Modeliranje i simulacija baterijskih spremišta električne energije u distributivnim mrežama u OpenDSS programu

Kereta, Matija

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:537023

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA
Preddiplomski studij

MODELIRANJE I SIMULACIJA BATERIJSKIH SPREMIŠTA ELEKTRIČNE ENERGIJE U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA U OPENDSS PROGRAMU

Završni rad

Matija Kereta

Osijek, 2017.

SADRŽAJ

1 Uvod 1

1.1 Zadatak završnog rada 1

2 Baterijska spremišta energije 2

2.1 Olovno-kiselinske baterije 2

2.2 Nikal-kadmij baterije 3

2.3 Natrij-sumpor baterije 3

2.4 Zebra baterije 4

2.5 Litij-ionske baterije 4

3 OpenDSS program 5

4 Simulacije u OpenDSS 10

4.1 Utjecaj lokacije spremišta na stanje u mreži 11

4.1.1 Baterijska spremišta energije u čvorovima 11 i 13 12

4.1.2 Baterijska spremišta energije u čvorovima 12 i 14 13

4.1.3 Baterijska spremišta energije u čvorovima 16 i 23 15

4.1.4 Baterijska spremišta energije u čvorovima 25 i 29 16

4.1.5 Baterijska spremišta energije u čvorovima 26 i 33 17

4.2 Utjecaj snage baterijskog spremišta energije na stanje u mreži 19

4.2.1 Utjecaj snage baterijskih spremišta energije u čvorovima 11 i 13 19

4.2.1.1 Baterijska spremišta energije snage 45,43 kW i 90,86 kW 19

4.2.1.2 Baterijska spremišta energije snage 454,3 kW i 908,6 kW 21

4.2.1.3 Baterijska spremišta energije snage 681,45 kW i 1362,9 kW 22

4.2.1.4 Baterijska spremišta energije snage 908,6 kW i 1817,2 kW 23

4.2.2 Utjecaj snage baterijskih spremišta energije u čvorovima 26 i 33 25

4.2.2.1 Baterijska spremišta energije snage 45,43 kW i 90,86 kW 25

4.2.2.2 Baterijska spremišta energije snage 454,3 kW i 908,6 kW 26

4.2.2.3 Baterijska spremišta energije snage 681,45 kW i 1362,9 kW 28

4.2.2.4 Baterijska spremišta energije snage 908,6 kW i 1817,2 29

5 Zaključak 32

Literatura 33

Prilog 34

Sažetak 35

Summary 36

Životopis 37

1 Uvod

Baterijska spremišta električne energije zadnjih nekoliko godina postaju sve aktualnija s povećanjem udjela distribuirane proizvodnje (uglavnom obnovljivih izvora) u distributivnim mrežama. Zbog napredaka u tehnologijama baterijskih spremišta energije njihova primjena postaje sve šira i pristupačnija, kako u velikim distributivnim mrežama tako u manjim, nepristupačnijim potrošačkim centrima. Napreci su rezultirali stabilnijim, učinkovitijim, fleksibilnijim i pouzdanijim baterijskim spremištima energije kojima je znatno povećan kapacitet za pohranu energije.

Potaknuti tim poboljšanjima u izvođenju baterijskih spremišta električne energije, odlučeno je da se analizira njihov utjecaj na distributivnu mrežu. Pomoću programskih paketa OpenDSS i DSSim simulirali smo distributivnu mrežu za koju smatramo da je prikladna za modeliranje takvih spremišta energije.

Za prvi zadatak je snaga spremišta fiksna, ali se lokacije tih spremišta mjenjaju da se vidi u kojoj su lokaciji gubici najmanji. Uz to će se prikazati naponski profil mreže preko kojeg se vide najniži i najviši naponi u mreži u odnosu na referentni napon.

Drugi zadatak je podjeljen na dva djela. Kad su izračunati gubici u prvom zadatku, dobiju se dvije lokacije čvorova u kojima su gubici najmanji u svakom operativnom stanju posebno. Za te odabrane lokacije se podešavaju snage oba baterijska spremišta energije. Kao i u prvom zadatku bit će prikazani naponski profili i gubici mreže da se vidi utjecaj snage baterijskog spremišta energije na stanje u mreži.

1.1 Zadatak završnog rada

U završnom je radu potrebno proučiti iz literature spremišta električne energije (izvedbe, namjenu...) u distributivnim mrežama s posebnim osvrtom na električne baterije (akumulatore). Opisati ukratko izvedbe baterijskih spremišta električne energije. Korištenjem uputa za OpenDSS program opisati način modeliranja baterija kao spremišta el.energije u OpenDSS programu. Na primjeru distributivne mreže za podatke iz literature obaviti primjere simulacije primjene spremišta el.energije u distributivnoj mreži.

2 Baterijska spremišta energije

Punjive baterije su najstariji način skladištenja električnije energije. U njima se elektricitet pohranjuje u obliku kemijske energije. Baterija se sastoji od jedne ili više elektrokemijske ćelije i svaka ćelija se sastoji od tekućine, smjese ili cjelokupnog elektrolita zajedno s pozitivnom elektrodom (anoda) i negativnom elektrodom (katoda). Za vrijeme pražnjenja se dogode elektrokemijske reakcije kod dvije elektrode, što prouzrokuje tok elektrona kroz vanjski strujni krug. Reakcije se mogu obrnuti i dozvoliti da se baterija puni primjenom vanjskog napona preko elektroda.

Baterijska spremništa energija su na mnogo načina idealna da budu spremišta električne energije. Mogu reagirati jako brzo na promjene opterećenja i prihvatiti energiju od treće strane, time poboljšavajući stabilnost sustava. Uz to obično imaju jako niske gubitke u pripravnosti i mogu imati jako visoku energetsku učinkovitost, od 60 do 90%. Međutim najveći problem baterijskih spremišta je taj što sadržavaju otrovne materijale, što znači da je potrebna kontrola pri odlaganju otpada.

U energetskim sustavima se koriste deep cycle baterije s energetskim kapacitetom u rasponu od 17 do 40 MWh i energetskom učinkovitosti od otprilike 70-80%. Od mnogih baterijskih tehnologija, neke se čine pogodnijima za korištenje u energetskim sustavima. Te tehnologije su: olovno-kiselinske baterije, nikal-kadmij baterije, natrij-sumpor baterije, ZEBRA baterije i litij-ionske baterije.

2.1 Olovno-kiselinske baterije

Olovno-kiselinske baterije su izumljene 1859. godine. One su najstariji i najčešće korišteni punjivi elektrokemijski uređaji. Sastoje se od elektroda metala olova (u uzbudnom stanju) i olovnog oksida u elektrolitu od otprilike 37% sumporne kiseline. U stanju pražnjena se obje elektrode pretvore u olovni sulfat i elektroliti izgube svoju otopljenu sumpornu kiselinu i postanu voda.

Kemijske reakcije:

za anodu:

$$Pb + SO_4^{2-} \leftrightarrow PbSO_4 + 2e^- ;$$

za katodu je:

$$PbO_2 + SO_4^{2-} + 4H^+ + 2e^- \leftrightarrow PbSO_4 + 2H_2O$$

Cijena olovno-kiselinskih baterija je niska, od 300 do 600 dolara po kWh i jako su pouzdani i učinkoviti (70-85%) . Naime, njihovo upravljanje energijom je vrlo ograničeno zbog svog kratkog ciklusa života (500-1000 ciklusa) i niske gustoće energije (30-50 Wh/kg) zbog visoke gustoće olova. Uz to zahtjevaju sustavom toplinskog upravljanja zbog lošeg učinka pri niskim temperaturama. Usprkos tome, olovno-kiselinske baterije su vidjele primjene po cijelom svijetu. Najveća je u Sjedinjenim Američkim Državama, točnije Kaliforniji, i ima nazivnu snagu od 10 MW tijekom 4 sata. Postoji više vrsta olovno-kiselinskih baterija, ali najkorištenije vrste su VRLA baterije (tip baterije koji ima ventil za regulaciju tlaka) i potopljene baterije.

2.2 Nikal-kadmij baterije

Nikal-kadmij baterije (NiCd) su na vrhu s olovno-kiselinskim po popularnosti i zrelosti (izumljene u 19. stoljeću). Sastoje se od ploče s pozitivnom elektrodom nikal hidroksida, negativne elektrodne ploče s kadmij hidroksidom, odvajača i alkalnog elektrolita. Obično imaju metalnu kutiju s brtvenom pločom opremljenu sa sigurnosnim ventilom koji se sam zatvara. Odvajač izolira pozitivne i negativne elektrodne ploče, koje su zamotane kao zavojnice u kutiji. NiCd baterija imaju visoku gustoću energije (50-75 Wh/kg), dobru pouzdanost i niske troškove održavanja, efikasnost sličnu olovno-kiselinskim baterijama, ali relativno nizak život ciklusa (2000-2500). Zbog ovih prednosti nad olovno-kiselinskih baterijama više se koriste za paljenje generatora, sigurnosnih svjetla i električnih aparata. Najveća mana NiCd baterija je njihova visoka cijena (~$1000/kWh) zbog skupog proizvodnog procesa. Uz to pate od problema „memory effect“ što znači da se baterije mogu jedino potpuno napuniti nakon niza potpunog pražnjenja. Problem se može ublažiti ako se baterija pravilno upravlja. Zbog kadmija koji je toksičan teški metal stvaraju se dodatni problemi u vezi njegovog odlaganja.

2.3 Natrij-sumpor baterije

Natrij-sumpor baterije (NaS) se sastoje od tekućeg (rastopljenog) sumpora na pozitivnoj elektrodi i tekućeg (rastopljenog) natrija na negativnoj elektrodi gdje služe kao aktivni materijali, odvojeni čvrstim elektrolitom od beta aluminij-oksidne keramike. Baterije imaju život ciklusa od ~2500 ciklusa i tipično imaju energiju gustoće 150-240 W/kg. Zbog visoko ocijenjenih mogućnosti napajanja, NaS baterije se ekonomično koristiti za izravnavanje opterećenja. Najslabija strana NaS baterija je njihova potreba za izvorom topline da se održi

rad na visokoj temperaturi (300~350 °C), što djelomično smanjuje učinkovitost baterije zato jer uzima vlastitu uskladištenu energiju. Očekuje se pad cijena (~$2000/kW) zbog širenja proizvodnog kapaciteta.

2.4 Zebra baterije

ZEBRA ili natrij-nikal-klorid baterije koriste nikal-klorid kao svoju pozitivnu elektrodu i imaju kontrolu funkcionirati u širokom temperaturnom opsegu (-40~+70 °C) bez hlađenja. U usporedbi s NaS baterijama, ZEBRA baterija mogu izdržati ograničeno preopterećenje i pražnjenje, a i imaju bolje sigurnosne karakteristike i veći napon ćelije (2.58 V). Nedostaci u usporedbi s NaS baterijama je njihova niska energetska gustoća (~120 Wh/kg) i gustoća snage (~150 W/kg), iako i dalje pokazuju znatne napretke preko tehnologije olovno-kiselinskih baterija. Veliki problem u vezi ovih baterija je što ih pravi samo jedna tvrtka, ali uspijevaju razvijat ZEBRA baterije s velikom snagom za električna vozila, spremišta s velikim kapacitet za skladištenje obnovljivih izvora energije i baterije za izravnavanje opterećenja pri industrijskog primjeni.

2.5 Litij-ionske baterije

Litij-ionska baterija sadrži katodu od metalnog oksida pomješanog s litijem i anodu od grafitnog ugljika. Zbog poboljšanog razvoja materijala od 1990. godine (prve komercijalne baterije te vrste), litij-ionske baterije su vidjele ogromno poboljšanje u energetskoj gustoći (sa 75 na 200 Wh/kg) i životu ciklusa (skoro 10,000 ciklusa). Vjerojatno najbitnija karakteristika ovih baterija je njihova nevjerojatna učinkovitost koaj je skoro 100%.

Iako su Li-ion baterije u preko 50% prijenosnih uređaja i dalje ima izazova za izgradnju velikih Li-ion baterija. Najveći problem je velika cijena od $600/kWh zbog posebne ambalaže i unutrašnjih sigurnosnih krugova za preopterećenje.

3 OpenDSS program

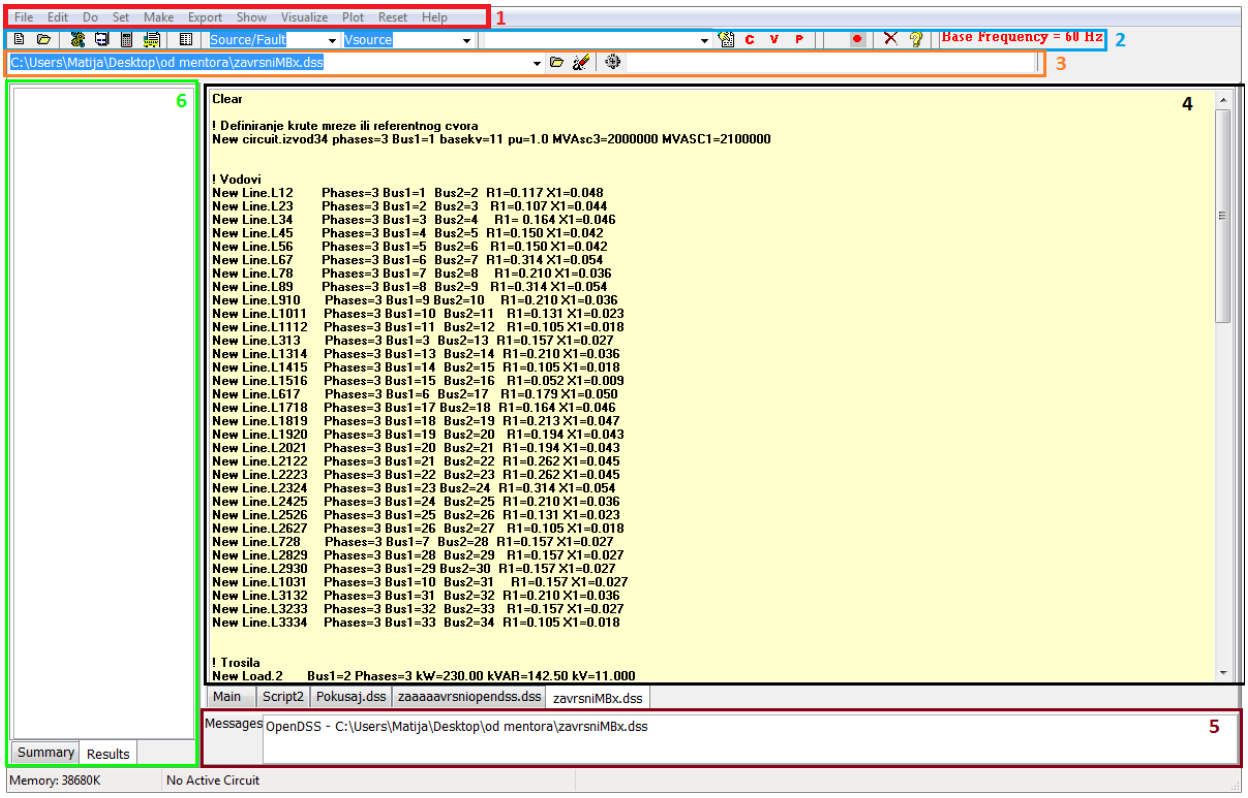
Računalni program u kojem će se pokazati postupak modeliranja baterijskih spremišta energije u distributivnim mrežama je OpenDSS (Open Distribution System Simulator). To je besplatan program koji je razvio Electric Power Research Institute, Inc. i služi kao alat za simulaciju električnih mogućnosti u električnim distribucijskim sustavima. Pošto je tip programa open-source (otvorenog koda), možemo mijenjati i prepravljati njegov sadržaj. Uz to je program napravljen da bude samostalan izvršan program i da se može koristiti s drugim programima kao C++ i MATLAB. Iako se može koristiti s drugim programskim paketima, skoro uvijek je OpenDSS sam po sebi dovoljan za izvršavanje posla.

Originalno je program napravljen za razne analize, planiranja i proračune u distribuiranoj proizvodnji, ali se može koristi i za novije tehnologije kao pametne mreže.

OpenDSS program se često koristi za:

- Planiranje i analizu distribucije
- Modeliranje spremišta
- Simulaciju zaštitnih sustava
- Simulaciju vjetroturbina
- Procjenu stanja distribucije
- Struje izazvane geomagnetsim utjecajima
- Analizu harmonijskih izobličenja
- Impulsna opterećenja
- Analizu neobičnih konfiguracija transformatora
- Simulacije godišnjeg opterećenja

Uz OpenDSS smo koristili još jedan simulator, DSSim, koji ima grafičko sučelje u kojem možemo vidjeti sve elemente i kako su međusobno povezani. DSSim je korišten da se prikaže kako mreža izgleda, ali po našoj procjeni je OpenDSS lakši za koristit. U ovom slučaju OpenDSS ima prednost zbog lakšeg pregleda elemenata, njihovih parametara i potrebno je manje vremena da se upišu parametri, iako je DSSim estetski ljepši i u neku ruku lakši.



Slika 3.1.: Korisničko sučelje programa OpenDSS

Kada pokrenemo OpenDSS program otvori nam se korisničko sučelje kao na slici 4.1. U crvenom pravokutniku pod brojem 1 se nalazi glavni izbornik s naredbama kao File, Edit, Do, Show, Help koje služe za otvaranje, spremanje, uređivanje i prikazivanje elemenata i skripte. Pod brojem 2 je alatna traka u kojoj su naredbe New Script Window, Solve i Do Command, koje služe za izvršavanja skripti i čitanje rezultata. Komande koje se nalaze pod brojem 3 nećemo koristiti često pošto služi za brzo učitavanje drugih skripti i prikazivanje zadnje greške. Iznad prostora pod brojem 5 su sve skripte koje smo pokrenuli pod originalnim imenima da možemo isprobavati više simulacija u isto vrijeme. U prostore 5 i 6 ne možemo unositi tekst zato jer služe za poruke, rezultate i sažetke od samog programa. Nama najbitniji dio je dio pod brojem 4, tekstualno sučelje, u kojem pomoću linija koda unosimo elemente sustava i postavljamo njihove parametre.

Svaka skripta se započinje s definiranjem referentnog čvora ili izvora:

New circuit.izvod34 phases=3 bus1=1 basekv=11 pu=1 MVAsc3=2000000 MVAsc1=2100000

New circuit je naredba za definiranje krute mreže nakon koje slijedi (bez razmaka) točka i ime koje želimo dati toj mreži.

Nakon definiranja elementa i njegovog imena slijedi postavljanje vrijednosti parametara tog elementa.

phases=3 Bus1=1 basekv=11 pu=1 MVAsc3=2000000 MVAsc1=2100000

Obavezno je staviti barem jedan razmak između svake naredbe i parametra. Stavljanjem više razmaka zbog estetike koda neće utjecati na kod.

Ne mora se definirati svaki mogući parametar da se može pokrenuti simulacija pošto većina parametara ima već zadane (default) vrijednosti koje se mogu promijeniti, ali neki parametri se moraju obavezno definirati ili skripta neće raditi. Naredba *phases* služi za postavljanje broja faza i s obzirom na to da želimo stvarnu trofaznu mrežu, stavit ćemo da ima tri faze. S basekv naredbom postavljamo nazivni napon referentnog čvora i treba paziti na vrijednosti koje se unose zato jer je parametar u kilovoltima, a ne voltima. Pomoću *Bus1* određujemo na kojoj sabirnici se nalazi element. Elementi kao vodovi moraju imati definiran početak i kraj, pa nakon naredbe *bus1* moramo odrediti *bus2*.

Primjer definiranja prvog voda:

New Line.L12 Phases=3 Bus1=1 Bus2=2 R1=0.117 X1=0.048

Kao i kod referentnog čvora definirali smo broj faza i prvu sabirnicu, ali pošto je vod moramo postaviti kraj voda koji će biti početak drugog voda i čvor u koji stavljamo teret. Serijske impedancije dionica smo definirali s naredbama *R1* i *X1*. *R1* naredba postavlja vrijednost jediničnog djelatnog otpora, a *X1* jedinične induktivne reaktancije. Nije potrebno pisati mjerne jedinice zato jer program po naredbi prepoznaje koja je mjerna jedinica.

Komentare stvaramo stavljanjem uskličnika na početak linije:

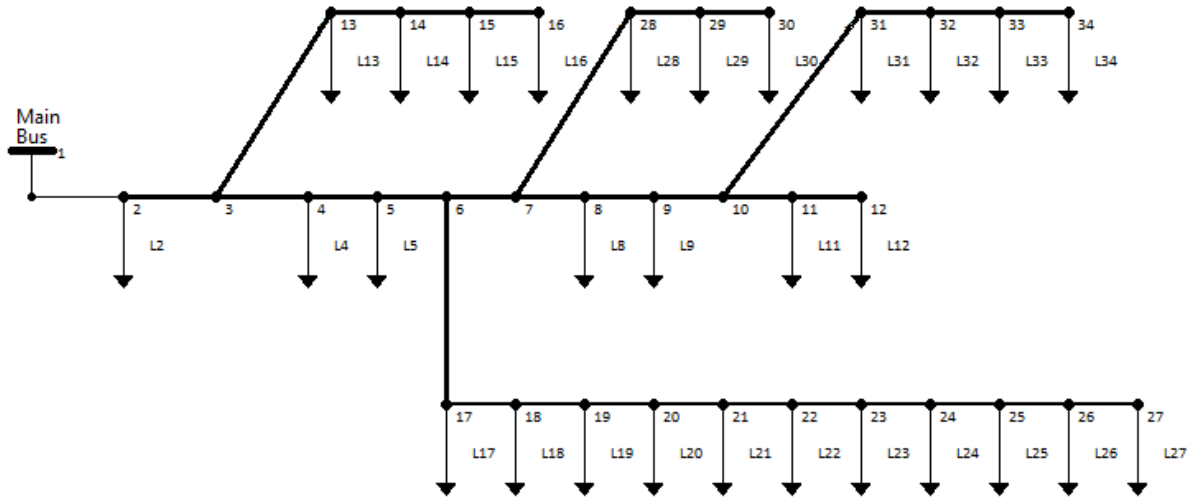
```
! Vodovi
New Line.L12      Phases=3 Bus1=1  Bus2=2  R1=0.117 X1=0.048
New Line.L23      Phases=3 Bus1=2  Bus2=3   R1=0.107 X1=0.044
```

Oni ne utječu na skriptu i njezine rezultate, ali čine ju lakšom za čitat. Pomoću komentara i malo znanja u OpenDSS programu, svatko se može snaći u programu. Odlični su za razdvajanje elemenata i pronalaženje problema.

New Load.2 Bus1=2 Phases=3 kW=230.00 kVAR=142.50 kV=11.000

Naredbom *New Load* priključujemo trošilo u željenu sabirnicu. Većina naredbi je uvijek ista kod definiranja elemenata, kao *bus1* i *phases*, ali pošto definiramo teret moramo postaviti snage i napon opterećenja. Za djelatnu snagu koristimo naredbu *kW*, za jalovu *kVAR* i za napon *kV*. Mjerna jedinica za djelatnu snagu je već u kilovatima, a ne vatima, tako da treba uvijek paziti sadrži li naredba malo slovo *k* u sebi.

Pomoću DSSim programa možemo vizualizirati osnovni oblik mreže s referentnim čvorom, vodovima i teretima.



Slika 3.2.: Osnovni oblik mreže u DSSim-u

Nakon vodova i tereta dolazi na red dodavanje baterijskih spremišta energije i distribuirane proizvodnje u specifičnim čvorovima tj. generatora. Komandna linija za generator je:

New Generator.DG1 Bus1=9 Phases=3 kv=11 kW=800 kvar=200 Model=1

Kod generatora komanda *kW* označuje snagu koja izlazi iz elementa, što je suprotno opterećenju. Faktor snage generatora se može odrediti s naredbom *pf* (eng. Power factor) ili na alternativni način gdje unaprijed odredimo jalovu snagu pomoću naredbe *kvar*. S *Model=1* određujemo da generator ubrizgava konstantnu djelatnu snagu na određenom faktoru snage.

Baterijska spremišta energije instaliramo u skriptu na sljedeći način:

New Storage.BSS1 Bus1=8 kWhrated=500 kWhstored=0.1 kWrated=454.3 state=discharging

Kapacitet spremišta energije postavljamo pomoću *kWhrated* i u našem slučaju sva spremišta će imati kapacitet od 500 kWh. Trenutnu količinu pohranjene energije zadajemo s naredbom *kWhstored*. Izlazna snaga spremišta je definirana s *kWrated*. Naredba *state* ima tri moguća stanja*: idling, charging* i *discharging*.

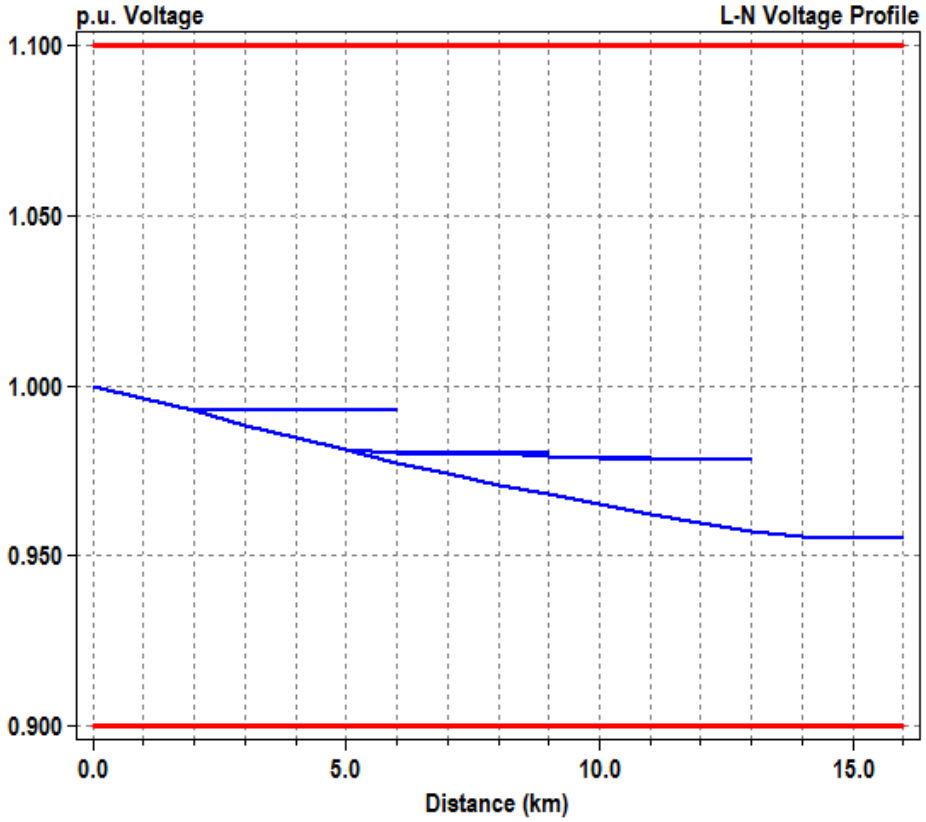
Kada je spremište u *charging* stanju tj. u stanju punjenja, ponaša se kao teret. Nastavlja se puniti sve dok ne dođe do maksimalnog kapaciteta spremišta, gdje pređe u *idling* stanje ili stanje praznog hoda. U *discharging* stanju, stanju pražnjenja, spremište se ponaša kao generator i nastavlja se prazniti dok ne dođe do pričuvnog stanja i spremište se prebaci u *idling* stanje.

Objekt *New Energymeter* je dodan na početak izvoda i mjeri veličine na prvoj sekciji izvoda. On nam je, uz komandu *Plot Profile* potreban za iscrtavanje naponskog profila preko kojeg vidimo vrijednosti napona u mreži.

4 Simulacije u OpenDSS

Za polazni slučaj imamo simulaciju u kojoj su dodani izvori distribuirane proizvodnje, no baterijska spremišta energije nisu dodana da možemo vidjeti kako se mreža ponaša sama po sebi i da imamo referencu s kojom možemo usporediti ostale simulacije.

Na slici 4.1. vidimo naponski profil mreže kojoj nisu dodana baterijska spremišta. Vrijednosti napona nisu prikazane u stvarnim vrijednostima (npr. 11 kV) nego u usporedbi s naponom iz referentnog čvora. Ako bi recimo negdje u mreži vrijednost napona bila preko 1,00 p.u. to bi značilo da je napon u toj liniji viši od napona izvora. Crvene linije na 1,100 i 0,900 p.u. su maksimalna i minimalna vrijednost napona koju napon bilo gdje u mreži smije postići.



Slika 4.1.: Naponski profil mreže bez baterijskih spremišta

4.1 Utjecaj lokacije spremišta na stanje u mreži

Ukupno opterećenje mreže možemo vidjeti pomoću komande *show losses*. Nakon što se opet pokrene simulacija otvori se notepad dokument u kojem piše koliko je ukupno opterećenje mreže i koliki su ukupni gubici. Iz tog izvješća se može pročitati da je ukupno opterećenje mreže 4543 kW.

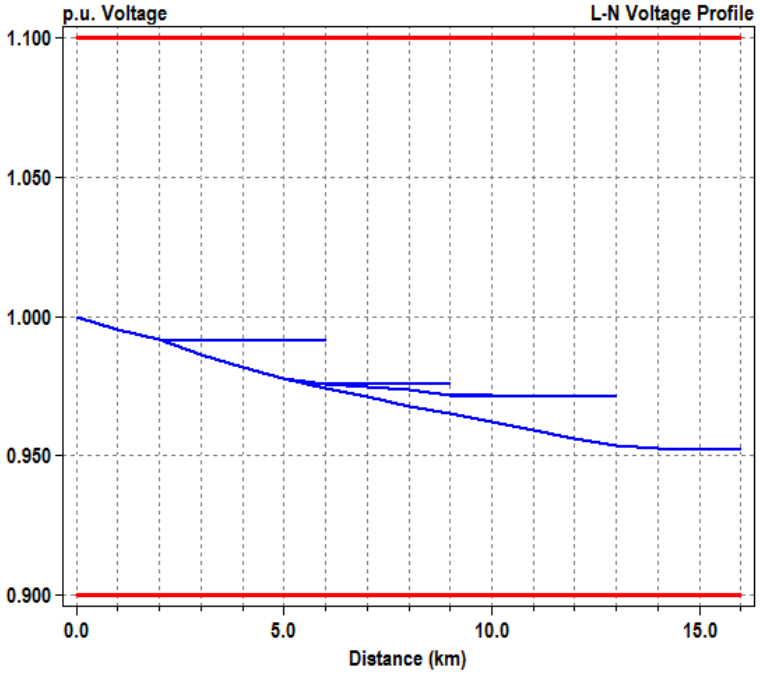
Sad kad je poznata vrijednost ukupnog opterećenja, mogu se modelirati spremišta. Oba spremišta imaju kapacitet od 500 kWh, ali su im snage različite. Prvo baterijsko spremište će imati snagu jednaku 10% od vrijednosti ukupnog opterećenja, što je 454.3 kW, dok će drugo spremište imati snagu od 227.15 kW ili 5% od ukupnog opterećenja.

Navedene vrijednosti spremišta se neće mjenjati, ali će se mjenjati njihove lokacije. U prvom slučaju će spremišta biti instalirana u čvorovima 11 i 13, u drugom 12 i 14, trećem 16 i 23, četvrtom 25 i 29 i u zadnjem, petom, 26 i 33.

Za svaku od pet lokacija će se pokrenuti simulacija za drugačije operativno stanje. Prvo stanje je stanje punjenja (*eng. charge*), a drugo je naravno pražnjenja. Dok je baterijsko spremište u stanju punjenja ono se ponaša kao trošilo što znači da se u stanju pražnjenja ponaša kao izvor.

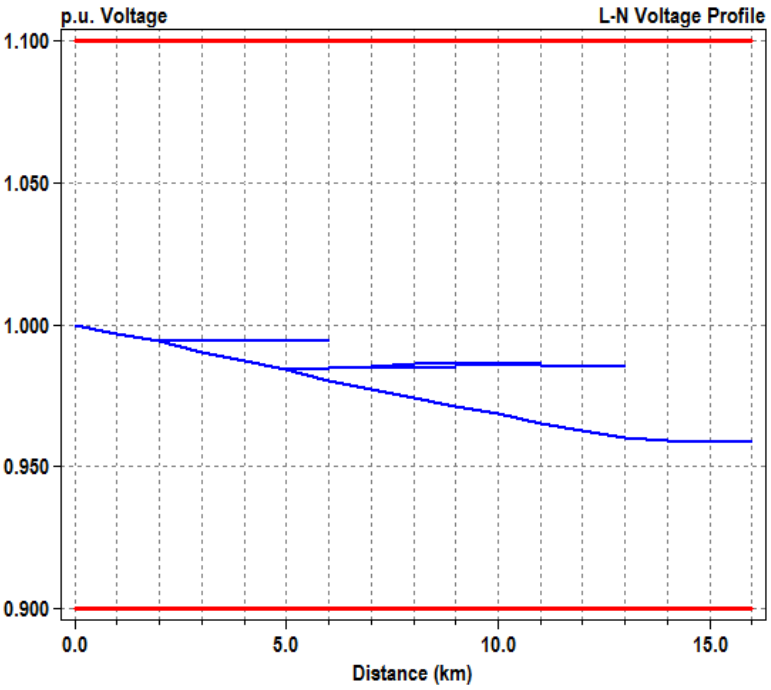
Prva simulacija je simulacija gdje su baterijska spremišta energije instalirana u čvorovima 11 i 13. Postavljeno je stanje punjenja.

4.1.1 Baterijska spremišta energije u čvorovima 11 i 13



Slika 4.2.: Naponski profil za stanje punjenja čvorovima 11 i 13

U usporedbi s naponskim profilom na slici 4.1. se vidi da je napon u mreži pao, što je očekivano zato jer se spremišta ponašaju kao trošila.

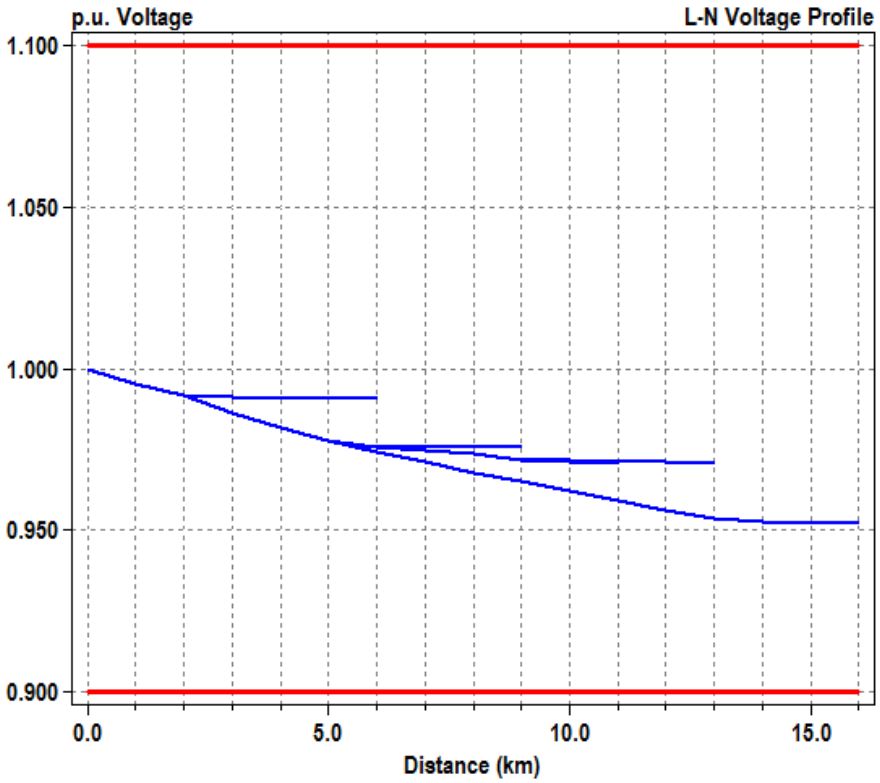


Slika 4.3.: Naponski profil za stanje pražnjenja u čvorovima 11 i 13

Na slici 4.3. se vidi očita razlika, gdje se spremišta ponašaju kao izvor zato jer uskadištenu energiju puštaju u mrežu. Linije voda koje su imale najniži napon u mreži pri punjenju imaju viši napon kad su spremišta u stanju pražnjenja.

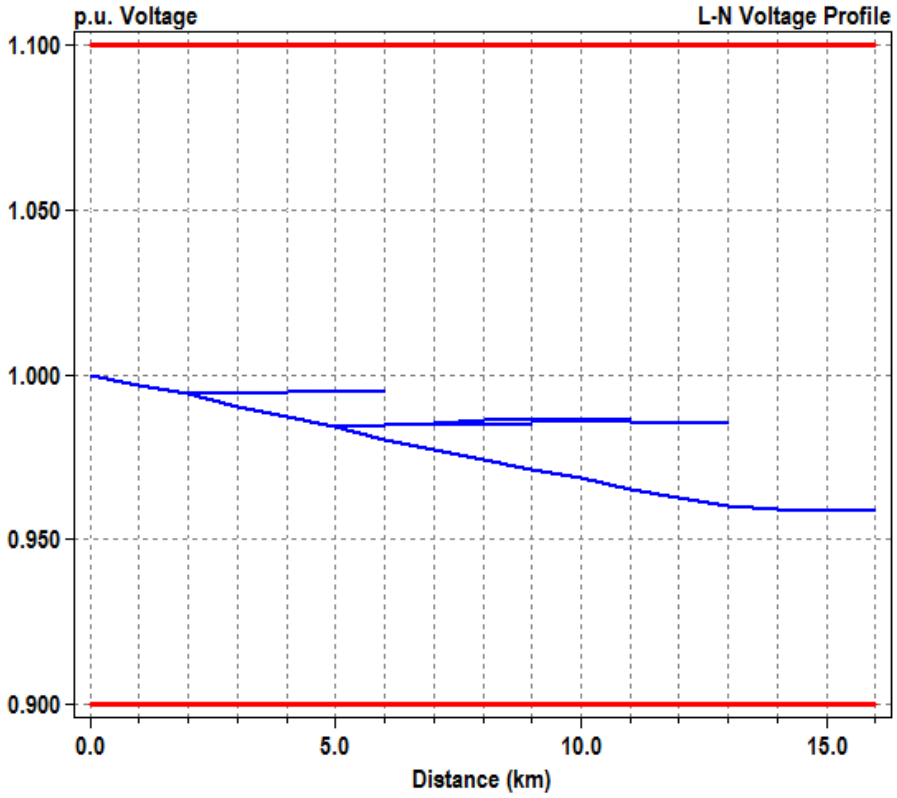
Ne može se odrediti kakav utjecaj lokacija energetskog spremišta ima na mrežu ako ne možemo usporediti rezultate s rezultatima drugih lokacija.

4.1.2 Baterijska spremišta energije u čvorovima 12 i 14



Slika 4.4.: Naponski profil za stanje punjenja u čvorovima 12 i 14

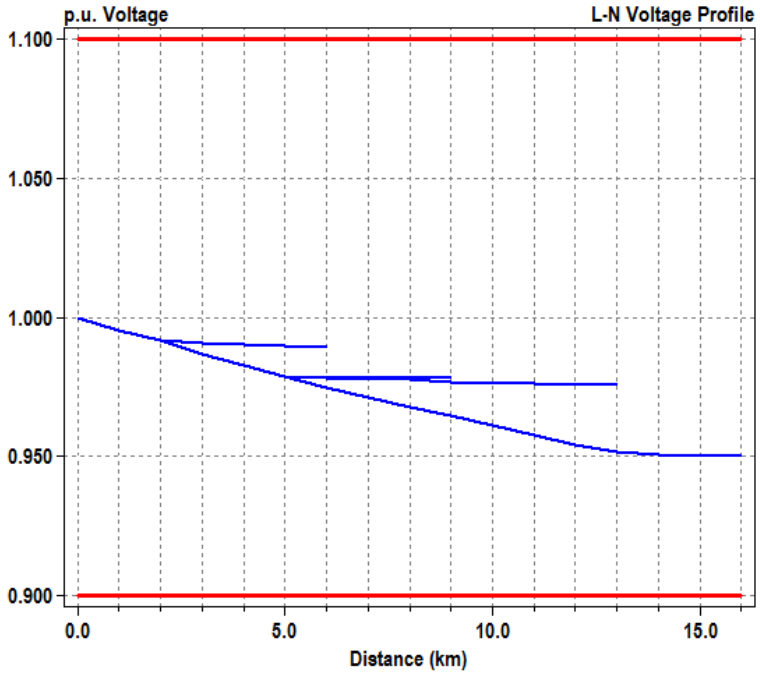
Jednostavan način za usporedbu naponskih profila je uspoređivanje najniže vrijednosti koju dosegne plava linija. Pošto linija predstavlja vodove po jedinici napona može se za dosta slučajeva reći da jedan slučaj ima više gubitke zato jer je najniži napon u mreži niži od najnižeg napona u mreži drugog slučaja. Na slikama 4.2. i 4.4. su najniži naponi identični, oko 0,952 p.u., i ako usporedimo gubitke koji su za simulaciju u čvorovima 11 i 13 138,2 kW s gubicima od 136,6 kW iz simulacije za čvorove 12 i 14, vidimo da su lokacije praktički iste.



Slika 4.5.: Naponski profil za stanje pražnjenja u čvorovima 12 i 14

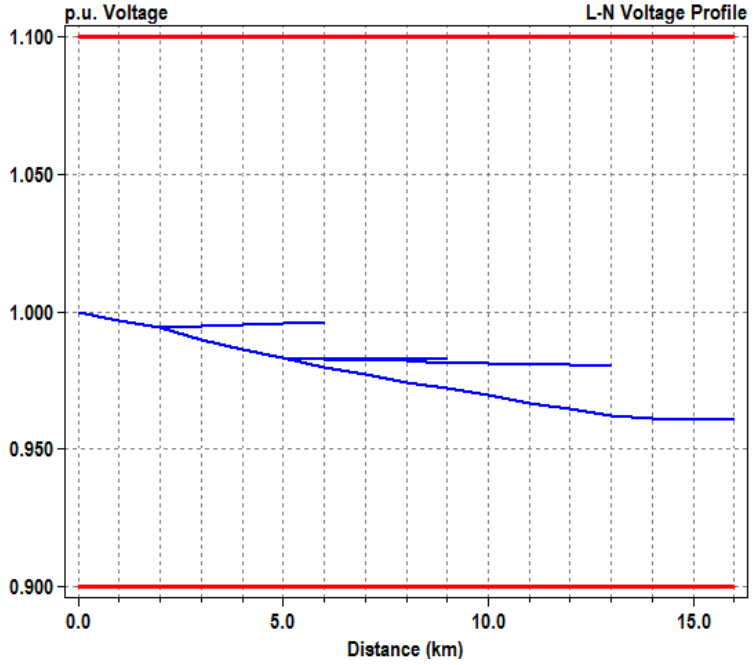
Gubici u čvorovima 12 i 14 u slučaju kad su baterijska spremišta u stanju praženja su 100 kW, što znači da su veća za 0,2 kW u usporedbi s gubicima u čvorovima 11 i 13 kad se prazne spremišta. Kao i u slučaju kad se spremišta pune, razlike su zanemarive. Naponski profili na slikama 4.3. i 4.5. su identični.

4.1.3 Baterijska spremišta energije u čvorovima 16 i 23



Slika 4.6.: Naponski profil za stanje punjenja u čvorovima 16 i 23

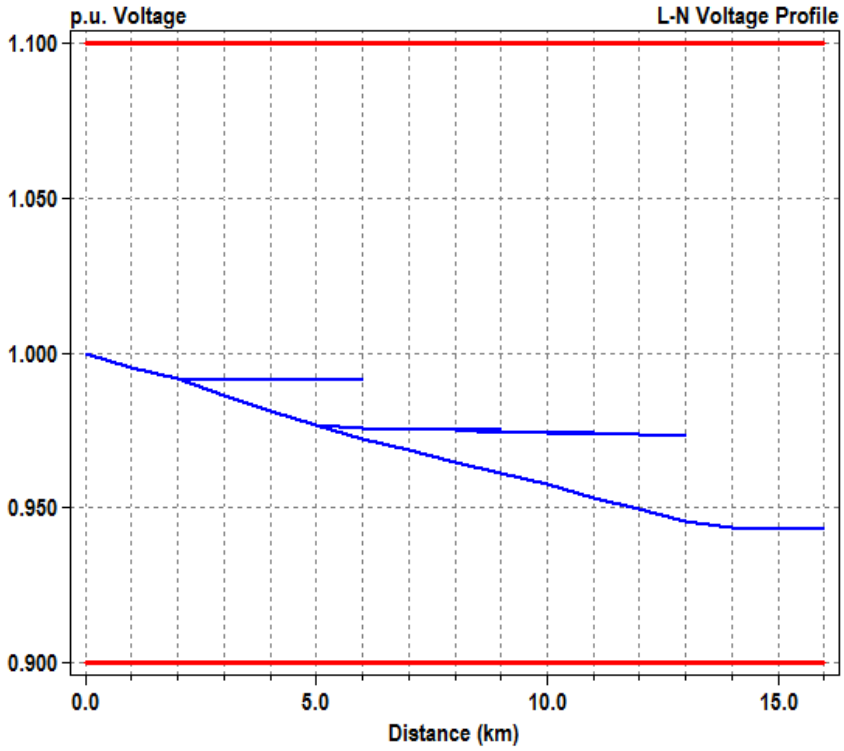
Velika razlika se i dalje ne vidi na slici 4.6. gdje je najniži napon u mreži ispod linije 0,950 p.u., taman na 0,9499 p.u.. U stanju punjenja gubici su za 2 kW veći od gubitaka u čvorovima 12 i 14, ali veće se razlike vide kod pražnjenja.



Slika 4.7.: Naponski profil za stanje pražnjenja u čvorovima 16 i 23

Kako vrijednost najnižeg napona u mreži raste, tako se smanjuju gubici u mreži. Najniži napon je prešao 0,9605 p.u., a gubici su manji za 5 kW od gubitaka u stanju pražnjenja u čvorovima 12 i 14.

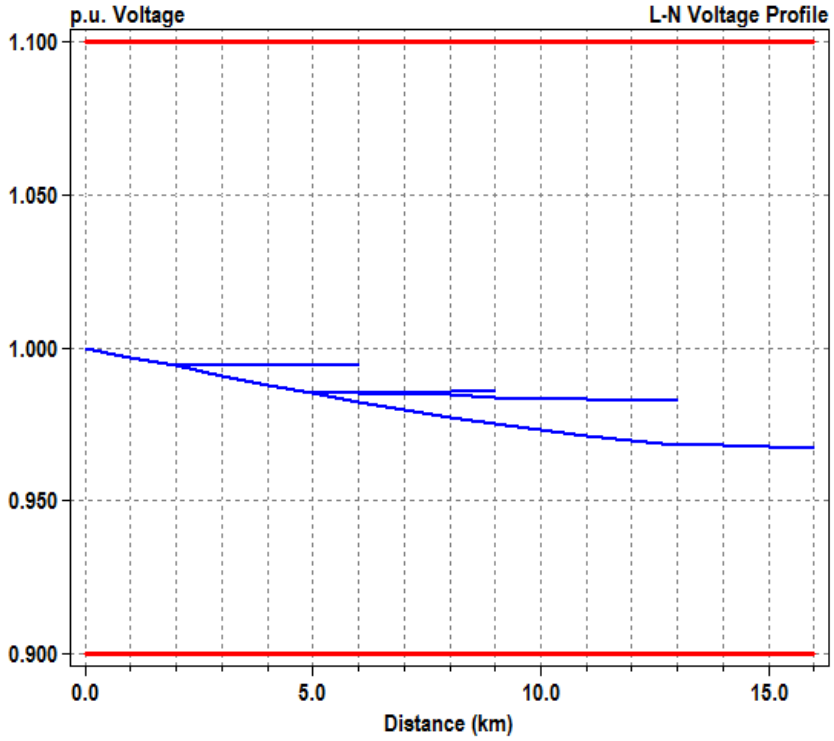
4.1.4 Baterijska spremišta energije u čvorovima 25 i 29



Slika 4.8.: Naponski profil za stanje punjenja u čvorovima 25 i 29

Slika 4.8. pokazuje da je najniži napon u mreži na najnižoj vrijednosti do sada, 0,9431 p.u.. To je rezultiralo gubicima od 166,1 kW, preko 25 kW više od prethodnog slučaja u stanju punjenja.

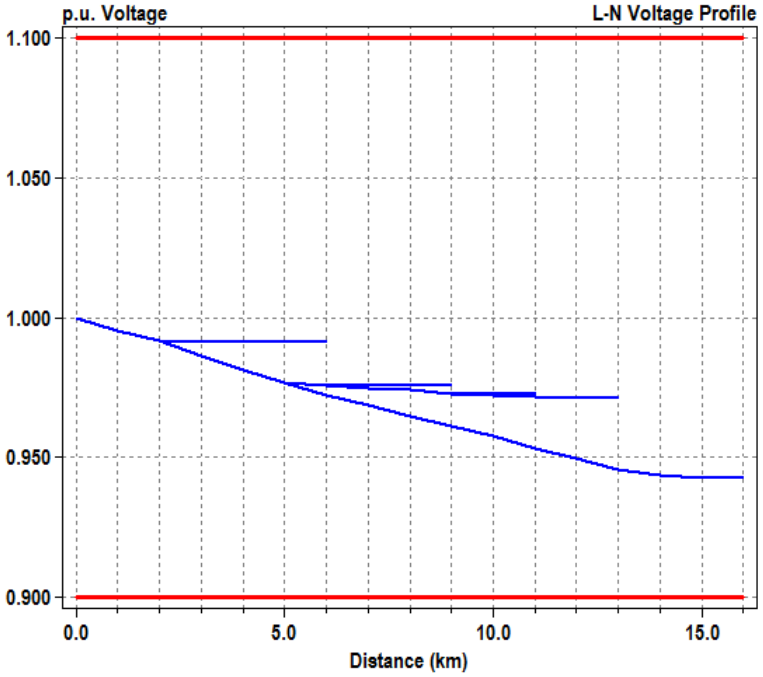
Najniži napon u mreži nije nužno proporcionalan gubicima, ali nam može dati uvid koliki bi gubici mogli biti u usporedbi s prethodnim simulacijama.



Slika 4.9.: Naponski profil za stanje pražnjenja u čvorovima 25 i 29

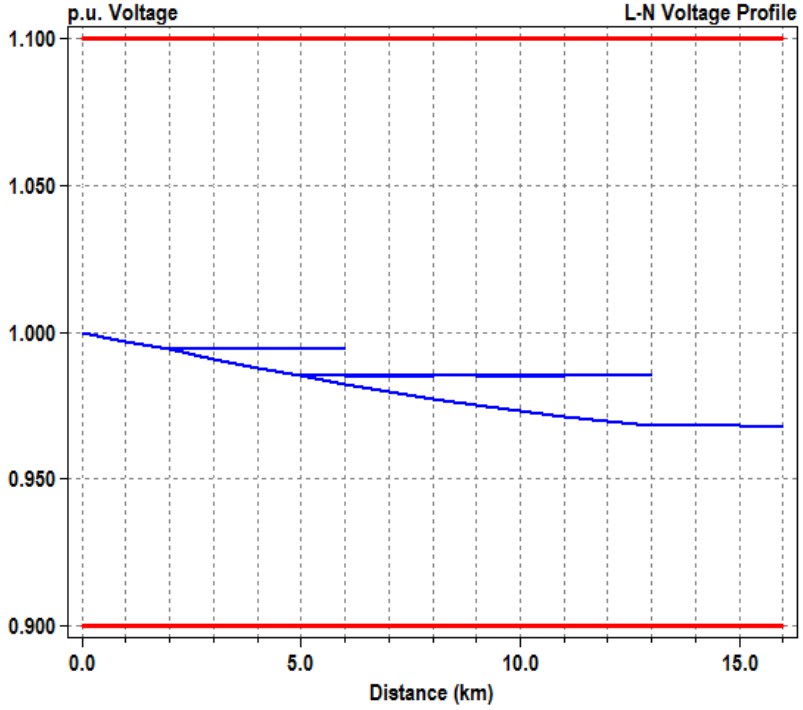
U stanju pražnjenja jasno se vidi da spremišta energije imaju pozitivan učinak na mrežu ako su instalirana u daljim čvorovima. Gubici su na niskih 77,8 kW i najniži napon je 0,9673 p.u..

4.1.5 Baterijska spremišta energije u čvorovima 26 i 33



Slika 4.10.: Naponski profil za stanje punjenja u čvorovima 26 i 33

Najniži napon u stanju punjenja u čvorovima 26 i 33 je očekivano najniži s gubicima od 168 kW. Iako su gubici veći za 30 kW od gubitaka u stanju punjenja u čvorovima 11 i 13, mreža je i dalje stabilna i vrijednosti su u granicama.



Slika 4.11.: Naponski profil za stanje pražnjenja u čvorovima 26 i 33

Razlika između pražnjenja u ovom slučaju i u prethodnom pri stanju pražnjenja je iznimno mala. Gubici su manji za samo 0,5 kW i razlika između najnižih napona je na četvrtoj decimali.

Iz tablice 4.1. se može pretpostaviti korelacija između najnižih napona i gubitaka ili ukupnih gubitaka u punjenju i pražnjenju, ali nije napravljen dovoljan broj simulacija da se može izravno povezati.

Tablica 4.1.: Tablični prikaz napona i gubitaka u svim čvorovima u oba stanja rada

Čvorovi	**Punjenje**			**Pražnjenje**		
	Najviši napon [p.u.]	Najniži napon [p.u.]	Ukupni gubici [kW]	Najviši napon [p.u.]	Najniži napon [p.u.]	Ukupni gubici [kW]
11 i 13	1	0,952	138,2	1	0,9584	99,8
12 i 14	1	0,952	138,6	1	0,9584	100
16 i 23	1	0,9499	140,5	1	0,9605	95,1
25 i 29	1	0,9431	166,1	1	0,9673	77,8
26 i 33	1	0,9426	168,0	1	0,9679	77,3

4.2 Utjecaj snage baterijskog spremišta energije na stanje u mreži

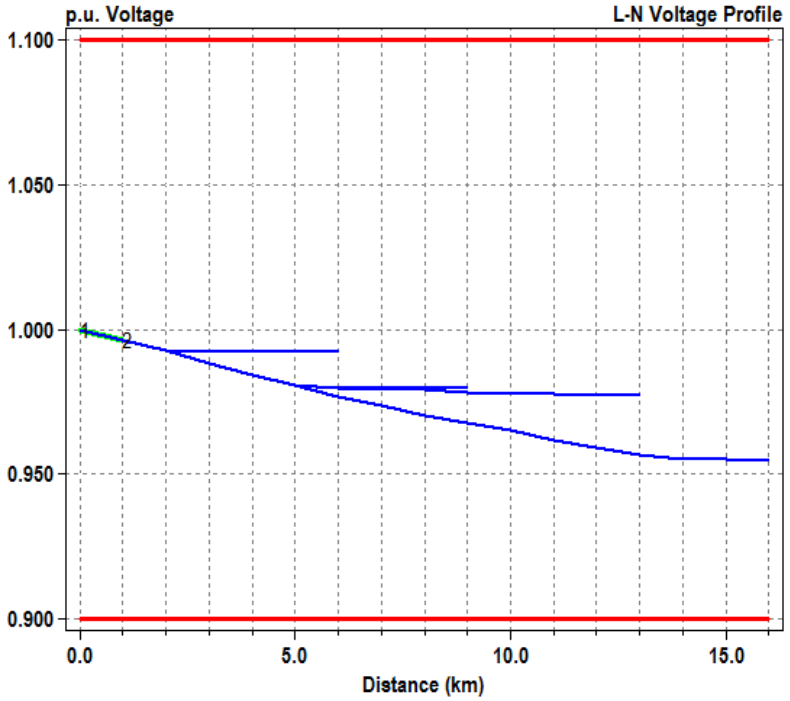
Najniži gubici u stanju punjenja baterijskih spremišta energije je bio u slučaju kad su spremišta instalirana u čvorovima 11 i 13, dok su najviši gubici u stanju punjenja bili u zadnjoj simulaciji, gdje su spremišta bila instalirana u čvorove 26 i 33. Zbog toga će se obaviti simulacije za te lokacije sa sljedećim snagama baterijskih spremišta energije: 1% i 2% ukupnog opterećenja, 10% i 20% ukupnog opterećenja, 15% i 30% ukupnog opterećenja, 20% i 40% ukupnog opterećenja. Simulacije će se obaviti za oba režima rada.

4.2.1 Utjecaj snage baterijskih spremišta energije u čvorovima 11 i 13

Baterijska spremišta energije će se fiksno postaviti u čvorove 11 i 13, mjenjat će im se operativno stanje, nakon čega će se podići snaga spremišta energije na navedene vrijednosti

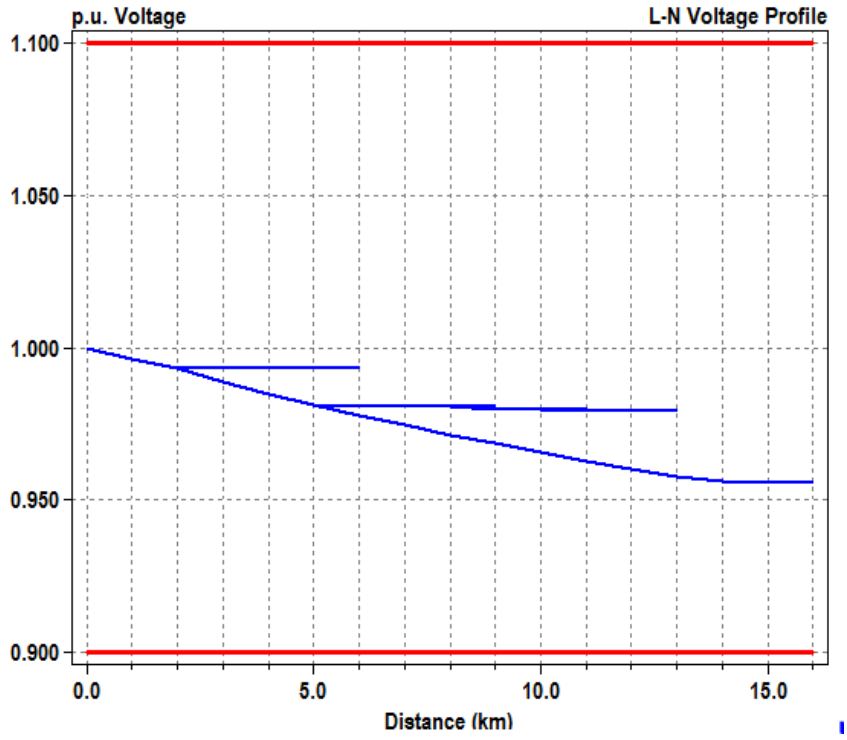
4.2.1.1 Baterijska spremišta energije snage 45,43 kW i 90,86 kW

Najniža kombinacija snaga obrađena simulacijama do sada. Na temelju prethodnih simulacija se mogu očekivati niski gubici u stanju punjenja i visoki gubici u stanju pražnjenja.



Slika 4.12.: Naponski profil za stanje punjenja pri snagama od 45,43 kW i 90,86 kW

Pri tako niskoj snazi spremišta energije mreža nije opterećena i to je rezultiralo gubicima od 117,7 kW.

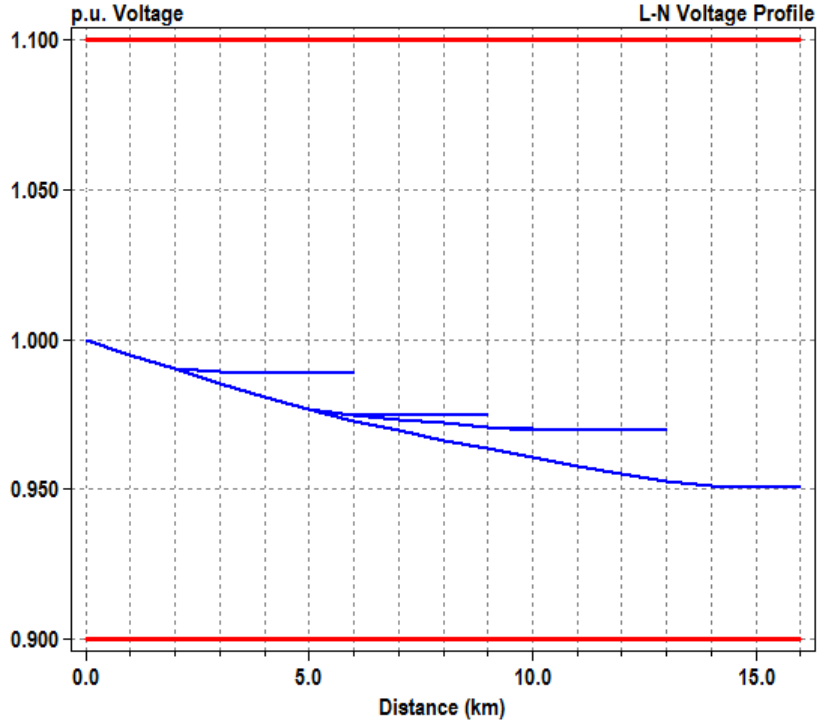


Slika 4.13.: Naponski profil za stanje pražnjenja pri snagama od 45,43 kW i 90,86 kW

Naponski profili na slikama 4.12. i 4.13. su iznimno slični. Zbog niske snage spremišta ne vidi se značajan utjecaj na mrežu. Gubici iznose 112,3 kW, najveći postignuti simulacijama.

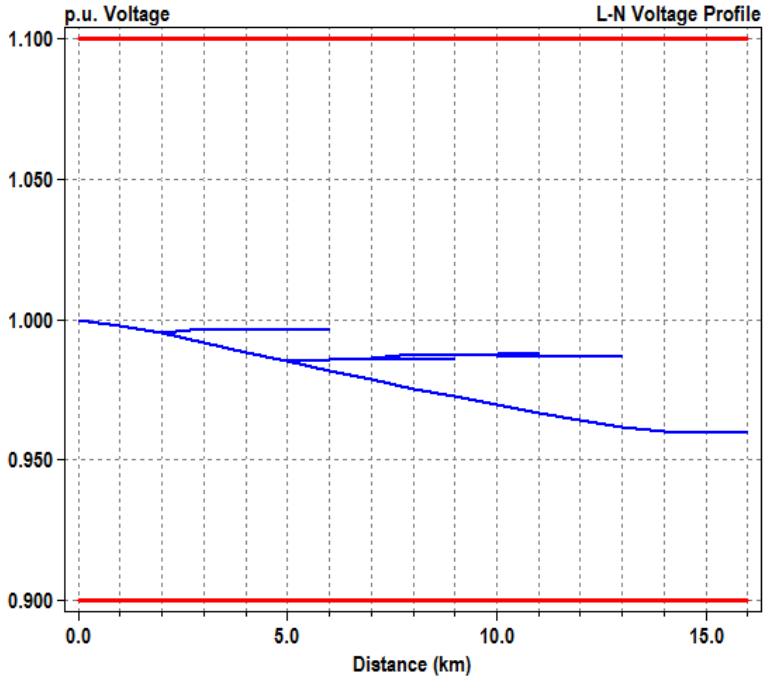
4.2.1.2 Baterijska spremišta energije snage 454,3 kW i 908,6 kW

Snaga baterijskih spremišta energija je dvostruko veća od snaga iz prethodnog zadatka i to je prvi uvid u stanje mreže pri višim snagama spremišta.



Slika 4.14.: Naponski profil za stanje punjenja pri snagama od 454,3 kW i 908,6 kW

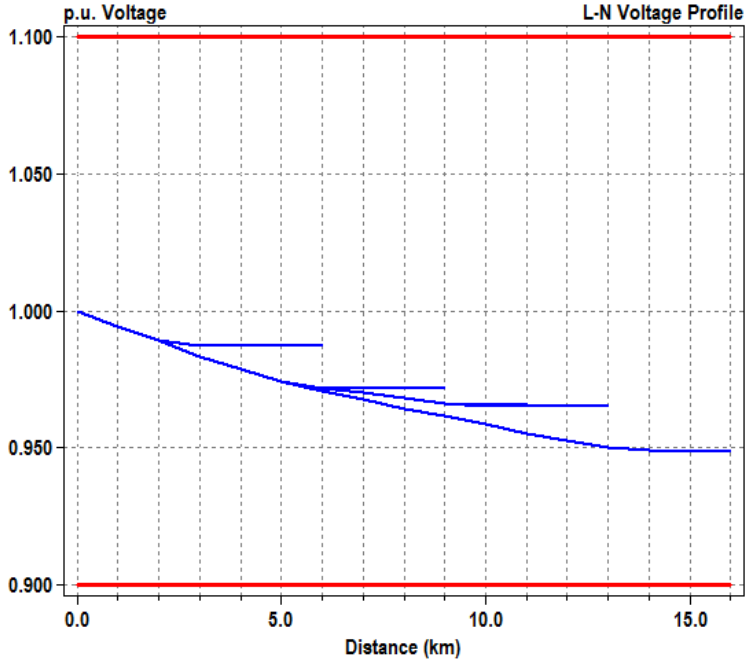
Naponski profil na slici 4.14. je veoma sličan profilima iz prethodnih simulacija, pogotovo profilima na slikama 4.4. i 4.6.. Gubici su također slični, 150 kW nije puno veći od 140 kW.



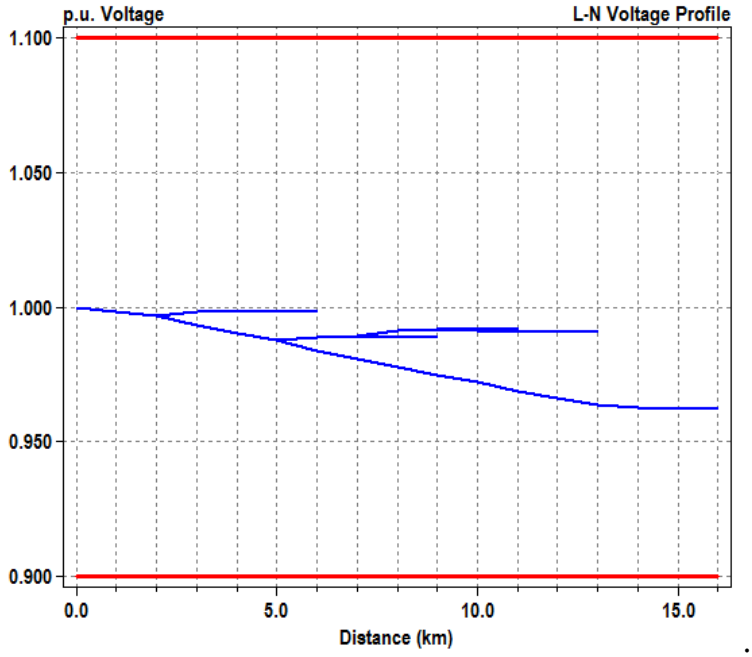
Slika 4.15.: Naponski profil za stanje pražnjenja pri snagama od 454,3 kW i 908,6 kW

Pražnjenje također ima naponski profil koji izgleda poznato. Slika 4.5. je identična slici 4.14., no zanimljivije je to što su gubici od simulacije pod slikom 4.5. 95,1 kW, a gubici od tek obrađene simulacije su 95,2.

4.2.1.3 Baterijska spremišta energije snage 681,45 kW i 1362,9 kW



Slika 4.16.: Naponski profil za stanje punjenja pri snagama od 681,45 kW i 1362,9 kW

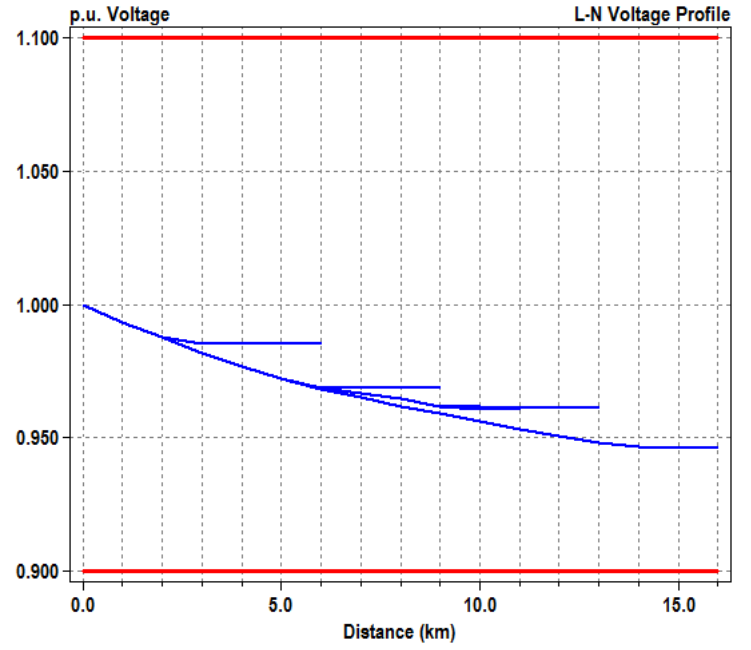


Slika 4.17.: Naponski profil za stanje pražnjenja pri snagama od 681,45 kW i 1362,9 kW

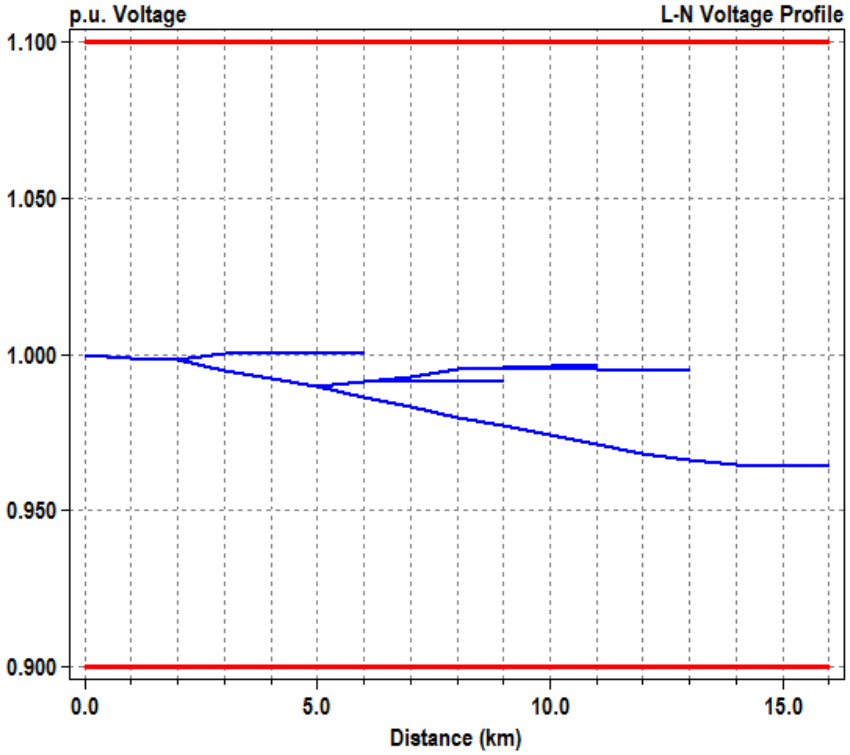
Iako su gubici u stanju punjenja skočili na 174 kW, gubici u stanju pražnjenja slabo opadaju i stoje na 91,1 kW. Povećavanje snage spremišta za trenutnu lokaciju ne ide više u korist mreži.

4.2.1.4 Baterijska spremišta energije snage 908,6 kW i 1817,2 kW

Povećanje snage baterijskih spremišta energije više nije efikasan način korištenja spremišta energije, ali nije dovedena mreža u opasnost.



Slika 4.18.: Naponski profil za stanje punjenja pri snagama od 906,8 kW i 1817,2 kW



Slika 4.19.: Naponski profil za stanje pražnjenja pri snagama od 906,8 kW i 1817,2 kW

Tablica 4.2.: Tablični prikaz napona i gubitaka u čvorovima 11 i 13 za oba stanja rada

Snaga BSE[kW]	**Punjenje**			**Pražnjenje**		
	Najviši napon [p.u.]	Najniži napon [p.u.]	Ukupni gubici [kW]	Najviši napon [p.u.]	Najniži napon [p.u.]	Ukupni gubici [kW]
45,43 i 90,86	1	0,9548	117,7	1	0,9557	112,3
454,3 i 908,6	1	0,9507	150,4	1	0,9597	95,2
681,45 i 1362,9	1	0,9484	174,0	1	0,962	91,1
908,6 i 1817,2	1	0,9462	201,5	1	0,9642	90,6

U stanju punjenja su se gubici još povećali, na 201,5 kW, dok su gubici u stanju pražnjenja manji za 0,5 kW u usporedbi s gubicima pod poglavljem 4.2.1.3..

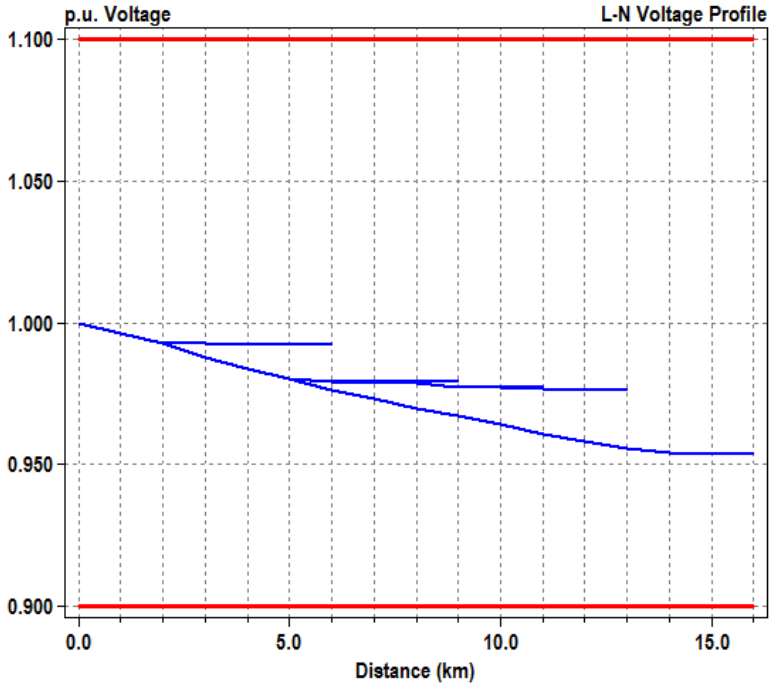
Pri niskim snagama baterijskog spremišta energije se ne vidi velika korist pošto su im gubici pri pražnjenju slični gubicima pri punjenju. Prevelika i premala snaga spremišta energija nisu efikasna kao spremišta u opsegu od 10% do 25% ukupnog opterećenja i uz to mogu dovesti mrežu u opasnost ili nanjeti prevelike gubitke.

4.2.2 Utjecaj snage baterijskih spremišta energije u čvorovima 26 i 33

Instaliranje baterijskih spremišta energije u dalje čvorove je pokazalo velike gubitke u stanju punjenja, no najmanje u stanu pražnjenja. Fiksiranjem spremišta energije u čvorove 26 i 33 će nam pokazati je li povećanje snage spremnika uvijek efikasno pri radu u stanju pražnjenja

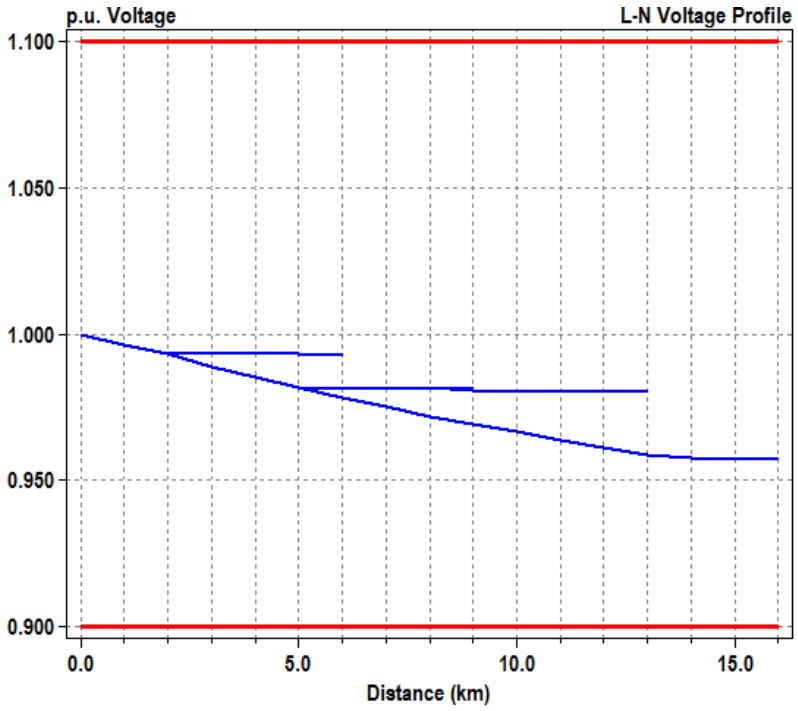
4.2.2.1 Baterijska spremišta energije snage 45,43 kW i 90,86 kW

Pošto su u ovoj simulaciju baterijska spremišta energije daleko od referentnog čvora, naponski profil na slici 4.20. nema velikih razlika od naponskog profila na slici 4.12.



Slika 4.20.: Naponski profil za stanje punjenja pri snagama od 45,43 kW i 90,86 kW

Zbog male snage spremišta, bez obzira na njihovu lokaciju, svi naponski profili izgledaju slično. Razlike u stanju punjenja su minimalne, najniži napon je 0,9535 p.u. i gubici su 122,3 kW.

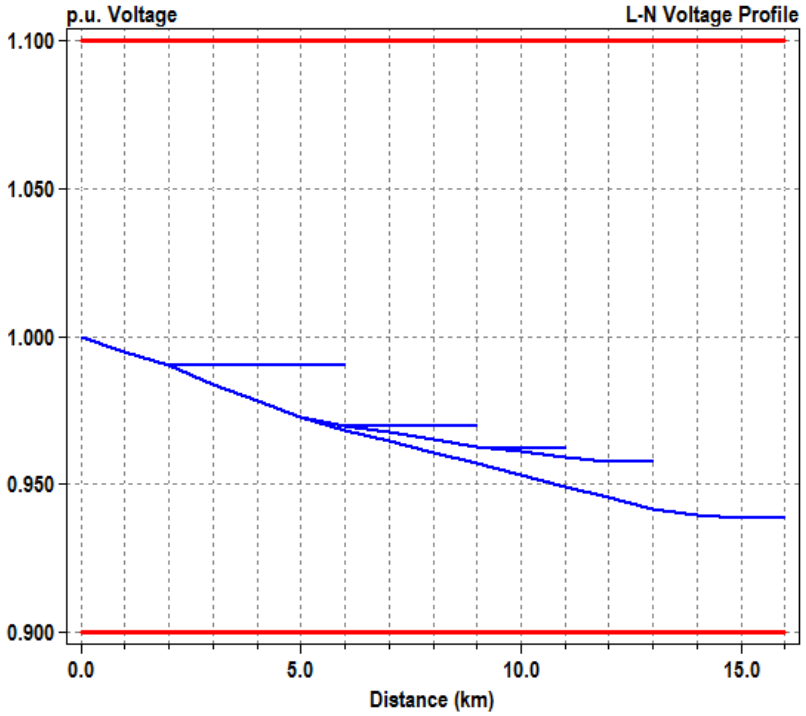


Slika 4.21.: Naponski profil za stanje pražnjenja pri snagama od 45,43 kW i 90,86 kW

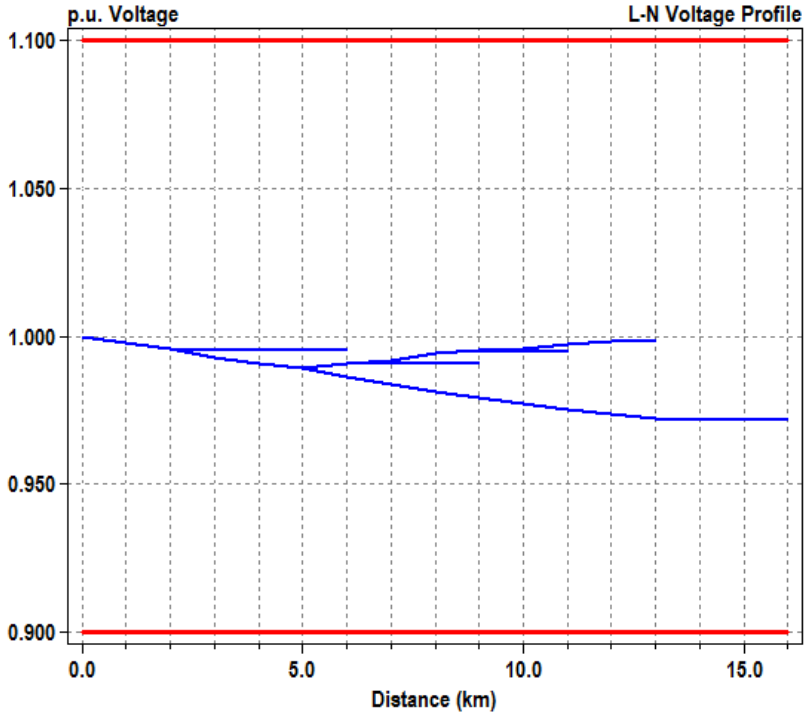
U stanu pražnjenja je razlika još manja. Slike 4.21. i 4.13. su identične i gubici to dokazuju. S gubicima od 108,1 kW i najnižim naponom od 0,9569 p.u. ne vidi se značajna razlika od rezultata pod poglavljem 4.2.1.1.

4.2.2.2 Baterijska spremišta energije snage 454,3 kW i 908,6 kW

Povećanje snage baterijskih spremišta energije koja su locirana pri kraju mreže eksponencijalno povećava gubitke, u stanju punjenja. U tablici 4.2. možemo vidjeti da su najveći gubici u prošlom zadatku iznosili 201,5 kW. Iako je ovo tek druga simulacija na novoj lokaciji, gubici su skočili na 212,9 kW.



Slika 4.22.: Naponski profil za stanje punjenja pri snagama od 454,3 kW i 908,6 kW

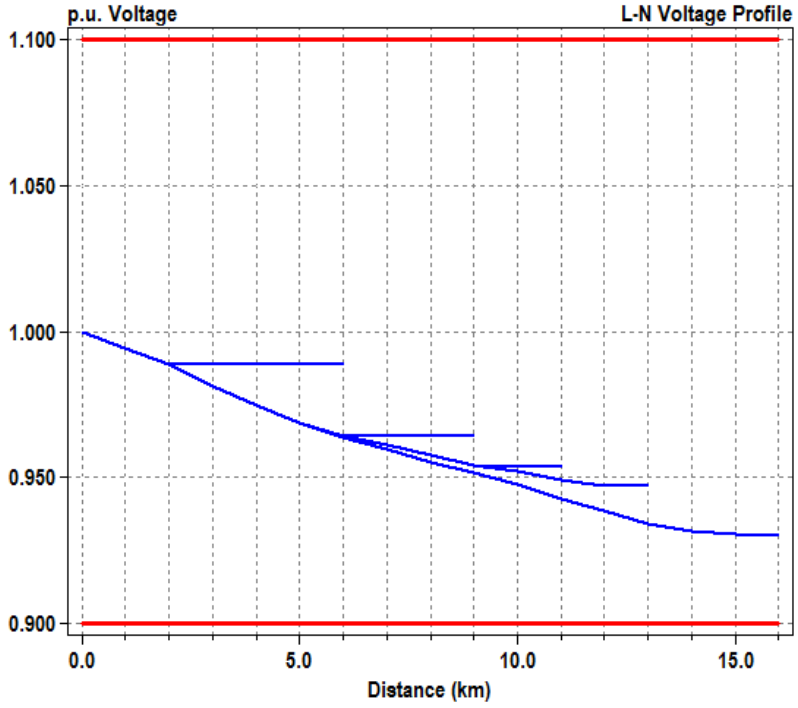


Slika 4.23.: Naponski profil za stanje pražnjenja pri snagama od 454,3 kW i 908,6 kW

U stanu punjenja su gubici veći nego prije, ali su gubici najniži koji su izmjereni do sada u vrijednosti od 71,4 kW.

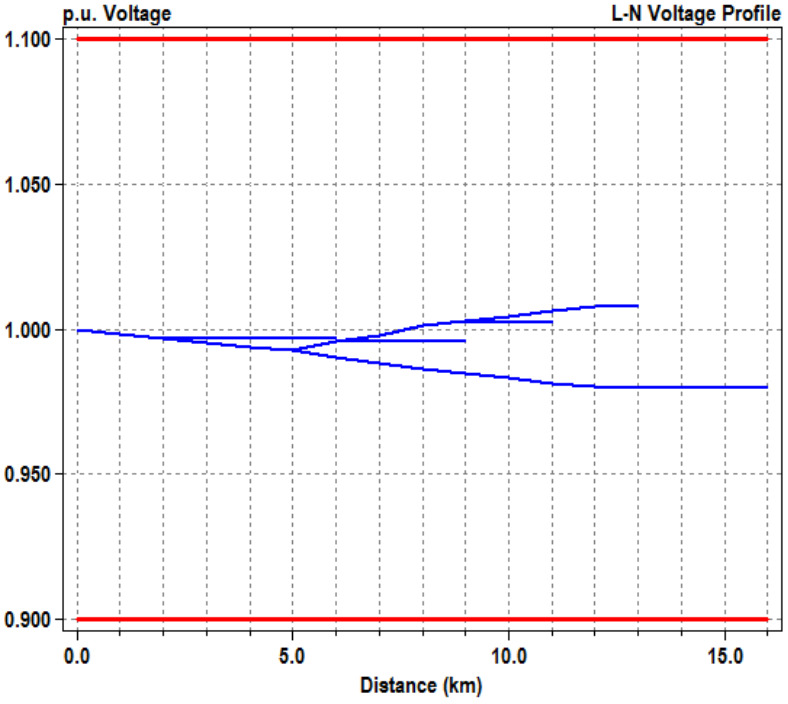
4.2.2.3 Baterijska spremišta energije snage 681,45 kW i 1362,9 kW

Na naponskom profilu na slici 4.24. se vidi kako najniži napon u mreži drastično pada i bliži se kritičnoj vrijednosti od 0,900 p.u.



Slika 4.24.: Naponski profil za stanje punjenja pri snagama od 681,45 kW i 1362,9 kW

Snage spremišta energije su povećane za 5% i 10%, dok su se gubici povećali za 70,3 kW, povećanje od preko 30%

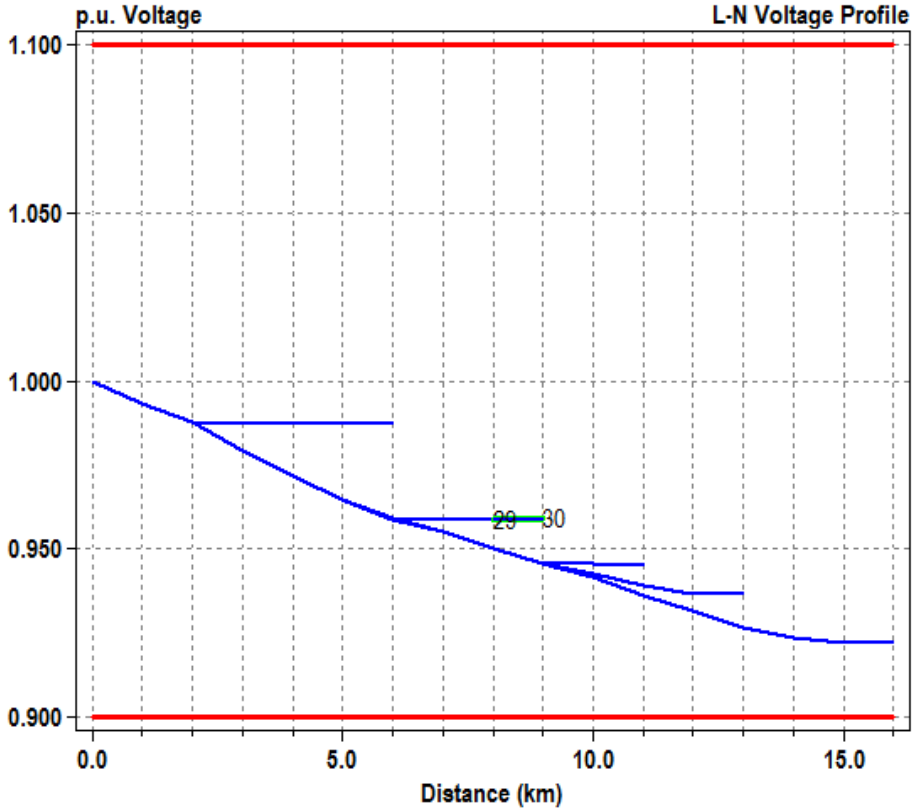


Slika 4.25.: Naponski profil za stanje pražnjenja pri snagama od 681,45 kW i 1362,9 kW

Slika 4.25. pokazuje da je vrijednost najvišeg napona u mreži skočila na 1,008, što ne stvara problem za mrežu, ali ako se pogledaju gubici od 69,3 kW može se reći da se spremišta više ne koriste ekonomično

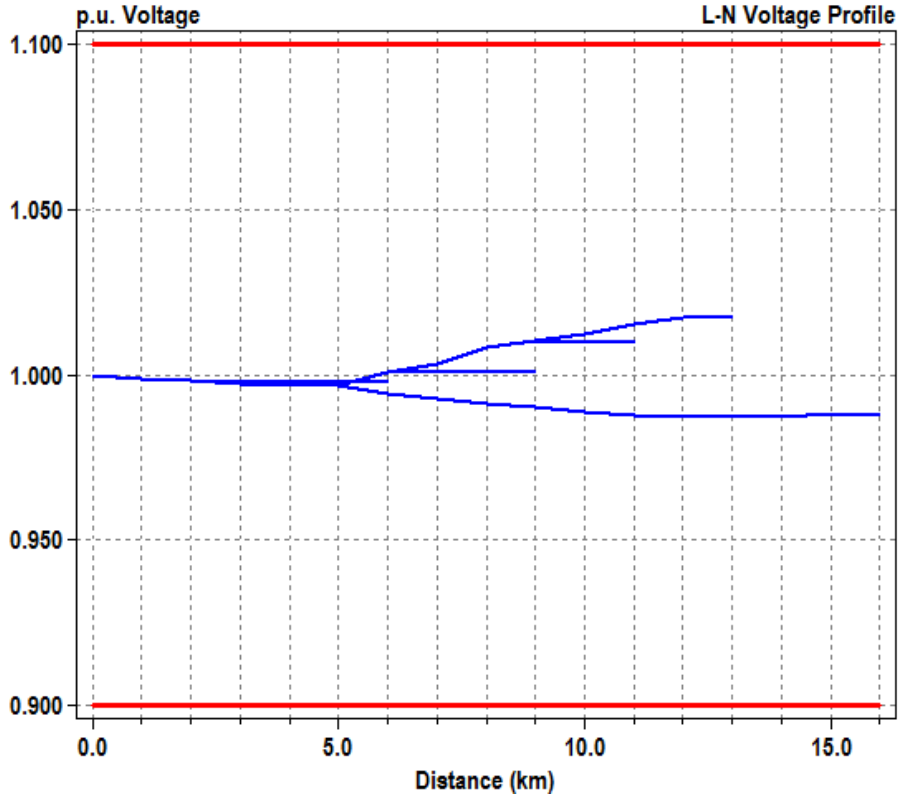
4.2.2.4 Baterijska spremišta energije snage 908,6 kW i 1817,2

Zadnja simulacija koja će se obraditi pokazuje naponski profil koji se približava kritičnim granicama



Slika 4.26.: Naponski profil za stanje punjenja pri snagama od 908,6 kW i 1817,2 kW

Gubici su daleko najveći u usporedbi s ostalim simulacijama i iznose 368,4 kW. S tolikim skokom u gubicima najniži napon u mreži, koji iznosi 0,9219 p.u., će očekivano biti blizu kritičnoj vrijednosti.



Slika 4.27.: Naponski profil za stanje pražnjenja pri snagama od 908,6 kW i 1817,2 kW

Slika 4.27. pokazuje da skoro pola vodova u mreži ima vrijednost preko 1,00 p.u. s najvećom od 1,017 p.u.. Takve vrijednosti i dalje nisu opasne za mrežu, ali su gubici u stanu pražnjenja po prvi puta veće od gubitaka u prethodnim simulacijama u stanu pražnjenja. Na tablici 4.3. se može vidjeti koliki su gubici od 79,4 kW u stanju pražnjenja veći od prijašnjih.

Tablica 4.3.: Tablični prikaz napona i gubitaka u čvorovima 26 i 33 za oba stanja rada

Snaga BSE[kW]	**Punjenje**			**Pražnjenje**		
	Najviši napon [p.u.]	Najniži napon [p.u.]	Ukupni gubici [kW]	Najviši napon [p.u.]	Najniži napon [p.u.]	Ukupni gubici [kW]
45,43 i 90,86	1	0,9535	122,3	1	0,9569	108,1
454,3 i 908,6	1	0,9385	212,9	1	0,9718	71,4
681,45 i 1362,9	1	0,9302	283,2	1,008	0,9797	69,3
908,6 i 1817,2	1	0,9219	368,4	1,017	0,9876	79,4

Pomoću tablice 4.3. se može procijeniti kolika bi snaga baterijskih spremišta energija bila potrebna da se postignu što manji gubici u stanju pražnjenja, iako to vjerojatno ne bi bila korisna informacija pošto su gubici pri punjenju toliko visoki da se to ne bi primjenilo.

5 Zaključak

Pri malim snagama baterijskih spremišta energije režim rada spremišta utječe jako malo na cjelokupnu mrežu. Bitne razlike se pojavljuju tek pri većim snagama, između 10% i 25% ukupnog opterećenja mreže. Velike se razlike vide i pri većim snagama od 30% i 40%, no u zadnjoj simulaciji pod poglavljem 4.2.2.4. su gubici počeli rasti zbog velike snage spremišta u stanju pražnjenja. Optimalna snaga spremišta je vjerojatno između navedenih 10% i 25% ukupnog opterećenja, ali lokacija spremišta energije igra veliku ulogu.

Kada su se baterijska spremišta energije, snage 454,3 kW i 227,15 kW nalazila u čvorovima 16 i 23 (u prvom zadatku), njihovi rezultati su bili slični rezultatima u drugom zadatku u slučaju gdje su spremišta fiksirana u čvorove 11 i 13 pri snazi od 454,3 kW i 908,6 kW. Dapače rezultati u prvom zadatku su bili bolji zato jer su gubici u stanju punjenja bili za 10 kW manji pri upola manjoj snazi. Na temelju mogu se može reći da stavljanje spremišta energije na početak ili kraj mreže nije ekonomično niti dobro za samu mrežu.

Iako je očito da nema ekonomične koristi od instaliranja spremišta energije na početak ili kraj mreže, instaliranje na kraj mreže pri istim snagama je nestabilnije od instaliranja na početak mreže. U slučaju kad su spremišta pri kraju mreže, razlika u gubicima između režima rada punjenja i pražnjenja pokazuje da nije bitno koliko su niski gubici u pražnjenju sve dok su toliko visoki gubici pri punjenju.

Literatura

[1] Jacob Ostergaard, K.C. Divya: Battery energy storage technology for power systems – An overview

[2] Haisheng Chen, Thang Ngoc Cong, Wei Yang, Chunqing Tan, Yongliang Li, Yulong Ding: Progress in electrical energy storage system: A critical review

[3] Roger C. Dugan, FIEE – Energy Storage Controls Modeling for Distribution Planning

[4] Roger C. Dugan, Sr. Technical execute – Reference Guide: The Open Distribution System Simulator

Prilog

Dionica	Serijska impedancija dionice		Čvor	Snaga opterećenja		Tip potrošača
	R[Ω]	X_L[Ω]		P[kW]	Q[kvar]	
1 – 2	0,117	0,048	2	230,00	142,50	3
2 – 3	0,107	0,044	3	0,00	0,00	-
3 – 4	0,164	0,046	4	230,00	142,50	3
4 – 5	0,150	0,042	5	230,00	142,50	3
5 – 6	0,150	0,042	6	0,00	0,00	-
6 – 7	0,314	0,054	7	0,00	0,00	-
7 – 8	0,210	0,036	8	230,00	142,50	3
8 – 9	0,314	0,054	9	230,00	142,50	3
9 – 10	0,210	0,036	10	0,00	0,00	-
10 – 11	0,131	0,023	11	230,00	142,50	3
11 – 12	0,105	0,018	12	137,00	84,00	3
3 – 13	0,157	0,027	13	72,00	45,00	1
13 – 14	0,210	0,036	14	72,00	45,00	1
14 – 15	0,105	0,018	15	72,00	45,00	1
15 – 16	0,052	0,009	16	13,50	7,50	1
6 – 17	0,179	0,050	17	230,00	142,50	1
17 – 18	0,164	0,046	18	230,00	142,50	1
18 – 19	0,213	0,047	19	230,00	142,50	1
19 – 20	0,194	0,043	20	230,00	142,50	3
20 – 21	0,194	0,043	21	230,00	142,50	2
21 – 22	0,262	0,045	22	230,00	142,50	2
22 – 23	0,262	0,045	23	230,00	142,50	2
23 – 24	0,314	0,054	24	230,00	142,50	3
24 – 25	0,210	0,036	25	230,00	142,50	3
25 – 26	0,131	0,023	26	230,00	142,50	1
26 – 27	0,105	0,018	27	137,00	85,00	1
7 – 28	0,157	0,027	28	75,00	48,00	1
28 – 29	0,157	0,027	29	75,00	48,00	1
29 – 30	0,157	0,027	30	75,00	48,00	1
10 – 31	0,157	0,027	31	57,00	34,50	2
31 – 32	0,210	0,036	32	57,00	34,50	2
32 – 33	0,157	0,027	33	57,00	34,50	2
33 – 34	0,105	0,018	34	57,00	34,50	2

Podaci o impedancijama dionica, nazivnim opterećenjima čvorova i tipu potrošača za Izvod34

Sažetak

Zadatak završnog rada je dati kratki pregled baterijskih spremišta električne energije s opisom njihove primjene u distributivnim mrežama, zatim opisati način modeliranja baterijskih spremišta za simulacije u programskom paketu OpenDSS.

Nakon rješavanja prethodnih zadataka potrebno je obaviti simulacije na primjeru distributivne mreže za nekoliko slučajeva ugradnje baterijskih spremišta. U svakom od pet slučajeva je fiksna nazivna snaga oba spremišta energije, 10% i 5% ukupnog opterećenja mreže, međutim mjenjaju se lokacije baterijskih spremišta energije da se vidi kakav utjecaj lokacija spremišta energije ima na ukupne gubitke u mreži. Gleda se utjecaj baterijskih spremišta energije na mrežu u oba režima rada spremišta, punjenju i pražnjenju.

Kada su određene dvije lokacije baterijskih spremišta energije u kojima mreža ima najniže ukupne gubitke, fiksira se lokacija spremišta energije i mjenja im se nazivna snaga u svakom od četiri slučaja, od 1% i 2% ukupnog opterećenja mreže do 20% i 40% opterećenja. Rezultati se gledaju za oba režima rada baterijskih spremišta energije.

Zaključeno je da nije ekonomično instalirati baterijska spremišta energije na kraj ili početak mreže, pošto su gubici veći i dovodi se mreža do nestabilnosti. Uz to je efikasnost spremišta viša ako im je lokacija bliža sredini mreže ili na početku grananja nove grane mreže.

Summary

Summary of final work is to give a short review of battery energy storages that store electrical energy with a discription of their use in transmission systems, then describe the method designing battery storages for simulations in application OpenDSS.

After solving previous tasks it is necessary to do simulations for several instances where energy storages are installed in a transmission system. In each of five instances both energy storages have fixed rated power equivalent to 10% and 5% of total load power, however locations of battery energy storages are being changed to see the influence that locations of energy storages have on total losses of a transmission system. The influence of battery energy storages on the transmission system is being watched in both energy storage operational modes, charging and discharging.

When it is certain in which two battery energy storage locations transmission system has the lowest losses, energy storages are fixed to those locations and their rated power is being changed for each of four cases, from 1% and 2% of total load power to 20% and 40% of total load power. Results for both operational modes are noted.

It was concluded that it is not a economically viable option to install battery energy storages on the end or beginning of the tranmission system, since losses are larger and the system is being brough to instability. Also the efficiency of energy storages is higher if their locations is closer to the middle of transmission system or on the beginning of a new branch in the system.

Životopis

OSOBNI PODACI

Ime i prezime	Matija Kereta
Adresa	Papuk gore 26a, 31000 Osijek
Država	Republika Hrvatska
Telefon	099 309 6867
E-mail	matijakereta@gmail.com
Datum i mjesto rođenja	17.08.1993. Osijek

OBRAZOVANJE

Vrijeme	2000./2001. – 2007/2008.
Institucija	Elektrotehnička i prometna škola Osijek
Sprema	SSS
Smjer	Mehatronika

OSOBNE VJEŠTINE

Strani jezici	Engleski (vrlo dobro znanje)
	Njemački (A2 razina)
Vozačka dozvola	B kategorija

RADNO ISKUSTVO

Vrijeme	2012.
Poslodavac	McDonald's
Radno mjesto	Kuhar i čistač
Opis djelatnosti	Pravljenje hrane i čišćenje objekta