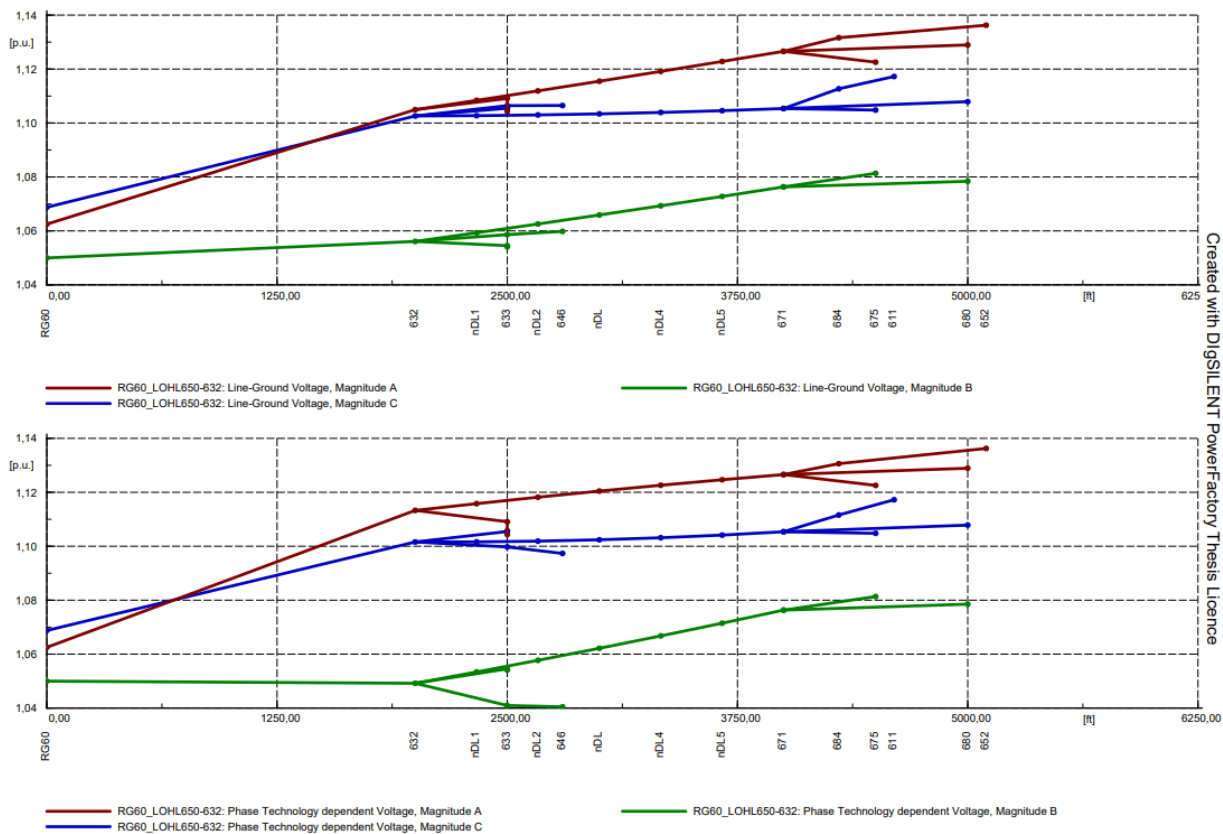
3. NAČIN – u ovom slučaju baterijski spremnici također su postavljeni na sve sabirnice u mreži ali su povećani njihovi parametri djelatne i jalove snage te oni iznose 300 kW i 300 kvar.



Slika 6.36 Prikaz sheme sa spojenim baterijskim spremnicima na svim sabirnicama u sustavu

U zadnjem načinu se povećala snaga baterijskih spremnika na 300 kW djelatne i 300 kvar, te je proveden proračun tokova snaga, a rezultati su prikazani na slici 6.36.

6. ANALIZA ALOKACIJE SUSTAVA ZA POHRANU ENERGIJE U PROGRAMSKOJ PODRŠCI DIGSILENT POWER FACTORY



DIGSILENT	Study Detailed Network Model	IEEE 13 Node Feeder	Voltage Profile
			Date: 26.8.2022. Annex:

Slika 6.37 Prikaz naponskog profila mreže sa spojenim baterijskim spremnicima na sve sabirnice u sustavu

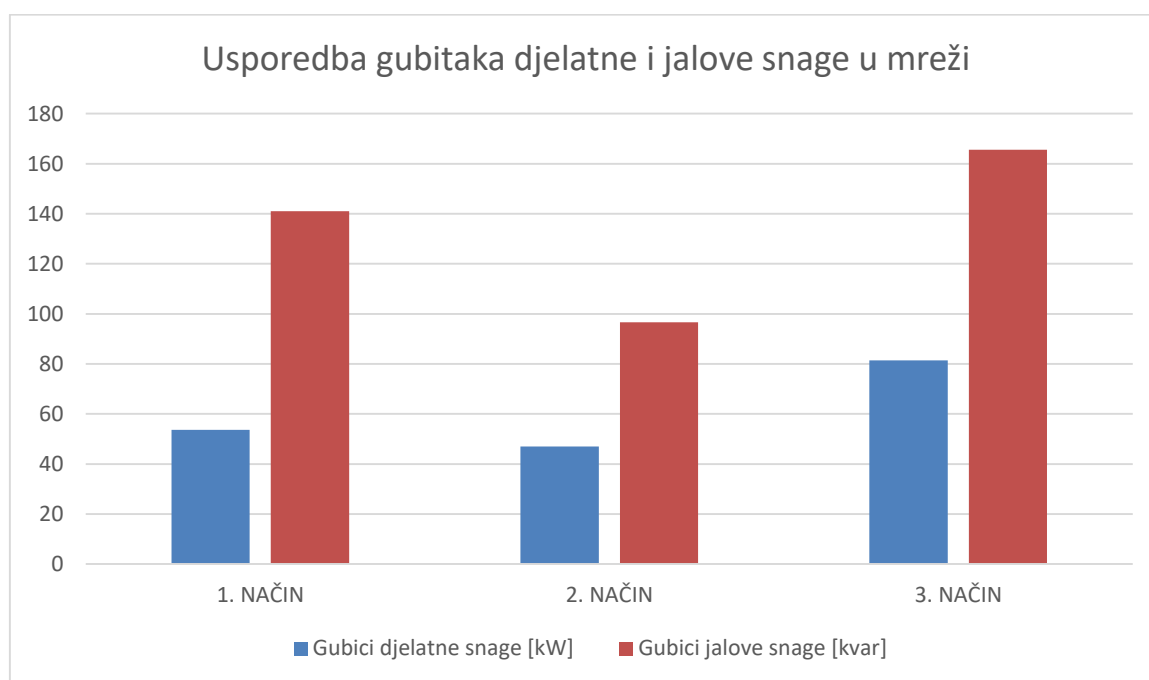
Naponski profili su prikazani na slici 6.37 nakon što su priključeni baterijski spremnici na sve sabirnice u sustavu. Vidljivo je kao je najveći fazni napon iznosa 1,13 p.u. na sabirnici 652 faze A, dok je najmanji fazni napon iznosa 1,05 p.u. na sabirnici RG60 faze C. Za razliku od prethodnog slučaja došlo je do povećanja iznosa faznih napona u mreži te prelaze unaprijed dopušteni limit od +10%, što nije pogodan slučaj.

Tablica 6.14 Strujno – naponske prilike u mreži u slučaju kad je spojen sustav za pohranu električne energije

	Djelatna snaga [kW]	Jalova snaga [kVAr]	Prividna snaga [kVA]
Proizvodnja električne energije	4200,00	4200,00	5939,69
Tok snage iz nadređene mreže	-521,17	-2704,62	2754,37
Opterećenje mreže	3597,46	2185,67	4209,38

Opterećenje mreže pri nazivnom naponu	3466,00	2102,00	4053,59
Gubici u mreži	81,36	165,53	

Kao što je vidljivo u tablici 6.14 došlo je do porasta gubitaka kada su na sve sabirnice spojeni baterijski spremnici snage 300 kW djelatne i 300 kvar jalove snage. Vidljiva je i negativna snaga iz nadređene mreže iz razloga što je tok snaga iz mikromreže usmjeren ka nadređenoj.

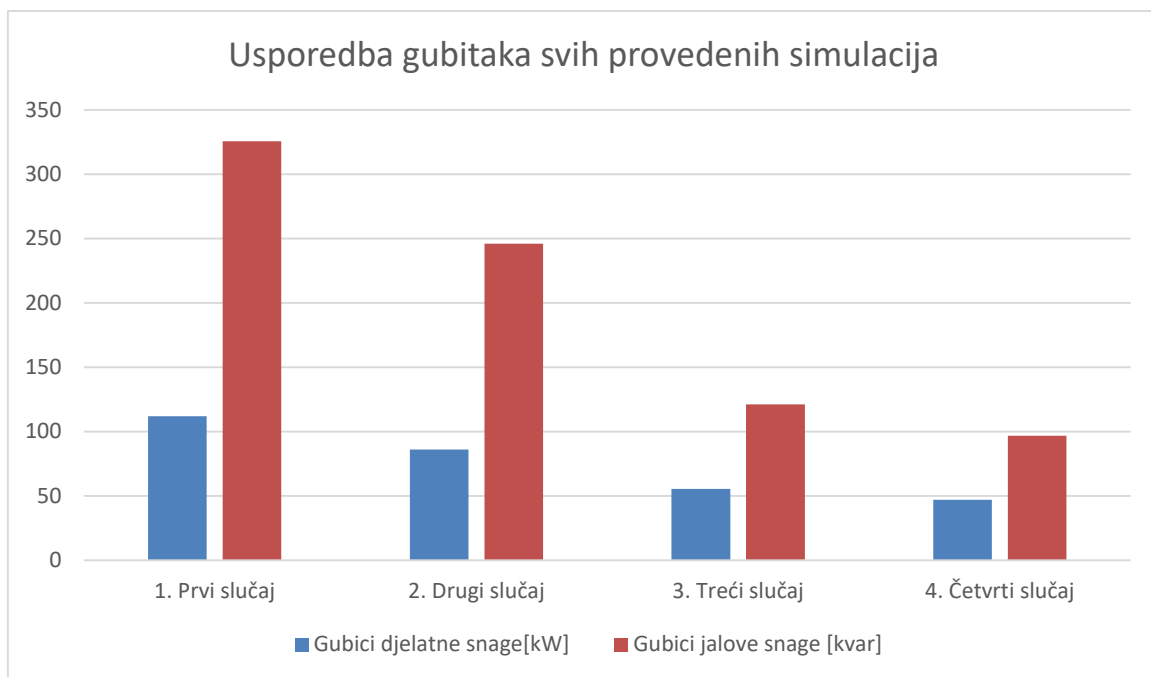


Slika 6.38 Usporedba gubitaka u mreži u četvrtom slučaju

Na slici 6.38 su prikazani podaci iz tri provedena načina simulacije, od koji je treći način izazvao povećanje gubitaka u mreži, te se došlo do zaključka da je drugi način najpogodniji jer posjeduje najmanje gubitke u mreži te se naponi mreže nalaze unutar limita od +10%. Baterijski spremnici nisu ekonomski isplativi kako bi se ugrađivali pojedinačno, ali treba paziti i pri povećanju njihove snage.

6.5 Usporedba gubitaka svih provedenih simulacija

Kako bi se usporedili svi slučajevi provedene analize i simulacije na grafikonu 6.4, uzeti su najmanji gubici djelatne i jalove snage mreže iz svakog slučaja. Iz slike 6.4 vidljivo je smanjenje gubitaka djelatnih i jalovih snaga kao rezultat priključenja baterijskih spremnika. Može se primjetiti kako su u četvrtom slučaju gubici djelatne i jalove snage najmanji.



Slika 6.39 Usporedba gubitaka svih provedenih simulacija

7. ZAKLJUČAK

Razvojem mikromreža koje su povezane na distribucijsku mrežu, nastoji se sve više implementirati obnovljive izvore energije kao distribucijske izvore. Mikromreža nudi mogućnost odvojenog rada od mreže jer se napaja od distribucijskih izvora. Tokovi snaga u ovakvoj mreži nisu jednosmjerni, a mikromreža postaje aktivna mreža. Pored obnovljivih izvora koriste se sustavi za pohranu električne energije s ciljem smanjenja jalovih gubitaka u mreži, kao i poboljšanje naponskih prilika.

Za potrebe simulacije, u diplomskom radu je korištena analitička metoda pronalaska optimalne alokacije baterijskih spremnika električne energije. Analiza je provedena na IEEE 13 Bus testnom sustavu na način da se na mjesta nižeg napona postavljaju baterijski spremnici, a ujedno se smanjuju gubici radne i jalove snage u mreži. Provedena analiza se sastoji od četiri različita slučaja. U prvom slučaju izvršena je simulacija sustava bez baterijskih spremnika električne energije. Nakon provedenog proračuna tokova snaga, odabrano se sabirnicu 611 kao iduće mjesto spajanja baterijskog spremnika električne energije iz razloga što je na toj sabirnici napon najniži. U drugom slučaju je postavljen baterijski spremnik radne snage 100 kW i jalove snage 100 kvar na sabirnicu 611 kako bi se povećao napon, te se nakon provedenog proračuna tokova snaga ustanovio najniži napon na sabirnici 652. Integracijom baterijskog spremnika na sabirnicu 611, smanjili su se gubici radne i jalove snage mreže. Isto kao i u prethodnom slučaju na sabirnicu 652 se postavlja baterijski spremnik iste snage. Iz dobivenog naponskog profila i proračuna tokova snaga sabirnica 675 se odabire kao iduće mjesto postavljanja baterijskog spremnika električne energije iz razloga najnižeg napona. Rezultat postavljanja baterijskih spremnika na spomenute sabirnice je poboljšan naponski profil mreže i smanjeni gubici mreže. U trećem slučaju mjesto priključka baterijskih spremnika je ostalo nepromjenjeno, a iznosi parametara radne i jalove snage baterijskih spremnika su se povećavali. Nakon iterativnog povećavanja iznosa radne i jalove snage spremnika, dolazi se do zaključka da se nakon 400 kW i 400 kvar gubici u mreži povećavaju, a naponi u mreži prelaze dopušteni limit od +10%. U četvrtom slučaju baterijski spremnici su spojeni na sve sabirnice u sustavu. Parametri baterijskih spremnika su postavljeni na 100 kW i 100 kvar, te su se postupno povećavali kroz iduće dvije simulacije. Nakon provedenih proračuna tokova snaga te dobivenih naponskih profila mreže može se zaključiti kako gubici kreću rasti, odnosno naponi prelaze dopušteni limit od +10%, pri snagama baterijskih spremnika većim od 200 kW i 200 kvar.

Na osnovu provedene analize, kada bi se uspoređivali samo djelatni i jalovi gubici u mreži, najoptimalnije mjesto postavljanja bile bi sve sabirnice, ali zbog ekonomskih razloga taj slučaj

nije pogodan. Analogno tome, optimalna alokacija baterijskih spremnika električne energije je na sabirnicama 611, 652 i 675, uz postavljene parametre djelatne i jalove snage baterijskih spremnika od 400 kW i 400 kvar.

LITERATURA

- [1] International Electrotechnical Commission, »Electrical Energy Storage,« 26. 12. 2011. Dostupno na : <https://www.iec.ch/basecamp/electrical-energy-storage>. [Pristupljeno 20.04.2022]
- [2] P. Alotto, M. Guarnieri, F. Moro, »Redox flow batteries for the storage of renewable energy,« *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, svez. 29, pp. 325-335, 2014.
- [3] A. Oberhofer, »Global Energy Network Institute,« 07. 2012. Dostupno na : <http://www.geni.org/globalenergy/research/energy-storage-technologies/Energy-Storage-Technologies.pdf>. [Pristupljeno 25.04.2022.]
- [4] E. Csanyi, »Smart Grid Concept and Characteristics,« Electrical Engineering Portal, 21. Ožujak 2012. Dostupno na : <https://electrical-engineering-portal.com/smart-grid-concept-and-characteristics>. [Pristupljeno 26.04.2022.]
- [5] F. Aloul, A. R. Al-Ali, R. Al-Dalky, M- Al-Mardini, W. El-Hajj, »International Journal of Smart Grid and Clean Energy,« *Smart Grid Security: Threats, Vulnerabilities and Solutions*, svez. 1, br. 1, pp. 1-6, 2012.
- [6] X. Fang, S. Misra, G. Xue, D. Yang, »Smart Grid—The New and Improved Power Grid: A Survey,« *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, svez. 14, br. 4, pp. 944-980, 2012.
- [7] P. S. Moura, G. Lopez, J. I. Moreno, A. T. de Almeida, »The role of Smart Grids to foster energy efficiency,« *Energy Efficiency*, svez. 6, br. 4, pp. 621-639, 2013.
- [8] V. Roja, M.S. Sujatha, »A Review of Optimal DG Allocation in Distribution System for Loss Minimization,« *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, pp. 15-22, 2016.
- [9] K. Bhumkittipich, W. Phuangpornpitak, »Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation for Power Loss Reduction using Particle Swarm Optimization,« *Energy procedia*, svez. 34, pp. 307-317, 2013.

- [10] P. Heng, U. Prasatsap, J. Polprasert, S. Kiravittaya, »Optimal Placement of Distributed Generation Using Analytical Approach to Minimize Losses in a University,« *GMSARN International Journal*, svez. 13, pp. 81-85, 2019.
- [11] O. Oluwole, Optimal allocation of distributed generation for power loss reduction and voltage profile improvement, Cape Town, 2016.
- [12] K. Ras Guerriche, T. Bouktir, »Optimal Allocation and Sizing of Distributed Generation with Particle Swarm Optimization Algorithm for Loss Reduction,« *Revue des Sciences et de la Technologie*, svez. 6, br. 1, pp. 59-69, 2015.
- [13] J.J. Jamian, M.M. Aman, M.W. Mustafa, G.B. Jasmon, H. Mokhlis, A.H.A. Bakar, M.N. Abdullah, "Optimum Multi DG units Placement and Sizing Based on Voltage Stability Index and PSO," Faculty of Electrical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, 2012.
- [14] M. M. Mijwel, Ant Colony Optimization, 2018.
- [15] P. Pongcharoen, H. Puangyeam, K. Pawinand, S. Vitayasak, A. Khadwilard , »Artificial Bee Colony with Random Key Technique for Production Scheduling in Capital Goods Industry,« *International Conference on Industrial Technology and Management* , svez. 49, pp. 66-70, 2012.
- [16] W. Zheng, W. Wu, B. Zhang, H. Sun, Y. Liu, »A Fully Distributed Reactive Power Optimization and Control Method for Active Distribution Networks,« *IEEE Transactions on Smart Grid*, svez. 7, br. 2, pp. 1021-1033, 2016.
- [17] R. Vadimgadu, M. S. Sujatha, »A Review of Optimal DG Allocation in Distribution System for Loss Minimization,« *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering* , pp. 15-22, 2016.
- [18] S. Akram, Q. ul Ann, »Newton Raphson Method,« *International Journal of Scientific & Engineering Research*, svez. 6, br. 7, pp. 1748-1751, 2015.
- [19] J. Momoh, Smart Grid: Fundamentals of Design and Analysis, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2012.

- [20] K. H. Yang, »Stepping Through Finite Element Analysis,« u *Basic Finite Element Method as Applied to Injury Biomechanics*, Elsevier Inc., 2018, pp. 281-308.
- [21] K. Tačković, S. Nikolovski, V. Boras, »Kratkoročno prognoziranje opterećenja primjenom modela umjetne neuronske mreže,« *Energija*, svez. 5, pp. 560-579, 2008.

SAŽETAK

Kroz rad su opisani sustavi za pohranu električne energije kao elementi elektroenergetskog sustava, njihova podjela i primjena u mikromrežama. Pored navedenog opisane su mikromreže, usporedba mikromreža sa trenutnom distribucijskom mrežom te primjena. Za određivanje alokacije baterijskih spremnika koriste se optimizacijske metode koje na matematički način daju širu predodžbu o najpogodnijem mjestu integracije baterijskih spremnika. Simulacijski dio rada je izveden pomoću programskog paketa *DiGSILENT Power Factory 2022*, kako bi se utvrdili tokovi snaga, napona i struja na IEEE testnom sustavu sa 13 sabirnica prije i poslije integracije baterijskih spremnika, a rezultati simulacije su prikazani slikama i tablicama.

Ključne riječi : sustavi za pohranu, mikromreže, baterijski spremnici, optimizacijske metode

SUMMARY

The paper will describe electrical energy storage systems as elements of the power system, their division and application in micro grids. In addition to the above, microgrids will be described, as well as comparison of microgrids with the current distribution network and their application. Determining the allocation of battery storage systems is due to optimization methods that mathematically give a broader idea of the most suitable place for the integration of battery storage systems. The operation simulation was carried out using the *DIgSILENT Power Factory 2022* software package, in order to determine the behavior of the power, voltage and current flows in the test IEEE 13 bus system before and after the integration of the battery storage systems. Graphs and tables will be displayed in the work analysis as a result of the simulation.

Key words : storage systems, microgrids, battery tanks, optimization methods

ŽIVOTOPIS

Ivan Čalić rođen je 17.05.1997. godine u Vinkovcima. Nakon završetka Osnovne škole Josipa Kozarca Vinkovci, upisuje Tehničku školu Ruđera Boškovića Vinkovci, smjer elektrotehničar. Nakon završetka srednje škole, 2016. godine, odlučuje se upisati preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Nakon završetka preddiplomskog studija elektrotehnike, 2020. godine, upisuje diplomski studij elektrotehnike, izborni blok DEA - Elektroenergetski sustavi. Za vrijeme diplomskog studija, pohađao je stručnu praksu u HEP ODS - Elektroslavoniji Osijek te je bio član studentske volonterske organizacije IEEE kao i njegovog ogranka za energetiku IEEE Power and Energy Society Osijek. Član je Tenis kluba Vinkovci dvadeset godina.