Vremenska simulacija kupca s vlastitom proizvodnjom i baterijskom pohranom električne energije u distribucijskoj elektroenergetskoj mreži

Berta, Benjamin

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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:200:533414

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-21**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

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

Sveučilišni diplomski studij

VREMENSKA SIMULACIJA KUPCA S VLASTITOM PROIZVODNJOM I BATERIJSKOM POHRANOM ELEKTRIČNE ENERGIJE U DISTRIBUCIJSKOJ ELEKTROENERGETSKOJ MREŽI

Diplomski rad

Benjamin Berta

Osijek, 2020.

Sadržaj

1. UVOD 1

1.1 Zadataka diplomskog rada 2

2. KUPAC S VLASTITOM PROIZVODNJOM 3

2.1 Obiteljska kuća 4

2.2 Tvrtka 6

2.3 Koncept izvođača radova 8

2.4. Javne ustanove 10

2.5 Kontrolirano opterećenje 12

2.6 Stambene zgrade 14

2.7 Zajednička pohrana 16

2.8 Virtualna elektrana 18

3. INTEGRACIJA KUPCA S VLASTITOM PROIZVODNJOM 20

3.1 Distribucijska mreža 20

3.2 Distribuirana proizvodnja FN sustava 21

3.3 Razina integracije distribuirane proizvodnje 22

3.3.1 Aktivna i radna snaga u distribucijskoj mreži 22

3.3.2 Napon distribucijske mreže 23

3.4 Baterijski spremnici 24

3.4.1 Uloga baterijskih spremnika 24

4. OPENDSS PROGRAMSKI ALAT ZA SIMULACIJU DISTRIBUCIJSKIH MREŽA 25

4.1 OpenDSS struktura 25

4.2 OpenDSS algoritam za tokove snaga 26

4.3 Elementi distribucijskog sustava u OpenDSS-u 28

4.4 Definiranje distribucijskog sustava u OpenDSS-u 29

4.5 Model FN sustava u OpenDSS-u 33

4.6 Model baterijskog spremnika u OpenDSS-u 36

4.6.1 Element baterijskog spremnika u OpenDSS-u 37

4.7 Testni NN izvod (eng. IEEE European LV test feeder) 39

5. VREMENSKA SIMULACIJA KUPCA S VLASTITOM PROIZVODNJOM 41

5.1 Referentni testni slučaj – Analiza NN EU testnog izvoda 41

5.2 Simulacija i analiza integracije FN sustava na NN EU testnom izvodu 45

5.2.1 Analiza rezultata simulacije I. slučaj – FN sustavi na 10% potrošačkih sabirnica 46

5.2.2 Analiza rezultata simulacije II. slučaj – Proizvodnja FN sustava bez uzlaznih tokova snage u nadređenu mrežu 48

5.2.3 Analiza rezultata simulacije III. slučaj – FN sustavi većih snaga.....50
5.2.4 Analiza rezultata simulacije IV. slučaj – Narušavanje naponskog profila 52
5.3 Simulacija i analiza FN sustava s baterijskim spremnicima na NN EU testnom izvodu 54
5.3.1 Analiza rezultata simulacije.....54
5.4 Usporedba rezultata simulacije 57
6. ZAKLJUČAK 64
POPIS LITERATURE 66
Sažetak 67
Abstract 67
Životopis 68
Prilozi 69

1. UVOD

Nekoliko desetljeća unazad, veliki dio globalne populacije nije bio niti svjestan problema s kojim će se susresti. Konvencionalni izvori energije kao što su nafta, ugljen i zemni plin počeli su se masovno koristiti u generaciji električne energije drugom industrijskom revolucijom. Njihova uporaba, povećanjem svjetske populacije eksponencijalno je rasla. Sve većom potražnjom za električnom energijom nastao je postojeći konvencionalni elektroenergetski sustav. Jednako tako utjecaj konvencionalnih izvora na klimatske promjene je rastao, s obzirom da su najveći izvori ugljikova dioksida i štetnih plinova. Prekomjernom pojavom stakleničkih plinova, efekt staklenika se pojačavao kao i zagrijavanje Zemlje. Shvaćajući problematiku počelo se razmišljati o tehničkim rješenjima koja bi zamijenila konvencionalne izvore energije, te iskoristila nekonvencionalne, obnovljive izvore za generaciju električne energije.

Jedan od najčešćih distribuiranih izvora su FN sustavi. Njihova trenutna instalirana snaga iznosi oko 580 GW, što je sedam puta više u odnosu na početak prošlog desetljeća 40 GW u 2010.g, a u 2018. godini prema statistikama koje provodi IRENA, instalirani kapacitet se gotovo udvostručio u odnosu na prethodnu 2017.godinu [1]. S obzirom na trend rasta projekt „The most promising distributed solar PV solutions", financiran od strane EU propisao je osam mogućih rješenja za kupce s vlastitom proizvodnjom. Definirana su razna rješenja za privatne i javne građevine, kao i napredna rješenja koja se tiču lokalne zajedničke pohrane, pametnih mreža i virtualnih elektrana. Predložena moguća rješenja još su više podigla interes za integracijom sve većeg broja FN sustava u ruralnim dijelovima Europe. Potrošači ne samo da pridonose tranziciji na moderni elektroenergetski sustav, već su i u mogućnosti proizvodnjom električne energije izaći na tržište električnom energijom.

FN sustavi su važan izvor obnovljive energije. Generacija električne energije FN pretvorbom ne razlikuje se previše u odnosu na druge izvore energije. Solarna energija je čista energija i nema štetan utjecaj na okoliš te može uvelike zamijeniti proizvodnju iz fosilnih goriva. Varijabilnost u izlaznoj snazi FN sustava je njihovo prirodno ponašanje. Izlazak i zalazak Sunca dovodi do regularne varijacije u FN proizvodnji. Osim toga, izlazna snaga FN modula direktno je ovisna o količini Sunčeva zračenja. Kratkotrajni prolazak oblaka može izazvati velike varijacije u količini injektirane električne energije tokom promjenjivog dana. S razvojem FN sustava paralelno se razvija i baterijska pohrana. Povećana proizvodnja električne snage na

lokalnim izvodima distribucijskih mreža za vrijeme velike solarne radijacije može premašiti vrijednost potražnje, u tom slučaju dolazi do promjene toka snage te je energiju potrebno pohranit. Tradicionalne distribucijske mreže nisu dimenzionirane za maksimalna opterećenja, niti je predviđen tok snage u oba smjera.

Integracija distribuirane proizvodnje izaziva do sad nepoznate promjene za distribucijski sustav. Prema tome razvijaju se novi algoritmi za postojeće distribucijske mreže, koji omogućuju precizne stvarno vremenske simulacije, detaljne analize i istraživanje. OpenDSS programski je alat koji je prije svega otvoren za korištenje. Njegova namjena je simulacija uvjeta u distribucijskoj mreži, planiranje distribucije, a najvažnije i analize distribuirane proizvodnje.

1.1. Zadataka diplomskog rada

Kako bi se odredio utjecaj integracije sve većeg broja kupaca s vlastitom proizvodnjom, u ovom radu izvest će se simulacija pomoću programskog alata OpenDSS. Prije svega potrebno je analizirati postojeći distribucijski sustav. Kao primjer distribucijskog sustava, koristit će se niskonaponski testni izvod, koji dolazi zajedno s OpenDSS instalacijom, te je dio dokumentacije. Prema analizi NN testnog izvoda modelirat će se FN sustavi s baterijskim spremnicima koji će biti postavljeni na potrošačke sabirnice. Nakon modeliranja, izvršit će se vremenske simulacije kupca s vlastitom proizvodnjom, koje će biti detaljno analizirane.

2. KUPAC S VLASTITOM PROIZVODNJOM

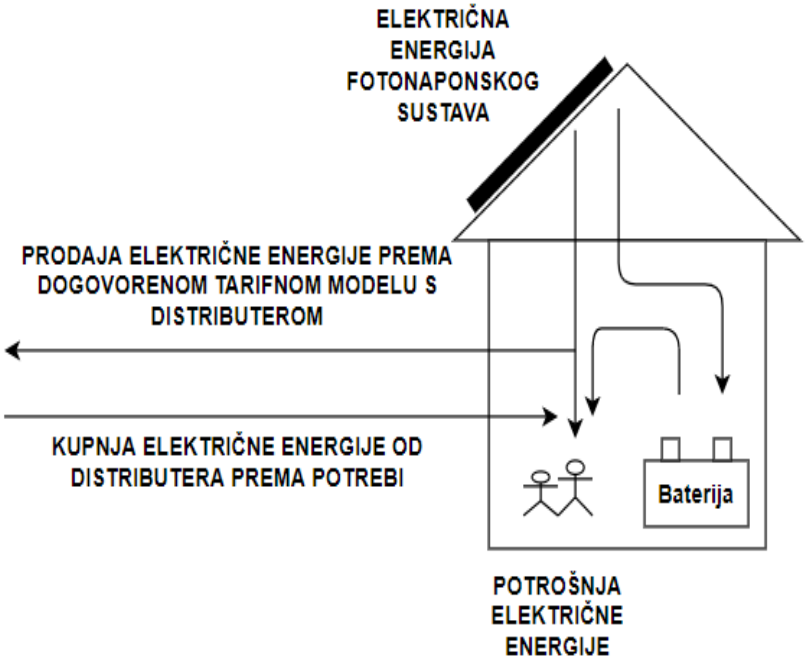
Podizanjem svijesti kupaca o ekološkoj samoodrživosti, te padom cijena FN sustava sve više se kupaca električne energije odlučuje za postavljanje modula na njihove stambene ili poslovne objekte. Na taj način kupac postaje i proizvođač, odnosno kupac s vlastitom proizvodnjom te pridonosi tranziciji energetskog sustava na napredne mreže. S obzirom na tehnologije korištene pri izgradnji FN elektrane razlikujemo nekoliko modela, odnosno mogućih rješenja kupaca s vlastitom proizvodnjom (eng. prosumer), kao kombinaciju FN sustava i opterećenja spojenog na distribucijsku mrežu.

Postoji osam rješenja čija je primjena moguća u Europi. Razlikujemo ih po raspodjeli između investitora, operatora distribucijskog sustava i potrošačima. Moguća rješenja kupca s vlastitom proizvodnjom [2]:

- obiteljska kuća
- tvrtka kao investitor
- koncept izvođača radova
- komercijalne zgrade
- opterećenje kose se može kontrolirati
- zgrada gdje investitor prodaje električnu energiju stanarima
- zajednička pohrana
- virtualna elektrana

2.1. Obiteljska kuća

Tablica 2.1. *Elementi sustava i dijagram: obiteljska kuća*

Elementi sustava: • FN moduli • pretvarač • sustav za upravljanje punjenjem i pražnjenjenjem baterije • bateriju • pametno dvosmjerno brojilo na spoju s distribucijskom mrežom • sustav za upravljanje energijom • teret
Dijagram: 

U ovakvim sustavima električna energija koju proizvodi FN sustav napaja potrebe obiteljske kuće, a višak proizvedene električne energije dijelom napaja mrežu, dok se drugim dijelom puni baterijski sustav za pohranu električne energije [2].

Prednosti:

- djelomična neovisnost o operatoru distribucijskog sustava (ušteda)
- smanjenje vršne potražnje u sustavu
- dostupna rezerva u slučaju prekida rada distribucijske mreže
- reputacijski napredak kao posljedica ulaganja u razvoj ekološke samoodrživosti
- doprinos tranziciji energetskog sustava

Nedostatci:

- visoka cijena investicije
- kratak vijek trajanja baterija
- loš utjecaj baterije na distribucijsku mrežu
- visoki porezi na velike PV sustave
- regulatorske barijere pri prodaji proizvedene električne energije
- dug period otplate investicije

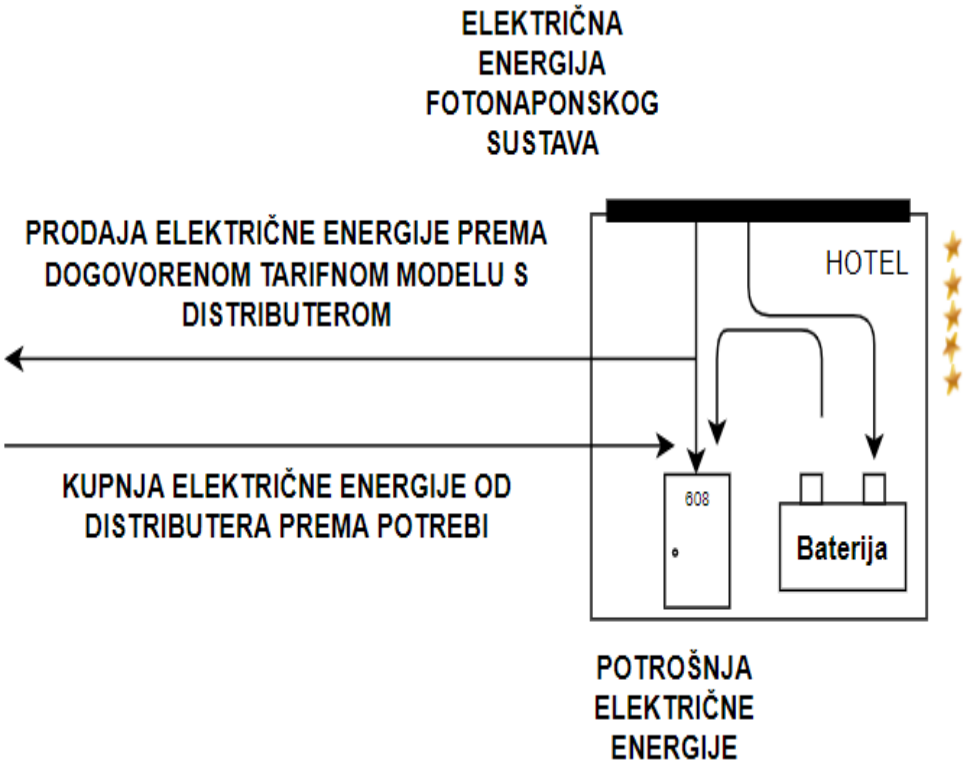
2.2. Tvrtka

Tablica 2.2. *Elementi sustava i dijagram: tvrtka kao kupac s vlastitom proizvodnjom*

Elementi sustava:

- FN moduli
- sustav za praćenje Sunca
- pretvarač
- baterija sa sustavom za upravljanje punjenja i pražnjenja
- električno vozilo (izborno)
- sustav za upravljanje energijom
- teret

Dijagram:



Investitor i potrošač iste su osobe. Električna energija generirana od strane FN elektrane napaja sve energetske potrebe tvrtke kada god je to moguće. U slučajevima kada FN elektrana proizvodi višak električne energije dio napaja distributivnu mrežu, a dio se sprema u baterijske spremnike [2]. Raspodjela električne energije između napajanja mreže i spremanja u baterije ovisi isključivo o profitu, odnosno dogovorenoj tarifni prema kojoj kupac može prodavati električnu energiju. Kada je energija jeftinija tarifa pohranjuje se u baterije, a kada je skuplja tarifa napaja se mreža.

Ovo rješenje najčešću primjenu nalazi na hotelima, bolnicama, supermarketima, tvornicama, komercijalnim ili uslužnim tvrtkama te na farmama.

Prednosti:

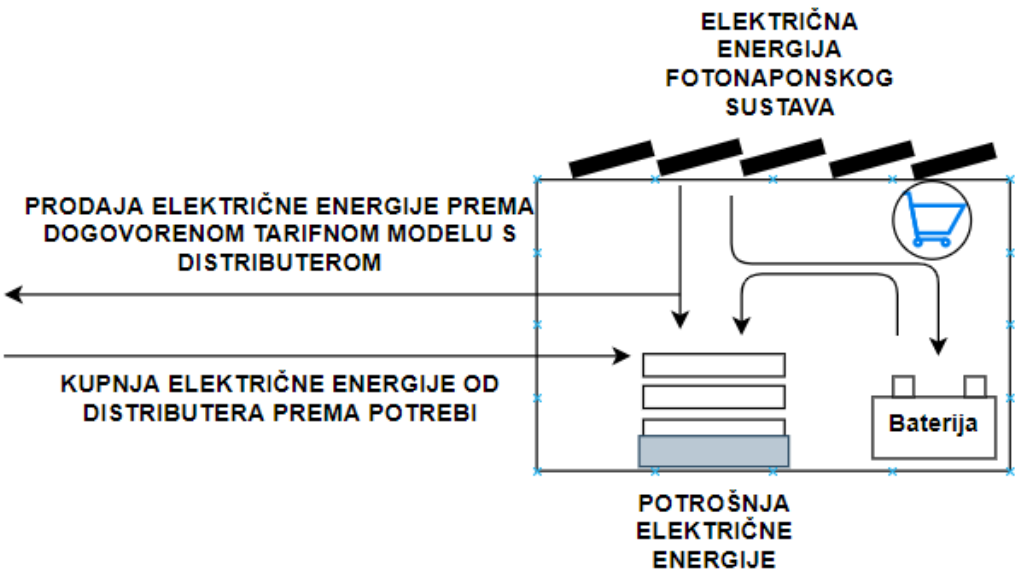
- ušteda kao posljedica smanjene potrošnje električne energije iz distribucijske mreže
- djelomična neovisnost o distributeru električne energije
- smanjenje vršne potrošnje
- mogućnost rezerve u slučaju prekida napajanja od strane distributera
- reputacijski napredak kao posljedica ulaganja u razvoj ekološke samoodrživosti
- doprinos tranziciji energetskog sustava
- povećanje cijene građevine, primjerice inkrementalan utjecaj na kategoriju hotela

Nedostatci:

- vrlo visoka cijena investicije (iako se smanjuje svakodnevno)
- dugi period otplate investicije

2.3. Koncept izvođača radova

Tablica 2.3. *Elementi sustava i dijagram: koncept izvođača radova kao kupca s vlastitom proizvodnjom*

Elementi sustava: • FN moduli • sustav za praćenje Sunca (izborno) • pretvarač • baterija sa sustavom za upravljanje punjenja i pražnjenja • električno vozilo (izborno) • sustav za upravljanje energijom • teret
Dijagram: 

Električna energija koju proizvodi FN sustav djelomično napaja potrošača ovisno o tarifi, drugi dio i višak električne energije se pohranjuje u baterijske spremnike [2]. U slučaju da je proizvodnja električne energije iz FN elektrane veća nego potražnja, a baterijski spremnik je pun, višak napaja distributivnu mrežu. U slučaju da FN elektrana ne proizvodi električnu energiju, a baterijski spremnik je prazan objekt se napaja iz distributivne mreže.

Prednosti:

- ušteda kao posljedica smanjene potrošnje električne energije iz distribucijske mreže
- utjecaj na smanjenje vršne potrošnje
- reputacijski napredak kao posljedica ulaganja u razvoj ekološke samoodrživosti
- doprinos tranziciji energetskog sustava
- povećanje cijene građevine

Nedostatci:

- vrlo visoka cijena investicije
- dugi period otplate investicije
- indirektna ušteda
- kratak vijek trajanja baterija
- loš utjecaj baterije na distribucijsku mrežu

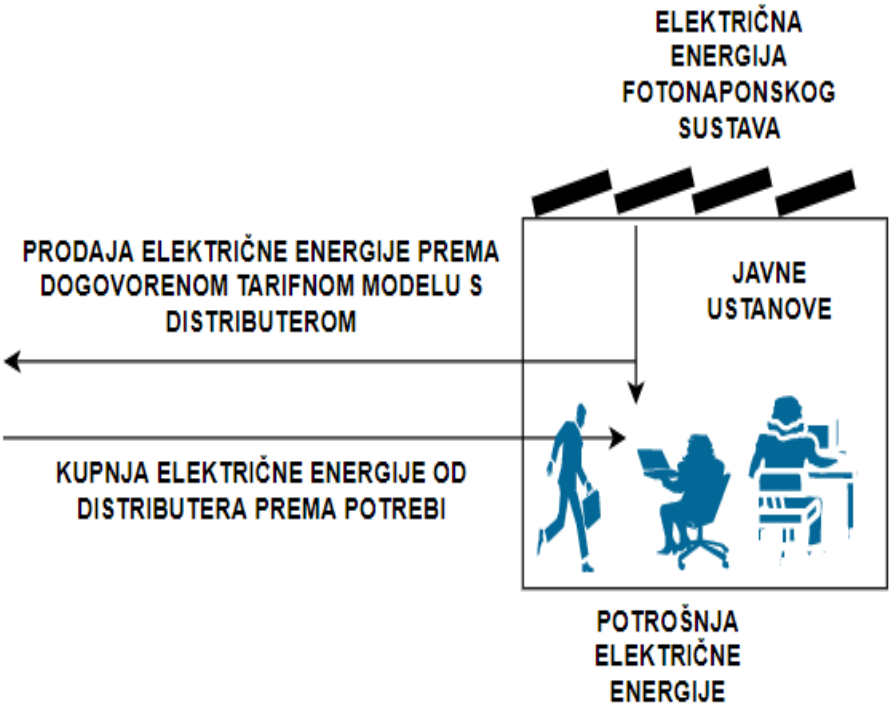
2.4. Javne ustanove

Tablica 2.4. *Elementi sustava i dijagram: javne ustanove kao kupac s vlastitom proizvodnjom*

Elementi sustava:

- FN moduli
- sustav za praćenje Sunca
- pretvarač
- baterija sa sustavom za upravljanje punjenja i pražnjenja
- električno vozilo (izborno)
- sustav za upravljanje energijom
- monitoring
- teret

Dijagram:



U ovom slučaju investitor i potrošači su građani ili zajednica. Električna energija proizvedena iz FN elektrane napaja potrošače odnosno same investitore, ako je potrebno puni i baterijski spremnik[2]. Višak električne energije napaja distributivnu električnu mrežu kada je baterijski spremnik u potpunosti napunjen. Potražnja za električnom energijom koja se ne može nadomjestiti s proizvodnjom iz FN elektrane i baterijskih spremnika uzima se iz distributivne mreže.

Prednosti:

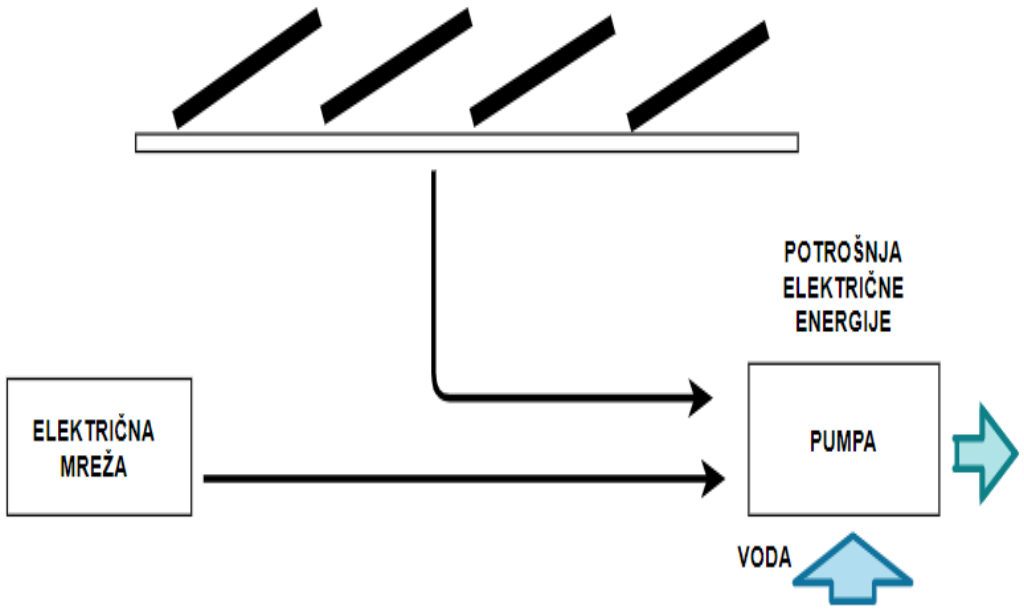
- ušteda kao posljedica smanjene potrošnje električne energije iz distribucijske mreže
- djelomična neovisnost o distributeru električne energije
- investicija smanjenog rizika
- doprinos tranziciji energetskog sustava
- javni primjer i doprinos ekološkoj samoodrživosti

Nedostatci:

- visoka cijena investicije
- mala isplativost investicije s obzirom da nema potrošnje energije vikendima
- kratak vijek trajanja baterija
- loš utjecaj baterije na distribucijsku mrežu

2.5. Kontrolirano opterećenje

Tablica 2.5. *Elementi sustava i dijagram: kontrolirano opterećenje kao kupac s vlastitom proizvodnjom*

Elementi sustava: • FN moduli • sustav za praćenje Sunca • pretvarač • baterija sa sustavom za upravljanje punjenja i pražnjenja • monitoring • sustav za upravljanje energijom • monitoring • teret
Dijagram: 

FN sustav u ovom slučaju napaja kontrolirani teret. Teret je upravljan na način da maksimalizira potrošnju električne energije generiranu iz FN sustava ili kako bi se izbjegao negativan utjecaj baterije na mrežu nakon što je u potpunosti napunjena [2]. Ako je lokalna potražnja veća nego dostupna električna energija iz FN sustava ili je baterija prazna, kontrolirano opterećenja u tom slučaju napaja se iz mreže. U slučaju kada FN sustav proizvodi više električne energije, u odnosu na potrebe napajanja upravljivog terete i punjenja baterije, višak energije napaja distributivnu mrežu.

Ovaj slučaj se koristi kada je potrebno navodnjavati poljoprivredne plantaže. Proizvedena energija preko frekventnog pretvarača napaja pumpu izmjeničnom energijom, dajući mogućnost upravljanja brzinom pumpe, kako bi optimizirali rad pumpe proširujući vrijeme rada sustava. Pa tako primjerice u ranojutarnjim satima kada je jakost Sunčevog zračenja nedovoljna za rad sustava pod punim opterećenjem, motor radi na niskim frekvencijama.

Prednosti:

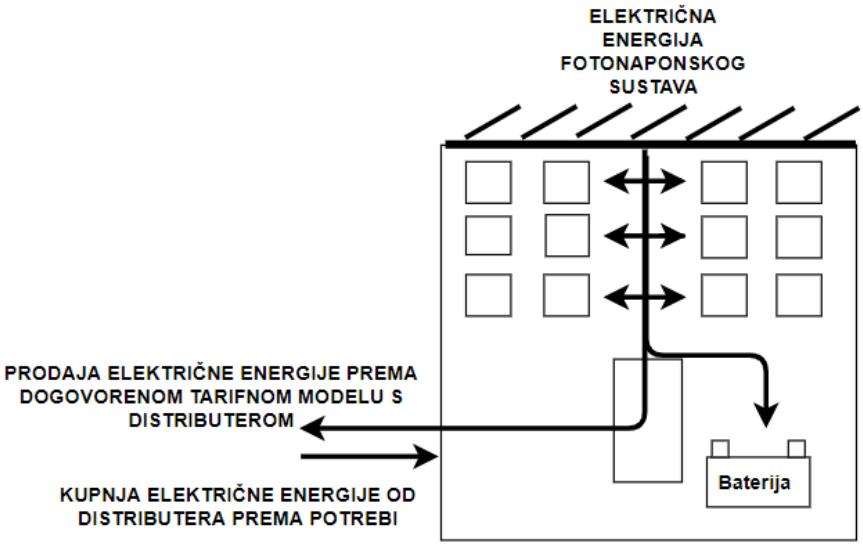
- ušteda kao posljedica smanjene potrošnje električne energije iz distribucijske mreže
- djelomična neovisnost o distribucijskom sustavu
- mogućnost rezerve
- gotovo minimalan zahtjev za održavanjem i nadzorom
- doprinos smanjenju globalnog zatopljenja

Nedostatci:

- vrlo visoka cijena investicije
- kratak vijek trajanja baterija
- loš utjecaj baterije na distribucijsku mrežu

2.6. Stambene zgrade

Tablica 2.6. *Elementi sustava i dijagram: stambena zgrada kao kupac s vlastitom proizvodnjom*

Elementi sustava: • FN moduli • sustav za praćenje Sunca • pretvarač • baterija sa sustavom za upravljanje punjenja i pražnjenja • električno vozilo (izborno) • sustav za upravljanje energijom • monitoring • teret
Dijagram: 

Električna energija koju proizvodi FN sustav napaja potrebe stanara u slučaju kada je to moguće [2]. Ako FN sustav proizvodi višak električne energije, energija se pohranjuje u baterijske spremnike, a djelomično napaja distribucijsku električnu mrežu. U slučaju kada je investitor druga osoba, stanari kupuju električnu energiju proizvedenu FN sustavima prema dogovorenoj tarifi od investitora.

Prednosti za stanare:

- ušteda kao posljedica smanjene potrošnje električne energije iz distribucijske mreže
- djelomična neovisnost o distributeru električne energije
- doprinos tranziciji energetskog sustava
- reputacijski napredak kao posljedica ulaganja u razvoj ekološke samoodrživosti
- mogućnost rezerve

Prednosti za investitora:

- unosna investicija
- doprinos ekološkoj samoodrživosti

Nedostatci:

- niska isplativost investicije
- veliki rizik za investitora s obzirom da stanari nisu primorani kupiti električnu energiju

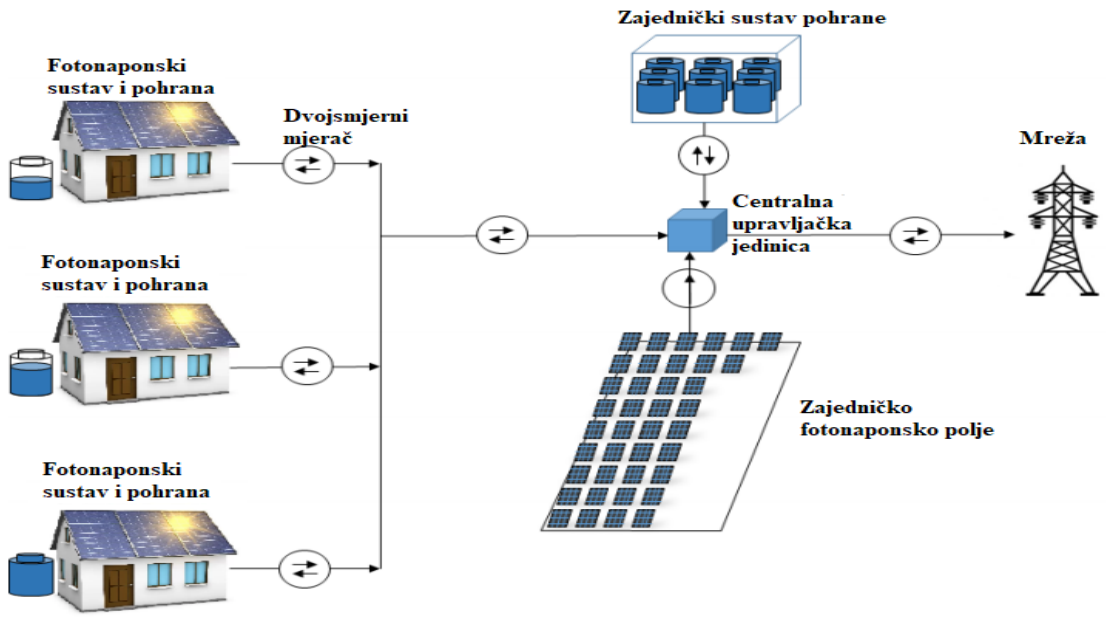
2.7. Zajednička pohrana

Tablica 2.7. *Elementi sustava i dijagram: zajednička pohrana*

Elementi sustava:

- zajednički i/ili individualni FN sustav
- pretvarač
- individualni baterijski spremnici
- zajednički baterijski spremnici
- monitoring
- sustav upravljanja energijom
- teret

Dijagram:



Kućanstva konzumiraju električnu energiju proizvedenu iz vlastitog FN sustava i/ili iz zajedničkog FN sustava kada je energija dostupna [2]. Višak električne energije koju proizvode FN sustavi sprema se u individualne baterijske spremnike ili u zajednički sustav baterijskih spremnika ili napaja distribucijsku mrežu. Ako kućanstvo ne proizvodi dovoljno energije za svoje potrebe, koristi se zajedničkim sustavom pohrane. Ukoliko je zajednički sustav pohrane prazan tada uzima potrebnu energiju iz distribucijske mreže.
Svaki FN sustav sastoji se od FN modula i njegovog pojedinačnog pretvarača kako bi se omogućila individualna potrošnja električne energije. Pretvarač zajedničkog spremnika mora biti dovoljno velike snage kako bi bio sposoban pohraniti energiju iz povezanih FN sustava. Manji baterijski spremnici mogu biti integrirani u svako kućanstvo ali to je slobodan izbor vlasnika kuće.

Potrebno je definirati model naplate za višak proizvedene električne koja se distribuira dalje u javnu mrežu. Postoji i solucija u kojoj je vlasnik zajedničkog spremnika energije treća osoba. S obzirom na više mogućih solucija, vrlo je važno izmjeriti sve tokove snaga.

Prednosti:

- ušteda kao posljedica smanjene potrošnje električne energije iz distribucijske mreže
- dostupna rezerva u slučaju prekida napajanja iz distribucijske mreže
- investicija se dijeli na članove zajednice
- utjecaj na smanjenje vršne potrošnje
- doprinos tranziciji energetskog sustava
-

Nedostatci:

- regulacijske barijere zbog korištenja postojeće mrežne infrastrukture
- visoki porezi na velike FN sustave
- cijena investicije

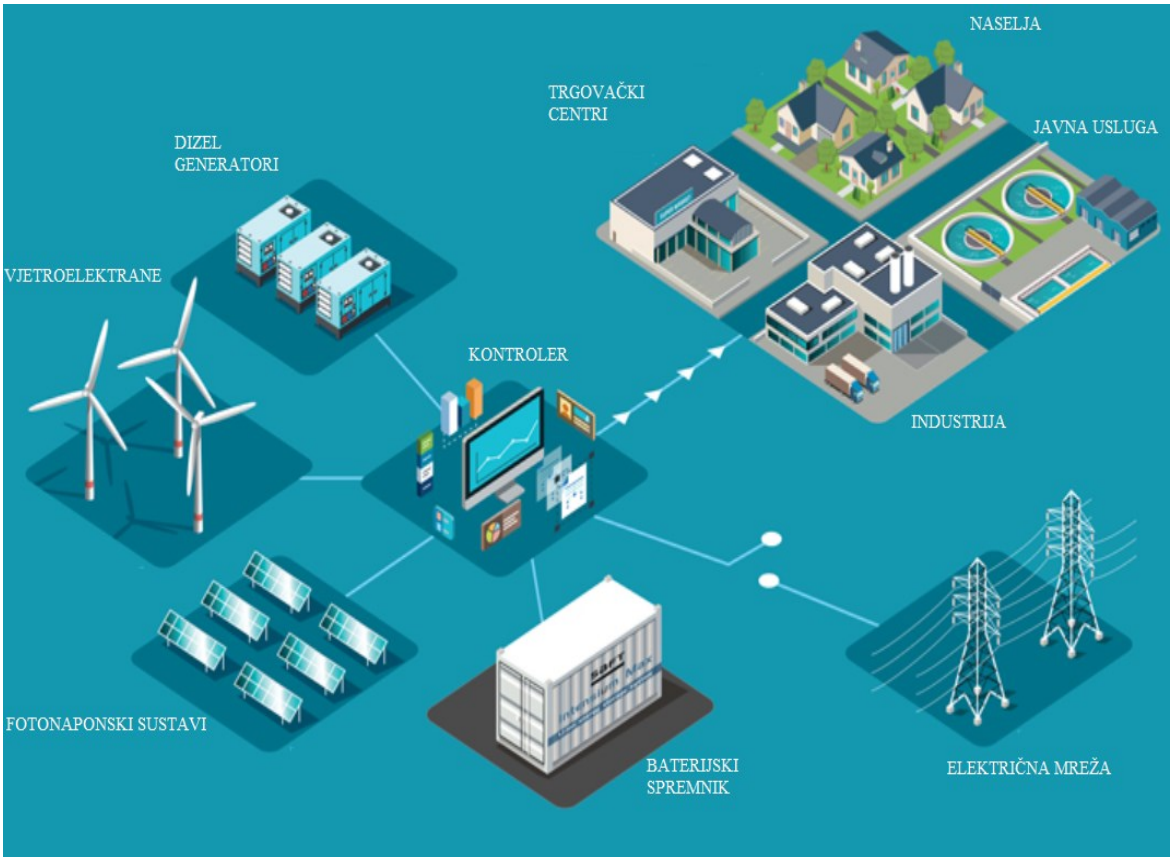
2.8. Virtualna elektrana

Tablica 2.8. *Elementi sustava i dijagram: virtualna elektrana*

Elementi sustava:

- mali i srednje veliki PV sustavi, vjetroagregati, dizel generatori…
- pretvarači
- brzo mjerenje tokova snaga na spojevima s mrežom
- kontrolni centar virtualne elektrane
- dvosmjerna brojila
- komunikacija s kontrolnim centrom virtualne elektrane

Dijagram:



Virtualna elektrana može se definirati kao informacijski i komunikacijski sustav s centraliziranom kontrolom nad distribuiranim izvorima, kontroliranim teretima i spremnicima energije [3]. Kako bi centralni kontrolni sustav imao kontrolu i monitoring nad distribuiranim izvorima pametna mjerila i kontrolni uređaji moraju biti postavljeni s potrošačke strane. Potpuna kontrola nad svim tokovima snaga i dvosmjerna brojila omogućuju transparentnost u potrošnji i prodaji energije. Tako se u slučaju virtualne elektrane električna energija FN sustava raspodjeljuje prema ugovoru koji je potpisao vlasnik FN sustava i vlasnik virtualne elektrane. Operator virtualne elektrane ima mogućnost prodavati višak proizvedene energiju na tržištu električne energije[2].

Prednosti:

- vlasnik FN sustava optimizira cijenu kupljenje energije indirektno sudjelujući na tržištu električne energije
- vlasnik virtualne elektrane profitira direktno sudjelujući na tržištu električne energije
- operator distribucijskog sustava optimizira operacije nad sustavom koristeći fleksibilnost virtualne elektrane
- integracija i upravljanje s velikim brojem distribuiranih izvora

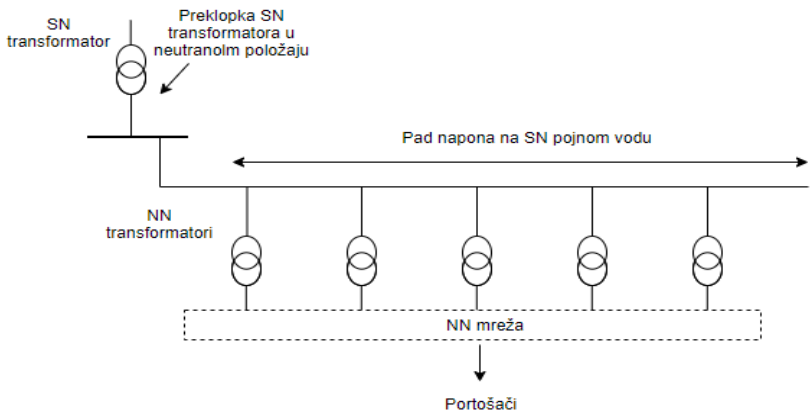
Nedostatci:

- velike udaljenosti između distribuiranih izvora, spremnika energije i tereta virtualne elektrane uzrokuju poteškoće u sinkronizaciji
- složeni algoritmi za upravljanje virtualnom elektranom
- velika cijena komunikacijskog sustava
- potencijalno kompleksni mjerni koncepti za naplaćivanje

3. INTEGRACIJA KUPCA S VLASTITOM PROIZVODNJOM

3.1. Distribucijska mreža

Velike elektrane povezane su na prijenosni sustav koji je dizajniran za prijenos energije u oba smjera. Distribucijski sustav preuzima energiju od prijenosnog, snižava je na razinu namijenjenu krajnjim potrošačima i distribuira ih k njima. Struktura distribucijskog sustava ovisila je o namjeni pa je tako dizajniran za tok energije u jednom smjeru od proizvođača do potrošača. Podijeliti se može na srednjenaponski distribucijski sustav (20kV) i niskonaponski distribucijski sustav (0.4kV). Za regulaciju napona koristi se poprečna regulacija koja se vrši na srednjenaponskim transformatorima.



Slika 3.1. *Regulacija napona na srednjenaponskom izvodu [4]*

Potrošnja aktivne i radne snage rezultirat će padom napona na srednjenaponskom izvodu koji je najniži pri minimalnoj potrošnji, a najviši pri maksimalnoj potrošnji [4].

Slično se može primijeniti i na NN distribucijske mreže. Struktura i dizajn NN distribucijske mreže potpuno su pasivni te služe isključivo za snižavanje SN razine na NN razinu. Potrošači spoj s mrežom ostvaruju preko lokalnog distribucijskog izvoda (eng. feeder) koji je spojen na NN transformator. U ruralnim naseljima duljina izvoda doseže i do 2 kilometra [5]. Lokalni izvod spaja se radijalno u odnosu na NN transformatorsku stanicu, te nema dvostrano napajanje. Najčešći problem kod ovakvih mreža je izraženiji pad napona prilikom pojave maksimalne potražnje na izvodu, koji može biti i izrazitiji s većim udaljenostima od transformatorske stanice zbog povećanog X/R omjera.

3.2. Distribuirana proizvodnja FN sustava

Pojavom FN sustava omogućeno je da distribuirana proizvodnja bude smještena u distribucijskoj mreži neposredno uz potrošača na lokalnom izvodu. U idealnom slučaju snaga koju FN sustav injektira na spoju s lokalnom mrežom može utjecati na smanjenje lokalne potražnje što smanjuje gubitke u sustavu i popravlja naponski profil [4]. Maksimum lokalne potražnje pojavljuje se u kasnim popodnevnim satima ili večernjim, kada je vrijednost Sunčevog zračenja minimalna ili je nema, dok FN sustav proizvodi maksimalnu snagu u popodnevnim satima za vrijeme najveće solarne radijacije. Problem nastaje kada je potražnja minimalna, a duž NN naponskog izvoda više FN sustava injektira snagu u lokalnu mrežu [14]. Tada vrijednost generirane snage iz FN sustava prelazi vrijednost minimalne potrošnje, tok snage mijenja smjer prema nadređenoj mreži te podiže napon na izvodu.

Stabilno, ekonomično i sigurno vođenje distribucijskog sustava, integracijom većeg broja distribuirane proizvodnje postavlja velike zahtjeve pred distribucijski sustav[6]. Potrebno je detaljno analiziranje pogonskih prilika u distribucijskom sustavu s modeliranjem statičkih i dinamičkih karakteristika distribuirane proizvodnje. Također planiranje distribucijskog sustava s uvažavanjem buduće proizvodnje i opterećenja u sustavu kao neizvjesnim varijablama. Korištenje novih metoda u vođenju i upravljanju distribuirane proizvodnje, upravljanje i kontrola nad tokovima snaga u mreži. Uvođenje komunikacijskih veza između operatora distribucijskog sustava i distribuiranih proizvodnji.

Tehničke uvjeti koje mora zadovoljiti distribuirana proizvodnja provjerava i utvrđuje operator distribucijskog sustava. U RH postoje dva dokumenta kojima su regulirani tehnički uvjeti[7]:

- Mrežna pravila elektroenergetskog sustava iz 2006. godine (točka 5.3 Priključenje na distribucijsku mrežu)
- Tehnički uvjeti za priključak malih elektrana na elektroenergetski sustav Hrvatske elektroprivrede, iz 1995. godine

Mrežnim pravilima elektroenergetskog sustava (točka 5.3.5.1., stavak 2. i 3.) regulirano je da se na NN mrežu priključuju elektrane ukupne snage do 500 kW. Priključak može biti ostvaren na NN vod ili na NN sabirnice TS 10(20)/0,4 kV. Na NN vod mogu se priključiti elektrane ukupne snage do uključujući 100 kW. Na SN mrežu (10, 20, 30, 35 kV) priključuju se elektrane

ukupne snage veće od 500 kW do najviše 10 MW, ali se mogu priključiti i elektrane manjih snaga [8].

3.3. Razina integracije distribuirane proizvodnje

Smještajem nekolicine manjih FN sustava na izvodu lokalne mreže, proizvedene injektirane snage u lokalnoj mreži mogu dovesti do prevelikih porasta napona. Kvaliteta električne energije u distribucijskoj mreži može biti ozbiljno narušena izraženijim porastom napona. Iz tog razloga potrebno je odrediti maksimalni iznos proizvedene snage, tj. razinu integracije (eng. hosting capacity) za koju kvaliteta električne energije u sustavu neće biti narušena.

3.3.1. Aktivna i radna snaga u distribucijskoj mreži

Kako bi se odredila razina integracije nužno je provesti detaljna mjerenja na izvodu distribucijske mreže (eng. feeder), gdje se integrira više FN jedinica, te poznavati uvjete u svakom čvoru. Za velike snage generirane iz FN sustava, maksimalni tok snage ostvaruje se pri maksimalnoj generaciji i minimalnoj potrošnji. Maksimalna prividna snaga za promatrani izvod vod bez distribuirane proizvodnje iznosi:

$$P_{\max} = \frac{U^2}{R} \times \delta_{\max} \tag{3.1}$$

$P_{konst,\max}$ i $Q_{konst,\max}$ su maksimalna aktivna i reaktivna snaga potrošnje. Uz pretpostavku da su varijacije u potražnji za aktivnom i reaktivnom snagom iste, maksimalna reaktivna snaga dosegnuta je kada su i aktivna i reaktivna snaga potrošnje na maksimumu. Priključenjem distribuirane proizvodnje na izvod maksimalna prividna snaga je dosegnuta kada je potrošnja minimalna, a generacija maksimalna:

$$S_{\max,2} = \sqrt{(P_{gen,\max} - P_{konst,\min})^2 + Q_{konst,\min}^2} \tag{3.2}$$

Maksimalna prividna snaga s generacijom trebala bi biti manja u odnosu na maksimalnu prividnu snagu bez generacije: $S_{\max,2} < S_{\max,1}$

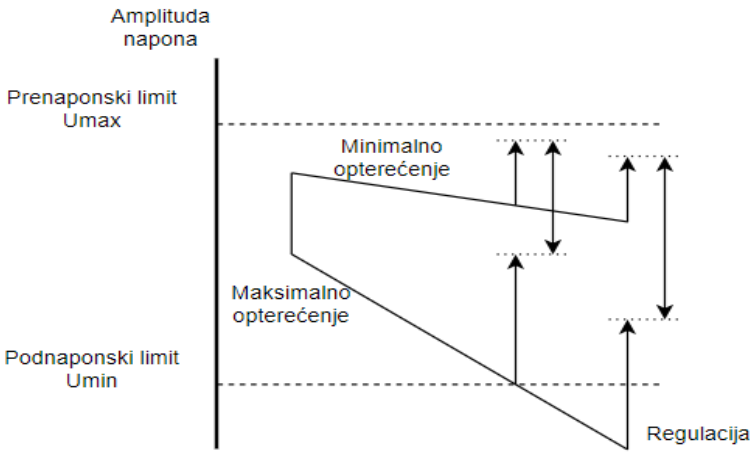
Maksimalni iznos generacije iz DP iznosi:

$$P_{gen,\max} < P_{konst,\min} + \sqrt{P_{konst,\max}{}^2 + Q_{konst,\max}{}^2 - Q_{konst,\min}{}^2} \tag{3.3}$$

Prema izrazu može se zaključiti da maksimala moguća injektirana snaga na distribucijskom izvodu mreže ovisi o minimalnoj potrošnji radne i rekativne snage. Razina integracije povećava se povećanjem potražnje za radnom i reaktivnom snagom [4].

3.3.2. Napon distribucijske mreže

Porast napona u distribuiranim mrežama bez DI bio je rijetka pojava. Povećanom integracijom distribuiranih izvora zahtijevala je određivanje prenaponskog limita. Promatrajući čvor spoja lokalnog izvoda i potrošača, razlika između najveće amplitude napona i prenaponskog limita na promatranom čvoru naziva se prenaponska margina slika 3.2.



Slika 3.2. *Prenaponska margina*

Prevelika injektirana snaga u mrežu izazvat će porast napona iznad prenaponskog limita. Razina integracije maksimalni je iznos generacije iz DI koji može biti injektiran u sustav, a da ne naruši kvalitetu napona [4]. Razina integracije uzimajući u obzir prenaponsku marginu može se izračunati preko izraza (3.1). Gdje je $\delta_{\max} = \frac{\Delta_{\max}}{U}$ omjer između apsolutne naponske margine u voltima i relativne naponske margine u postotcima. Uvrštavanjem izraza za otpor $R = \rho \frac{l}{A}$ u izraz za razinu integracije (3.1) može se zaključiti da je ovisnost maksimalne injektirane snage

na određenoj lokaciji u distribucijskoj mreži proporcionalno ovisna o kvadratu naponske razine, linearno ovisi o prenaponskoj margini i presjeku kabela, a obrnuto proporcionalno o udaljenosti između lokacije smještaja distribuiranog izvora i transformatorske stanice.

3.4. Baterijski spremnici

Spremnik električne energije u širem smislu (eng. energy storage) se definira kao element elektroenergetske mreže koji može ostvariti pomak u vremenu između proizvodnje i potrošnje električne energije (eng. energy shifting potential) [9]. Jednom pohranjenu električnu energiju (rad kao trošilo) spremnik može prema potrebi vraćati u mrežu (rad u generatorskom režimu), uz kontrolirano moduliranje pogonskih parametara (npr. napona, cosfi, frekvencije, snage) [10].

3.4.1. Uloga baterijskih spremnika

Sve većom integracijom FN sustava na lokalnom izvodu, proizvodnja se povećava te je čest slučaj da ona u popodnevnim satima postane veća od trenutne potražnje izvoda. Kako nebi došlo do prevelikog porasta napona na izvodu idealno je za mrežu pohraniti višak energije lokalno. Osim što se smanjuju gubici, pohranjena električna energija se može iskoristiti za vrijeme maksimalne potražnje kako bi se smanjila vršna potrošnja (eng. peak shawe) i rasteretio distribucijski sustav.

Baterijski spremnici se nameću kao idealno rješenje, jer pružaju veliku fleksibilnost za distribucijski sustav i ODS. Uvelike se već primjenjuju kod implementacije otočnih FN sustava, lokanih dijeljenih spremnika energije i virtualnim elektranama. Doprinose upravljanju vršnim opterećenjima , regulaciji napona, kontroli tokova snaga itd. Baterijski spremnik sastoji se od baterija, usmjerivača i sustava za upravljanje i nadzor. U odnosu na FN sustave koji spadaju u neupravljive izvore, baterijski spremnici su u potpunosti upravljivi te imaju mogućnost punjenja i pražnjenja na razinama sekunde što je idealno za smanjenje trenutnih vršnih opterećenja, kao i brzu kontrolu tokova snaga.

„Zimski paket energetskih mjera EU“ od 30.11.2016. g. predlaže razvoj tržišta električne energije na distribucijskoj razini. Takvo tržište omogućit će korištenje usluga fleksibilnosti, koje će se u velikoj mjeri oslanjati na primjenu spremnika električne energije manjih kapaciteta (cca 100 kWh) i spremnika u kućnim mikromrežama (cca 10 - 50 kWh)[10].

4. OPENDSS PROGRAMSKI ALAT ZA SIMULACIJU DISTRIBUCIJSKIH MREŽA

Integracija DI u distribucijsku mrežu izaziva velike i do sada nepoznate promjene. S ciljem razvitaka samooodrživosti i što većom integracijom distribuirane proizvodnje ERPI (eng. Electric Power Resarch Institute) je razvio programski alat za stvarno vremensku simulaciju distribuiranih mreža. OpenDSS (eng. Open Distribution System Simulator) podržava analizu svih RMS vrijednosti, kao i analizu u frekvencijskoj domeni koja se najčešće koristi u analizi i planiranju distribucijskim mrežama. Uz to podržava i mnoge nove tipove analiza koje su dizajnirane kako bi zadovoljile buduće potrebe [11]. Mnoge značajke programa namijenjene su kako bi podržale trend razvoja distribuirane proizvodnje i analizu postojećih distribucijskih mreža. Druge značajke podržavaju analizu učinkovitosti distribuiranog sustava uključujući pojedine elemente i njihovu učinkovitost, analizu harmonika, napredne mreže, planiranje distribucije itd.

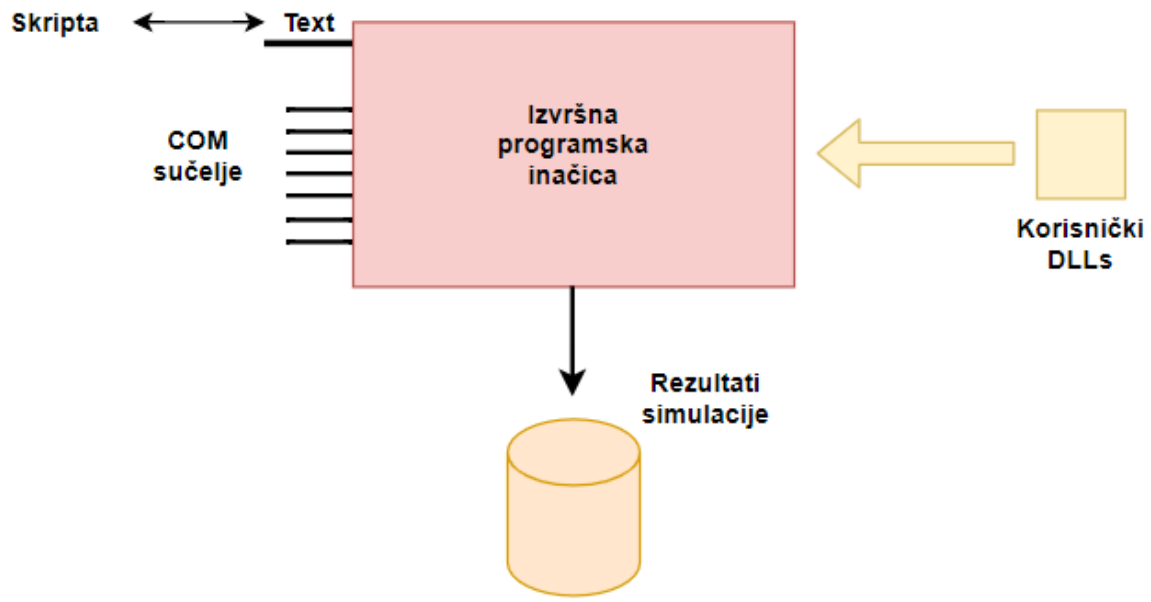
Program ima nekoliko ugrađenih solucijskih modela prema kojima vrši simulacije:

- trenutni tok snage
- dnevni tok snage
- godišnji tok snage
- duty cycle mode
- promjenjivi teret

4.1. OpenDSS struktura

OpenDSS je skriptno upravljana izvršna programska inačica. Glavna izvršna inačica može biti upravljana zasebno, preko DLL (eng. Dynamic Link Libraries) ili kroz COM sučelje (eng. Component Object Model). Kako bi se mogla upravljati kroz COM sučelje i biti konstantno nadograđivana novim modelima studija, izvršna inačica je napisana u programskom jeziku Delphi. Direktni poziv funkcijama preko DLL-a dodan je kasnije kako bi se značajke COM sučelja mogle koristiti od strane programskih jezika koji ne podržavaju COM, s obzirom da je primarno namijenjen Microsoft programskim alatima. Kroz COM sučelje korisnik je u mogućnosti dizajnirati i izvršiti svoje solucijske modele služeći se drugim programskim alatima ili skriptnim jezicima i pri tome koristiti funkcije izvršne inačice. Primjerice može biti u potpunosti upravljan preko MATLAB-a, Python-a, C#, Ruby i drugih programskih jezika što omogućuje korisnicima dodatne značajke prilikom grafičkih analiza i prikaza velike količine

podataka. Osim toga izvršnu programsku inačicu moguće je koristiti i upravljati preko tekstualnih datoteka.

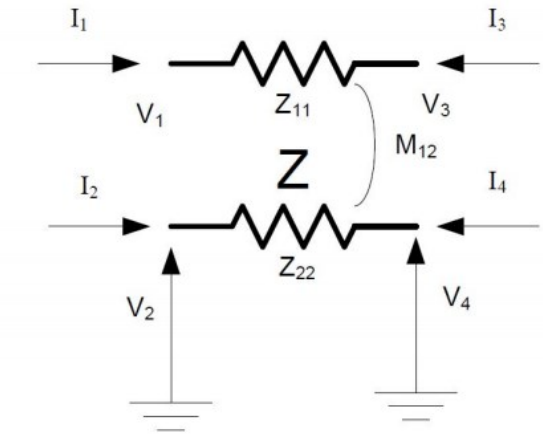


Slika 4.1. *OpenDSS struktura*

4.2. OpenDSS algoritam za tokove snaga

Algoritmi za analizu tokova snaga u distribucijskim mrežama namijenjeni su radijalnim NN izvodima, koji funkcioniraju za radijalne i slabo povezane mreže. OpenDSS je evoluirao je iz programa dizajniranog za analizu harmonika, pa s obzirom na to analizu tokova snaga vrši na nešto drugačiji način u odnosu na klasične algoritme. OpenDSS koristi primitivnu matricu admintancija u izgradnji modela distribucijske mreže. Primitivna matrica admintancija Y_{prim} računa se za svaki element kruga u modelu. Takve male matrice se zatim koriste u konstrukciji admintancije modela distribucijskog sustava Y_{sus} [11].

Izračun primitivne matrice admintancije prikazan je u sljedećem primjeru za dvije paralelne impedancije. Z je matrica 2x2 koja definira karakteristike dvije paralelne impedancije uzimajući u obzir njihovu međuinduktivnost. Kako je prikazano na slici 4.2., dvije impedancije imaju četiri čvora. Za svaki čvor impedancije moguće je raspisati jednadžbe koju predstavljaju struje i naponi (uzimajući u obzir nulti napon),.Uvrštavanje napona i struja prikazano je u jednadžbi 4.1. Primitivna admintancija Y_{prim} pridodaje se ukupnoj matrici sustava Y_{sus} te se formira nova relacija (4.2).



$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & M_{12} \\ M_{12} & Z_{22} \end{bmatrix}$$

Slika 4.2. *Formiranje matrice za dvije faze paralelnih impedancija[5]*

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z^{-1} & -Z^{-1} \\ -Z^{-1} & Z^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \tag{4.1}$$

$$I_{PC}(V) = Y_{sus} \times V \tag{4.2}$$

Struje koje injektiraju elementi transformacije u mrežnom krugu su funkcije napona i predstavljaju nelinearne struje tereta, generatora, spremnika i FN elemenata strujnog kruga. OpenDSS za iteraciju koristi metodu fiksne točke kako bi riješio nelinearnu jednadžbu (4.3) [5].

$$V_{n+1} = \left[Y_{sus}\right]^{-1} \times I_{PC}(V_n) \quad \text{n=0,1,2,3,... do konvergencije} \tag{4.3}$$

Iteracija postiže dobru konvergenciju za distribucijske sustave kada:

- je inicijalni broj pogađanja napona blizu konačnom rješenju
- je serija impedancija elementa za distribuciju energije manja u odnosu na ekvivalentni shunt impedancije elemenata za transformaciju

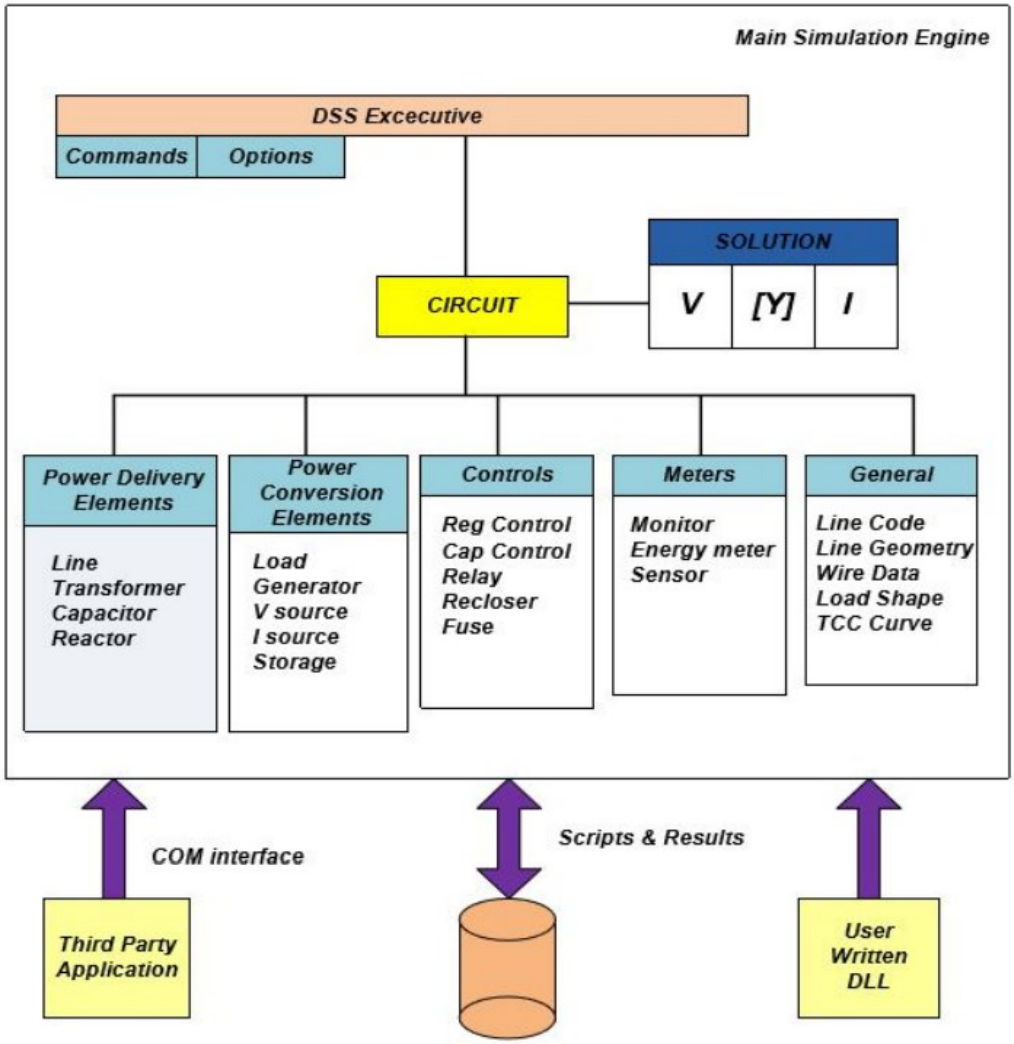
U distribucijskim sustavima prvi uvjet se lako zadovoljava. Za vrijeme sekvencijalne analize tokova snaga, naponi iz prethodnih rješenja uzimaju se kao početne vrijednosne točke što smanjuje vrijeme konvergencije [5]. Kako bi se zadovoljio drugi uvjet, naponski limit je zadržan ispod razine pri kojoj element transformacije zadržava linearan model.

4.3. Elementi distribucijskog sustava u OpenDSS-u

Komponente distribucijskog sustava podijeljene su u pet objektnih klasa u OpenDSS-u [5].

- Elementi za distribuciju: vodovi, kabeli, transformatori, kondenzatori, prigušnice
- Elementi za transformaciju: teret, generator, izvor napona, izvor struje, spremnik, FN sustav
- Upravljanje: regulacija, upravljanje elementima, releji, osigurači, prekidači
- Mjerenje: monitor, mjerač energije, senzor
- Općenito: definiranje konfiguracije vodova/kabela, krivulje tereta, krivulje temperature, krivulje jakosti Sunčevog zračenja itd.

Svaki element može se definirati služeći se konstruktorom novog objekta. Novo definirani objekti se pozivaju s početnom riječju *New*. Za svaki konstruktor definirane su veličine, odnosno svojstva koja je potrebno predati pri pozivanju novog objekta. Dokumentacija za korištenje OpenDSS, napisane je u obliku priručnika, te su svi objekti sustava i njihova svojstva detaljno opisani [11]. Dokumentacija za FN sustav kao i baterijski spremnik može se preuzeti na službenoj stranici. Nakon definicije modela preko objekata, OpenDSS formira novi sustav te prema njemu vrši simulacije. Dijagramom na slici 4.3. prikazana je arhitektura i princip rada OpenDSS-a.



Slika 4.3. *OpenDSS arhitektura [5]*

4.4. Definiranje distribucijskog sustava u OpenDSS-u

Svaka komponenta sustava može se definirati novim objektom u glavnoj OpenDSS skripti „Master.dss“ ili preko COM sučelja koje može učitati tekstualne datoteke. Definiranje objekata u tekstualnom obliku i učitavanjem kroz COM omogućuje bolje performanse simulacije, više značajki i funkcija, te je čitavo izvođenje simulacije preglednije.

Primjer dodavanja elemenata u tekstualnom obliku preko COM sučelja prikazan je u nastavku.

OpenDSS objekt Linecode

Prije definiranja objekta voda potrebno je definirati parametre vodiča koji će se koristiti za spoj:

```
New LineCode.2c_.007 nphases=3 R1=3.97 X1=0.099 R0=3.97 X0=0.099 C1=0 C0=0 Units=km
```

- *New LineCode.* - poziva objekt L*ineC*ode,
- *2c_.007* - označava naziv definiranog vodiča,
- *R1*- otpor vodiča (Ω/km),
- *X1* - reaktancija vodiča (Ω/km),
- *R0* - nulti otpor vodiča (Ω/km),
- *C1* - kapacitet vodiča (nF/km),
- *C0* - nulti kapacitet vodiča,
- *Units* - se odnosi jedinicu duljine, duljina se definira preko Line objekta.

OpenDSS objekt Transformer

Transformator objekt definira se sljedećim parametrima

```
1  New Transformer.TR1 Buses=[SourceBus 1] Conns=[Delta Wye] kVs=[11 0.416] kVAs=[800 800] XHL=4
```

- *New Transformer.TR1* - poziva objekt „Transformer“,
- *TR1* - naziv transformatora,
- *Buses* - nazivi primarne i sekundarne sabrinice na koje se spaja transformator,
- *Conns* - označava spoj transformatora
- *kVs* - su nazivni naponi primara i sekundara,
- *kVAs* - snaga transformatora, *XHL* reaktancija u postotcima.

OpenDSS objekt Line

```
1  New Line.LINE1 Bus1=1 Bus2=2 phases=3 Linecode=4c_70 Length=1.098 Units=m
```

- *New Line.* - Poziva objekt Line,
- *Bus1* - spoj s prvom sabirnicom,
- *Bus2* - spoj s drugom sabirnicom,
- *phases* - broj faza,
- *Linecode* - poziva prethodno definirani objekt vodiča,
- *Length* - duljina voda,
- *Units* - jedinica za duljinu voda

OpenDSS objekt LoadShape:

Pozivanjem objekta *loadshape* moguće je definirati potrošnju u svakoj minuti ili čak sekundi tokom 24 satnog perioda ili godine. OpenDSS kreira krivulju tako da mu se preda polje vrijednosti tereta u per unit vrijednosti. Polje se može definirati kao CSV datoteka ili obična tekstualna datoteka tako da se svaka vrijednost zapiše u novi red. Pozivanje objekta *loadshape*:

```
1  New Loadshape.Shape_1 npts=1440 minterval=1 mult=(file=Daily_1min_100profiles\Load_profile_1.txt)
```

- *New Loadshape.* - poziva objekt Loadshape,
- *Shape_1* - naziv krivulje,
- *npts* - broj točaka funkcije,
- *interval* - u kojem se predaju podatci (*minterval=1,* svake minute),
- *mult* - označava polje i datoteku s vrijednostima tereta za svaki interval u per unit vrijednosti tereta.

Osim što je moguće definirati krivulje tereta, postoji mogućnost definiranja krivulja učinkovitosti, temperaturnih krivulja, jakosti Sunčevog zračenja objašnjeno u poglavlju 4.5. Za iteracije od 8670 točaka program i dalje vrlo brzo izvršava simulacije, što je vrlo značajno za korisnike.

OpenDSS Master.dss skripta:

Nakon definiranja objekata potrebno je spremiti datoteku u tekstualnom obliku u istoj mapi gdje se kreira i *Master.dss* datoteka. *Master.dss* skripta piše se u OpenDSS-u. Naredbe koje se definiraju u glavnoj skripti vezane su uz definiciju parametara mreže: frekvencija, nazivni napon itd. Osim parametara mreže važno je definirati i način izvedbe simulacije prema jednom od mogućih modela. U sljedećem primjeru skripte slika 4.4. definiran jedan od testnih slučajeva koji se nalazi u instalacijskoj datoteci OpenDSS-a, pod *IEEE test cases*, koja će biti detaljno razrađena u poglavlju 5.1.

```
clear

Set DefaultBaseFrequency=50  ! for European system

New circuit.LVTest
Edit Vsource.Source BasekV=11 pu=1.05  ISC3=3000  ISC1=5
Redirect LineCode.txt
Redirect LoadShapes.txt
batchedit loadshape..* useactual=no
Redirect Lines.txt
Redirect Transformers.txt
Redirect Loads.txt
Redirect Monitors.txt


New energymeter.m1 LINE.LINE1 1

Set voltagebases=[11  .416]
Calcvoltagebases

buscoords buscoords.txt
solve

set mode=yearly number= 1440 stepsize=1m    ! one day simulation
solve

closedi     ! close demand interval files at end of run

//=====================================
/*

Show mon LINE558_VI_vs_Time
Show mon LINE825_VI_vs_Time
plot circuit Power Max=30 dots=y labels=n subs=y C1=$00FF0000

plot profile ph=all


Plot monitor object= line558_vi_vs_time channels=(1 3 5 ) bases=[240 240 240]
Plot monitor object= line825_vi_vs_time channels=(1 3 5 ) bases=[240 240 240]
*/
```

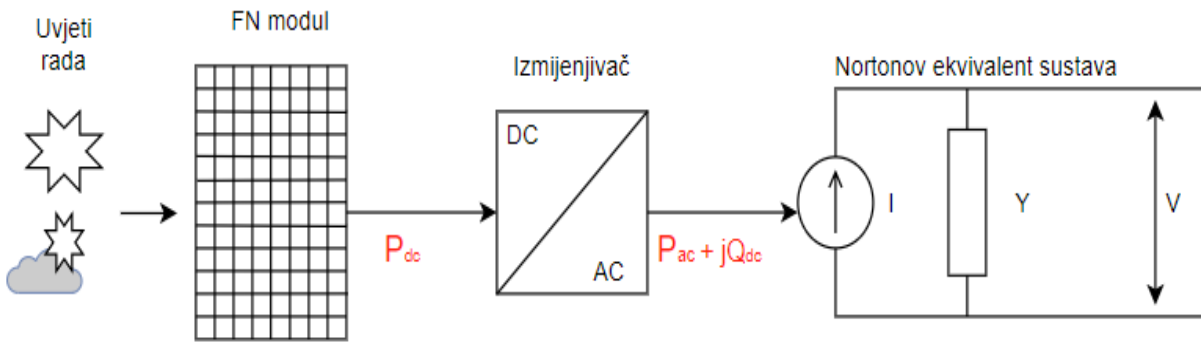
Slika 4.4. *Master.dss skripta*

Podcrtane riječi označavaju naredbe u skripti. Sve *redrirect* naredbe pozivi su prethodno definiranih objekata koji čine lokalni vod. *Set DefaultBaseFrequency* postavlja frekvenciju, *Edit Vsource.Source* pristupa objektu izvora napona i definira bazne napone, regulaciju napona, struju trofaznog kratkog spoja i struju jednofaznog kratkog spoja. Bitno je postaviti mjerač energije prije izvršavanja simulacije kako bi se izmjerili podatci. Moguće je definirati i koordinate sabirnica *buscoords.txt*, te na temelju vrijednosti OpenDSS iscrtava lokalni izvod *plot circuit Power Max=30 dots=y labels=n subs=y. Set mode=yearly* odabire model simulacije. Naredbe *plot* služe za crtanje dijagrama iz simulacijskih podataka.

4.5. Model FN sustava u OpenDSS-u

OpenDSS implementirao je FN sustav kao kombinaciju FN modula i izmjenjivača. Struktura FN sustava prikazana je na slici 4.5, te zapravo predstavlja FN sustav kao generator, tj. distributivni element[12]. Prema strukturi mogu se podijeliti konfiguracije sustava:

- Konfiguracija FN modula
- Konfiguracija izmjenjivača
- Uvjeti rada



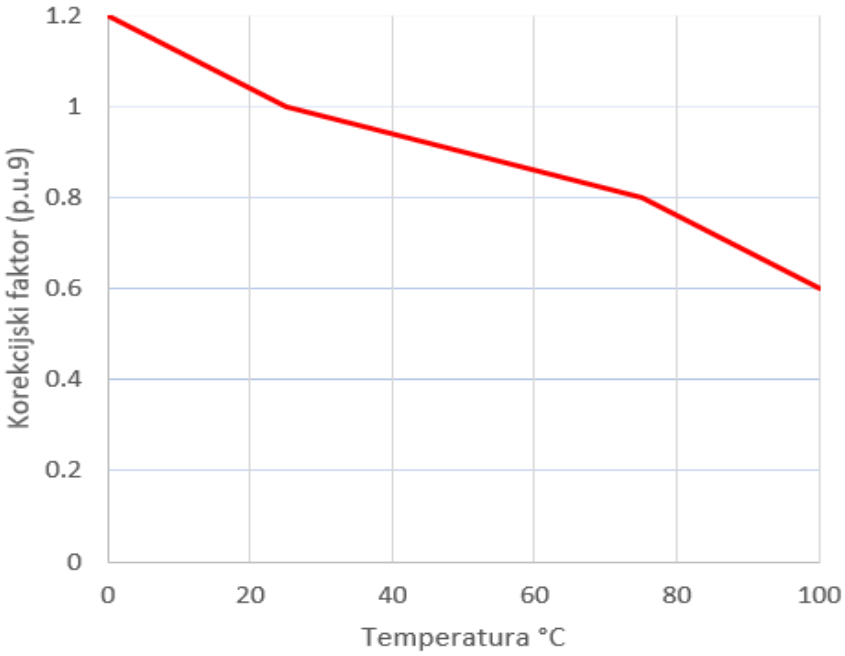
Slika 4.5. *Model FN sustava u OpenDSS-u*

Definiranje PV sustava također se sastoji od više komponenata, a svaki od njih opisan je u nastavku.

Konfiguracija FN Modula

- *Pmpp*: maksimalna snaga PV modula zapisuje se u kW, za 1kW/ m^2 Sunčevog zračenja i definirane temperature modula. Temperatura se definira pomoću temperaturne krivulje *P-TCurve*.
- *P-Tcurve:* Korekcijski faktor PV modula izražen je u per unitima Pmpp snage kao fukcija temperature modula. Na slici 4.6. prikazan je odnos korekcijskog faktora i temperature modula. Za većinu solarnih modula Pmpp iznosi 1p.u. pri temperaturi 25 °C. Kako bi se definirala krivulja temperature *P-Tcurve,* potrebno je služiti se XYCurve objektom.

```
5   New XYCurve.MyPvsT npts=4  xarray=[0  25  75  100]  yarray=[1.2 1.0 0.8  0.6]
```

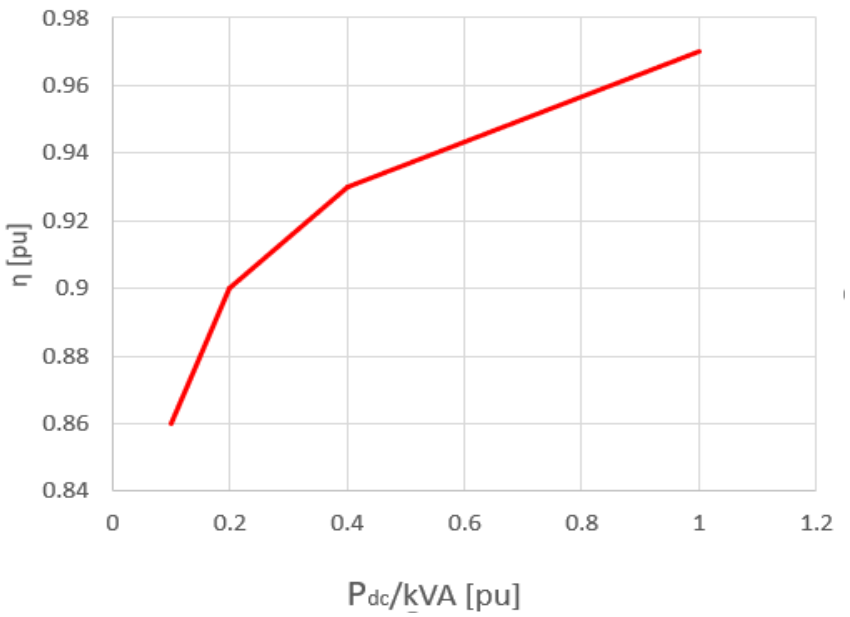


Slika 4.6. *P-Tcurve ovisnost korekcijskog faktora o temperaturi modula*

Konfiguracija izmjenjivača:

- *kVA*: nazivna snaga izmjenjivača izražena u kVA
- *kV*: nazivni napon, ako je trofazni sustav definira se linijski napon, kod jednofaznog definira se fazni napon
- *Phases*: broj faza
- *Bus1*: sabirnica na koju se spaja izmjenjivač
- *PF:* faktor snage
- Krivulja učinkovitosti *EffCurve:* Prikazuje učinkovitost izmjenjivača kao funkciju snage generirane iz PV modula slika 4.7. Definira se također preko objekta *XYCurve.*

```
New XYCurve.MyEff npts=4  xarray=[.1  .2  .4  1.0]  yarray=[.86  .9  .93  .97]
```

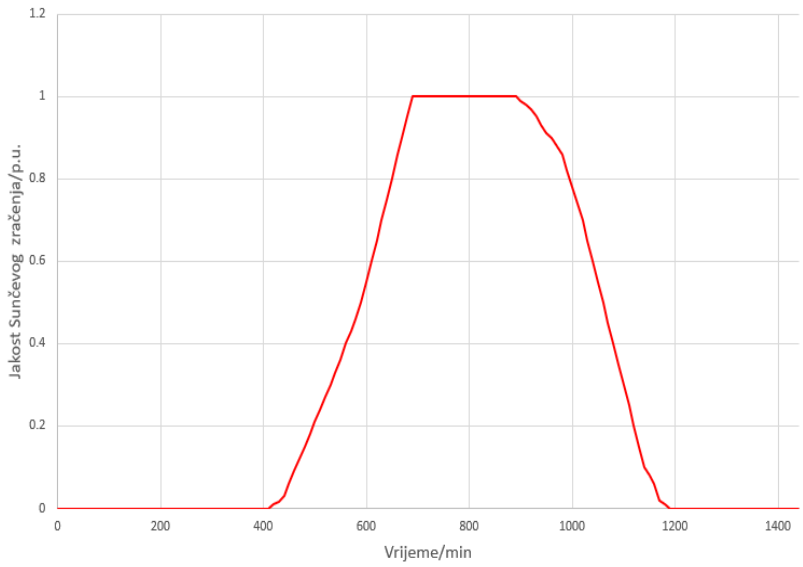


Slika 4.7. *EffCurve ovisnost učinkovitosti izmjenjivača o izlaznoj snazi FN modula*

Uvjeti rada:

- *irradinace*: nazivna vrijednost jakosti Sunčevog zračenja zračenja izražena u kW/m^2. Jakost Sunčevog zračenja može se definirati i kao krivulja pomoću objekata Loadshape, s obzirom da je varijabilna kroz dana. Vrlo korisna fukcija te je upravo namijenjena analiziranju FN sustava. Krivulja se definira u per unit vrijednosti zračenja slika 4.8.

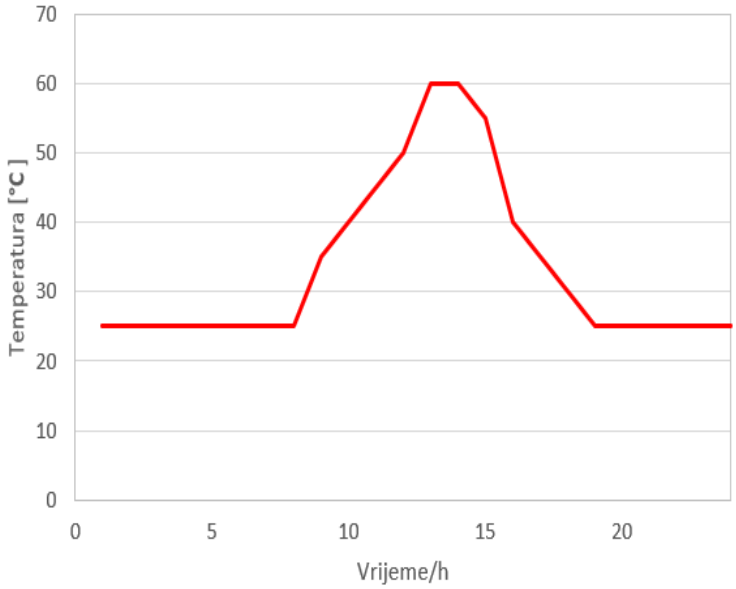
```
New Loadshape.MyIrrad npts=24 interval=1 mult=(file=MyIrrad.txt)
```



Slika 4.8. *MyIrrad Krivulja jakosti Sunčevog zračenja*

- temperatura modula također je važna jer s njenim porastom smanjuje se učinkovitost FN modula. Varijabilna je tokom dana i za vrućih ljetnih dana može dosegnuti i do 70 Temperatura se definira pomoću *Tshape* objekta. Na slici 4.9. prikazana je ovisnost temperature kao funkcija vremena.

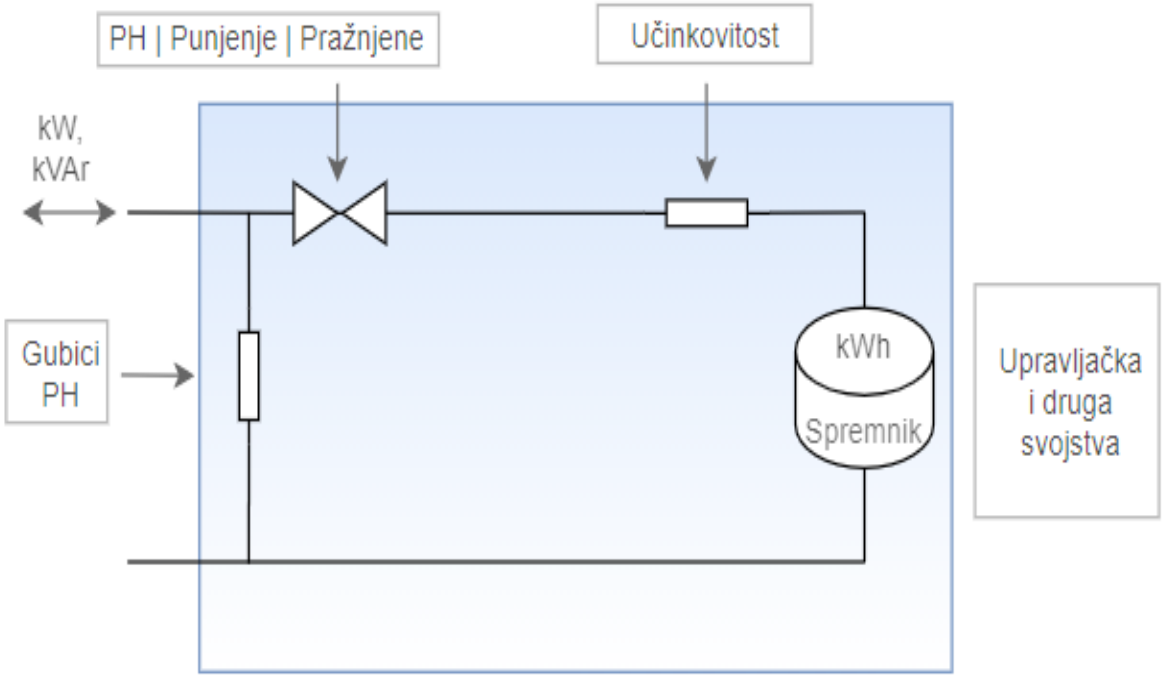
```
New Tshape.MyTemp npts=24 interval=1 temp=
~ (25, 25, 25, 25, 25, 25, 25, 25, 35, 40, 45, 50  60 60  55 40  35  30  25 25 25 25 25 25)
```



Slika 4.9. *Tshape ovisnost temperature modula o vremenu*

4.6. Model baterijskog spremnika u OpenDSS-u

Model baterijskog spremnika modeliran je prema modelu generatora, uz još neke važne dodatne značajke kako bi se što bolje modelirao stvari spremnik energije koji se koristi uz OIE. Prilikom pražnjenja element se ponaša kao generator, dok se za vrijeme punjenja ponaša kao trošilo [13]. U slučaju kada se element ne puni niti prazni, stanje rada definirano je kao prazni hod. Struktura modela prikazana je slici 4.10.



Slika 4.10. *Model baterije*

4.6.1. Element baterijskog spremnika u OpenDSS-u

Element je namijenjen za sve vrste simulacije a posebno vremenski varijabilne, kako bi se što bolje ispitao dinamički utjecaj baterijskog spremnika na distribucijski sustav. Također može se koristiti i kao spremnik jalove energije tj. generator. Gubici koji su vrlo važni za utjecaj su također uzeti u obzir, pa se tako mogu zadati gubici koje element uzrokuje u PH. Punjenja i pražnjenja spremnika mogu se odrediti na nekoliko načina. Jedan od mogućih načina je prema krivulji tereta. U nastavku je opisano definiranje baterije u OpenDSS-u i njezini parametri.

Definicija baterijskog spremnika:

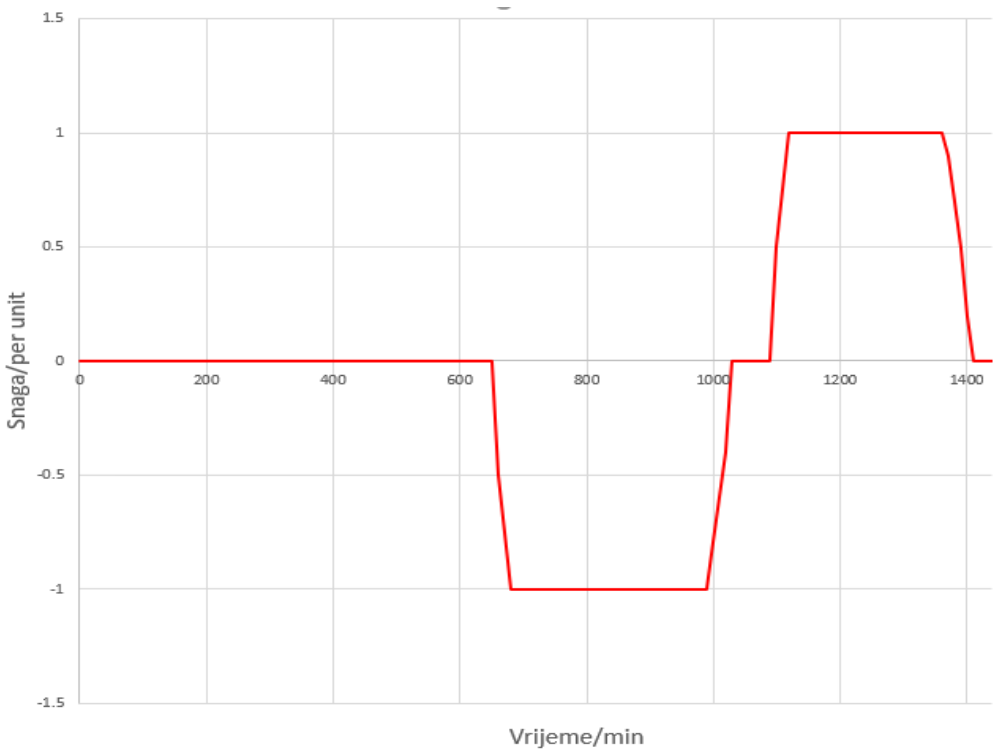
```
New Storage.BatteryPV70 phases=1 Bus1=907.1 kV=0.22 kWrated=2 kWhrated=10
~ kWhStored=5 State=IDLING dispmode=follow Daily=SC_LOADSHAPE1PH
```

Parametri baterijskog spremnika:

- *Phases* - broj faza baterijskog spremnika
- *Bus1* - broj sabrinice na koju se spaja spremnik
- *kV* – nazivni napon baterijskog spremnika izražen u kV
- *kWrated* – nazivna snaga baterijskog spremnika izražena u kW
- *kWhrated* – kapacitet baterijskog spremnika izražen u kWh

- *kWhStored* – postotak spremljene energije u kWh
- *dispmode* – definira mod pražnjenja baterije. Postoji 5 načina, u nastavku će biti korišten *Loadshape* mod.
- *daily* – parametar kojem se predaje definirana krivulja s dnevnim vrijednostima punjenja i pražnjenja baterije. Stanje baterije moguće je definirati za svaku sekundu. Sljedeći primjeri prikazuje definiranje krivulje punjenja i pražnjenja baterije, a na slici 4.11. prikazana je grafička ovisnost punjenja i pražnjenja preko opcije *plot loadshape.* Baterija radi kao spremnik za vrijeme FN proizvodnje, a prazni se u večernjim satima kada potrošnja doseže maksimume.

```
New LoadShape.SC_loadshape1ph npts=24 interval=1 mult=(file=battery_profile\battery1ph.txt)
```



Slika 4.11. *Krivulja punjenja i pražnjenja baterijskog spremnika u OpenDSS-u*

4.7. Testni NN izvod (eng. IEEE European LV test feeder)

Za analizu i planiranje distribucije aktivne mreže postaje važna dinamička analiza tokova snaga, što znači da je potrebno izmjeriti dugotrajne dinamičke promjene na raznim topologijama distribucijske mreže. IEEE (eng Institute of Electrical and Electronics engineers) prikupio je potrebne podatke i razvio prvi testni izvod prema europskim standardima (eng. IEEE European LV test feeder), koji predstavlja izvod distribucijske mreže u Velikoj Britaniji. Testni vod koncept je prema kojem se mogu vršiti analize integracije FN sustava i baterijskih spremnika kako bi se u potpunosti mogao odrediti njihov dinamički utjecaj na mrežu[5].

Konfiguraciju voda čine slijedeći podatci:

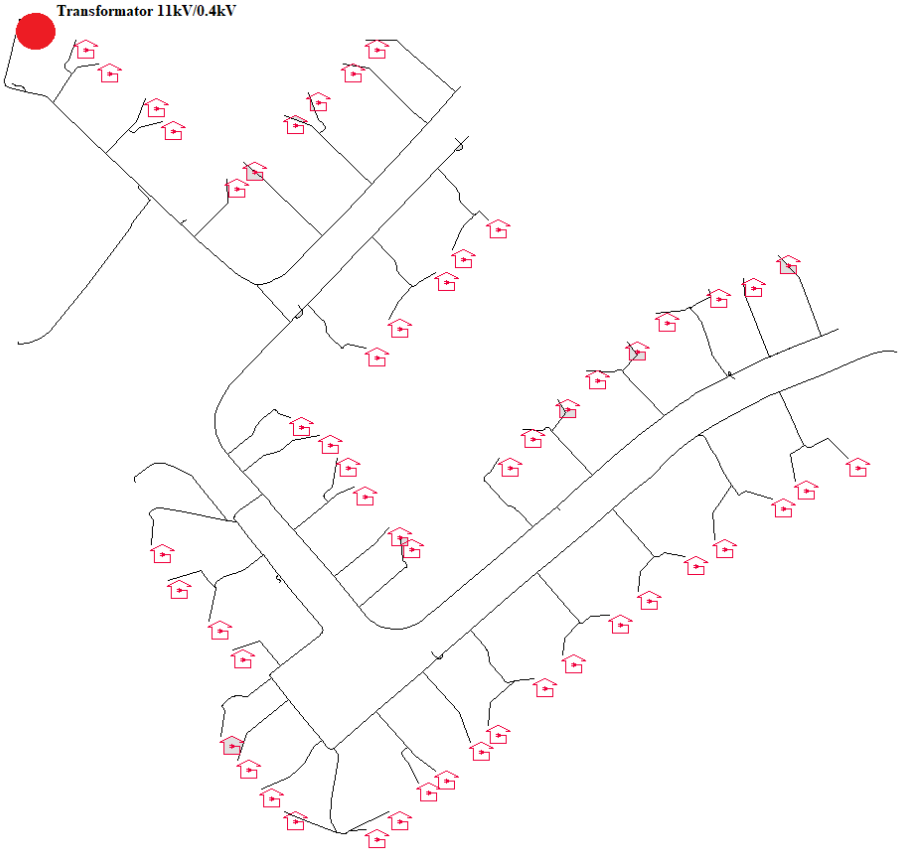
1. Linijski nazivni napon voda iznosi 416 V
2. Ukupno 55 potrošača spojeno je na izvod, te su za svaki od njih definirane karakteristike 24 satne potrošnje u intervalu od 1min
3. Frekvencija mreže iznosi 50Hz
4. Lokalni izvod spojen je na SN mrežu preko transformatora 11kV/0.4kV

OpenDSS dokumentacija sadrži IEEE testne primjere među kojima je i NN europski izvod. U datoteci *LVtestTestCase* definirani su elementi distribucijskog sustava u tekstualnim datotekama i *Master.dss*. datoteka slika 4.12. Osim toga definirane su i krivulje potrošnje za svaki od tereta. Kao što je i navedeno u poglavlju 4.3 OpenDSS učitava tekstualne datoteke preko COM sučelja, te na temelju njih modelira NN izvod.

Name	Date modified	Type	Size
Daily_1min_100profiles	8/4/2020 5:01 PM	File folder	
Buscoords	9/20/2018 2:42 AM	Text Document	24 KB
Generators	9/20/2018 2:42 AM	Text Document	1 KB
LineCode	9/20/2018 2:42 AM	Text Document	1 KB
Lines	9/20/2018 2:42 AM	Text Document	74 KB
Loads	9/20/2018 2:42 AM	Text Document	4 KB
LoadShapes	9/20/2018 2:42 AM	Text Document	7 KB
Master.dss	9/20/2018 2:42 AM	DSS File	2 KB
Monitors	9/20/2018 2:42 AM	Text Document	107 KB
Transformers	9/20/2018 2:42 AM	Text Document	1 KB

Slika 4.12. *OpenDSS NN testni izvod*

Jednodimenzionalni dijagram NN europskog testnog izvoda prikazan je na slici 4.13.



Slika 4.13. *Dijagram NN europskog testnog izvoda s ucrtanim potrošačima*

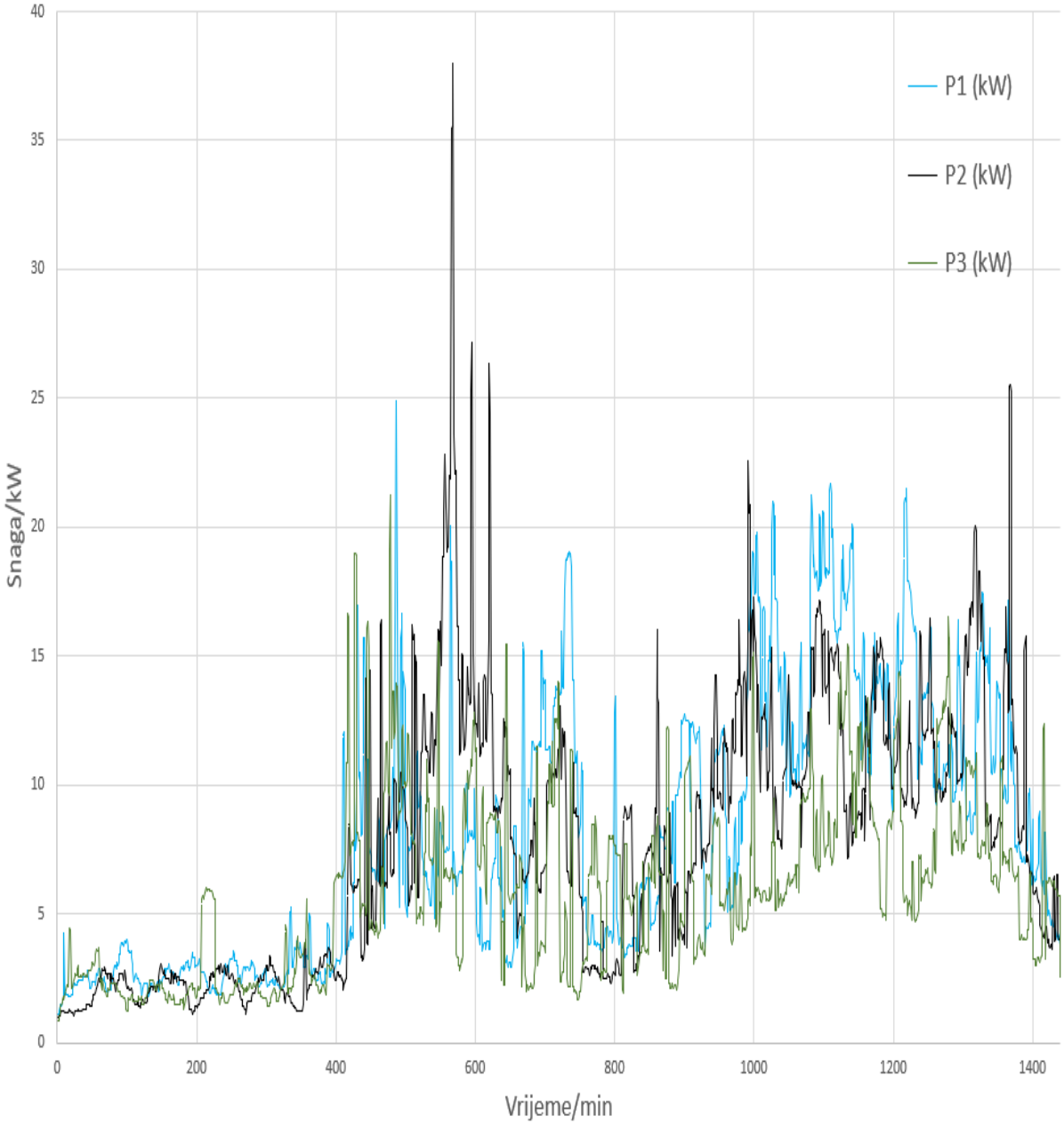
5. VREMENSKA SIMULACIJA KUPCA S VLASTITOM PROIZVODNJOM

Simulacija će se izvesti na postojećem modelu NN europskog testnog izvoda objašnjen u prethodnom poglavlju 4.7. Prije integracije FN sustava u mrežu potrebno je analizirati postojeću mrežu i lokaciju odnosno sabirnicu lokalnog izvoda na koju se spaja. Rezultati dobiveni analizom predstavljaju referentni slučaj s kojim će se usporediti rezultati analiza dobiveni integracijom kupaca s vlastitom proizvodnjom.

5.1. Referentni testni slučaj – Analiza NN EU testnog izvoda

SN sustav na koji je vod spojen nazivnog je napona $U_n = 11\ kV$, snaga trofaznog kratkog spoja iznosi $S_{k3} = 80\ MVA$, a jednofaznog $S_{k1} = 80\ MVA$. Definirani parametri postavljeni su naredbom: *Edit Vsource.Source BasekV=11 pu=1.05 MVAsc3=80 MVAsc1=80.* Proračun tokova snaga izvršava se 1440 puta, za svaku minutu koja predstavlja vremenski interval u simulaciji.

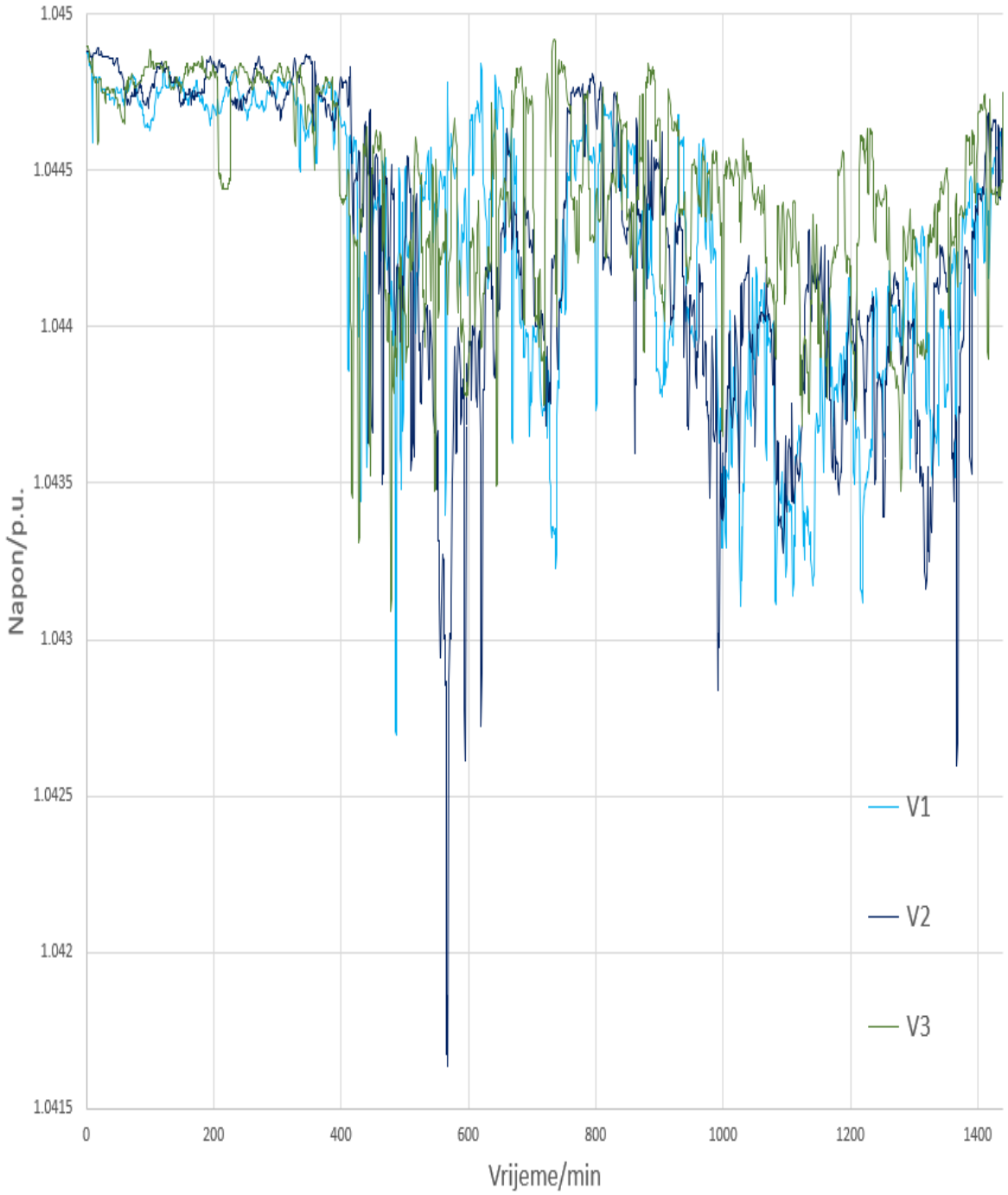
Postavljanjem *monitor* objekta na sekundarnu sabirnicu transformatora simulacijom su izračunati podatci dnevne potrošnje za svaku fazu. Prema dijagramu potrošnje slika 5.1, maksimalna potrošnja pojavljuje se u prijepodnevnim, kasnim popodnevnim i večernjim satima. Minimalan potrošnja očekivano pojavljuje se tijekom noći i u ranim popodnevnim satima. Maksimalna vršna potrošnja u jutarnjim satima najveća je za drugu fazu te iznosi 37.97 kW. Izraženiju potrošnju u jutarnjim satima lakše je prognozirati, ona je očekivana s obzirom na dnevne radne navike, aktivnost u proizvodnji i ostalim djelatnostima. Predviđanje popodnevne i večernje potrošnje puno je izraženiji problem za ODS. Sve veći broj električnih i elektroničkih uređaja, kao i električnih vozila pojavljuje se na tržištu. Njihov udio u potrošnji električne energije s obzirom na aktivnost potrošača najizraženiji je u kasnim popodnevnim i večernjim satima. Vršna potrošnja u večernjim satima doseže i preko 25 kW, također u drugoj fazi. Nesimetrija u snagama izraženija je za drugu fazu, koja je znatno opterećenija pojavom vršnih potrošnji. U popodnevnim satima za vrijeme najviše vrijednosti Sunčeva zračenja vršna potrošnja ne prelazi 15 kW, što bi moglo izazvati problem za veći broj integriranih FN sustava bez baterijske pohrane i regulacije nad tokovima snaga na lokalnom izvodu. Srednja vrijednost radne snage iznos 10,54 kW, reaktivne snage 3,46 kVar. Gubici u prijenosu radne snage iznose 0,284 kW, a reaktivne snage 0,11 kVar. Srednja vrijednost napona iznosi 1.045 p.u.



Slika 5.1. *Snage na početku izvoda*

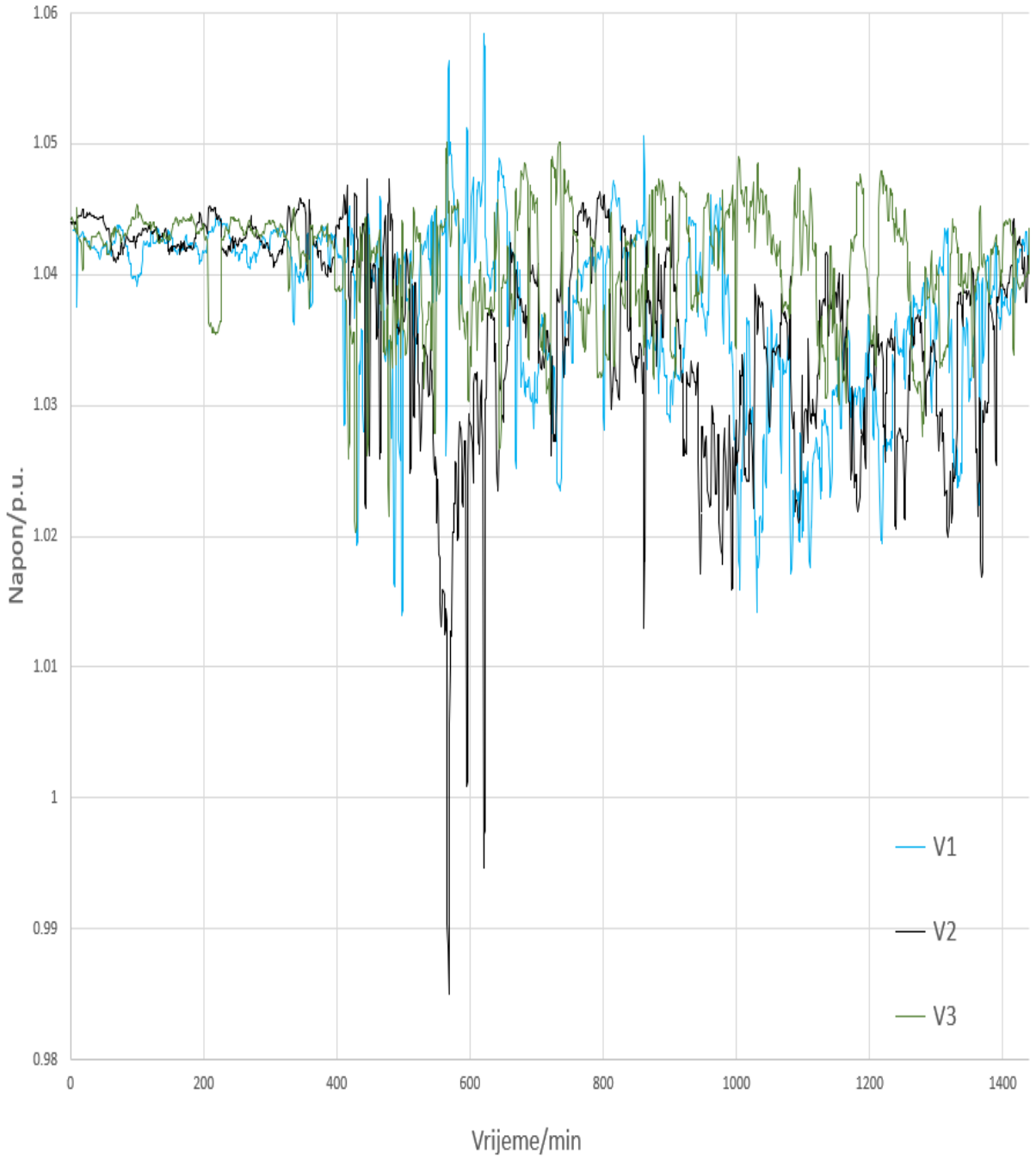
Nazivni napon mreže postavljen je na 1.05 p.u. što iznosi 241.3324 V. Fazni naponi su izračunati postavljanjem *monitor* objekta na sekundarnu sabirnicu transformatora. Dijagram s podatcima prikazan je na slici 5.2. Najveći pad napona zabilježen je za drugu fazu u jutarnjim satima. Poklapa se s vremenom maksimalne vršne potrošnje. Napon u trenutku vršne potrošnje iznosi 1.0416 p.u., što je najveći pad napona na sabirnicama transformatora. Maksimalna i minimalna vrijednost napona kreću se u vrijednostima od 1.0448 do 1.0416 p.u. Pad napona ne očituje se značajno prilikom pojava vršne potrošnje na transformatoru. Treba uzeti u obzir da je mjerenje izvršeno na početku voda. Neke sabirnice NN testnog izvoda udaljene su od

promatrane točke i preko 300 metara, te je duž njega spojeno na sve tri faze 55 potrošača koji ukoliko su aktivni uzrokuju dodatni pad napona.



Slika 5.2. *Napon na sekundarnim sabrinicama*

Prema tome postavljeni su monitor objekti na potrošačkim sabirnicama koje se nalaze pri završetku voda, te su izračunati podatci o naponu tijekom 24 sata za sve tri faze slika 5.3. Napon varira u vrijednostima od 0.9832 do 1.058 p.u., gdje minimalnu vrijednost napon doseže za vrijeme pojave maksimalne vršne potrošnje u drugoj fazi. Najveći pad napona u postotcima nazivnog iznosi 6.36%.

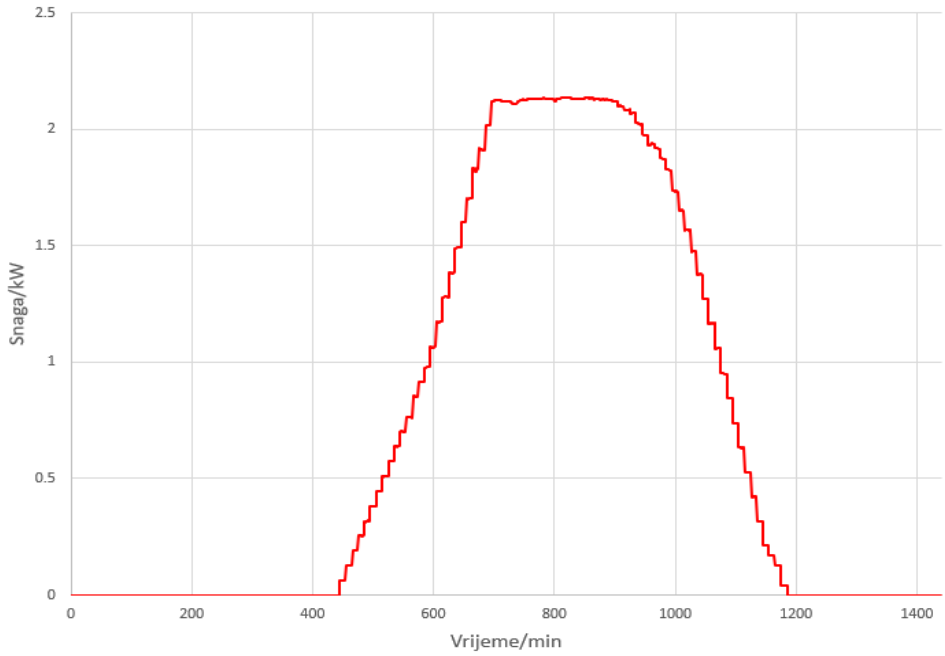


Slika 5.3. *Napon na krajevima NN testnog izvoda*

5.2. Simulacija i analiza integracije FN sustava na NN EU testnom izvodu

Simulacija integracije FN sustava u OpenDSS izvest će se na NN EU testnom izvodu. Tijekom simulacija se pojavljuje najteži slučaj za distribucijsku mrežu. Vrijednost Sunčevog zračenja tijekom dana doseže maksimume. Prethodnom analizom utvrđena je srednja potrošnja radne snage 10.5 kW što je vrlo mala snaga. Shodno tome i mogućnost integracije većih snaga na izvodu se smanjuje.

U prvom koraku potrebno je utvrditi maksimalnu snagu koju PV sustavi mogu injektirati u mrežu, a da pri tome ne dođe do obrata u tokovima snaga, te da se ne optereti transformatorska stanica na koju se spaja izvod. Prema tome podatci sa jakosti Sunčeva zračenja tijekom dana zapisani su u datoteci *MyIrrad.txt* i za svaki integrirani sustav koristit će se ista krivulja *MyIrrad* slika 4.3.5 kreirana pomoću objekta *loadshape*. Temperatura modula tijekom dana definirana je krivuljom slika 4.4.6 *Tshape* objektom. Krivulje ovisnost izlazne snage o temperaturi modula *P-TCruve* slika 4.3.4 i krivulja učinkovitosti *EffCurve* slika 4.4.4 za izmjenjivač definirane su *XYCurve* objektom te su jednake kao i definirane krivulje u poglavlju 4.3.

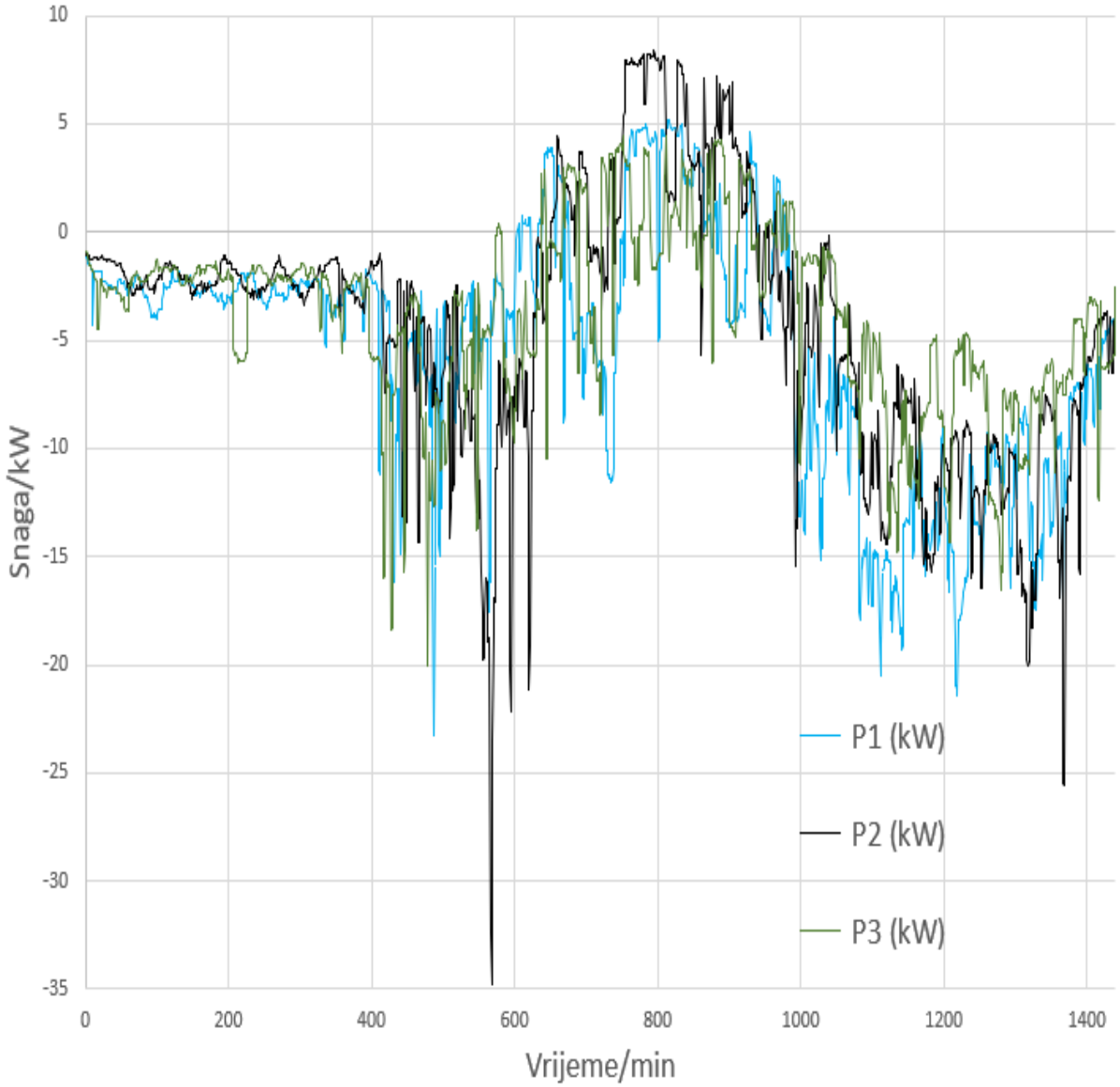


Slika 5.4. *Krivulja dnevne proizvodnje modeliranog FN sustava*

OpenDSS uzima sve definirane parametre te na temelju njih izračunava proizvedenu energiju FN sustava. Maksimalna snaga koju FN sustav instalirane snage 2 kW injektira u mrežu iznosi 1.55 kW slika 5.4.

5.2.1. Analiza rezultata simulacije I. slučaj – FN sustavi na 10% potrošačkih sabirnica

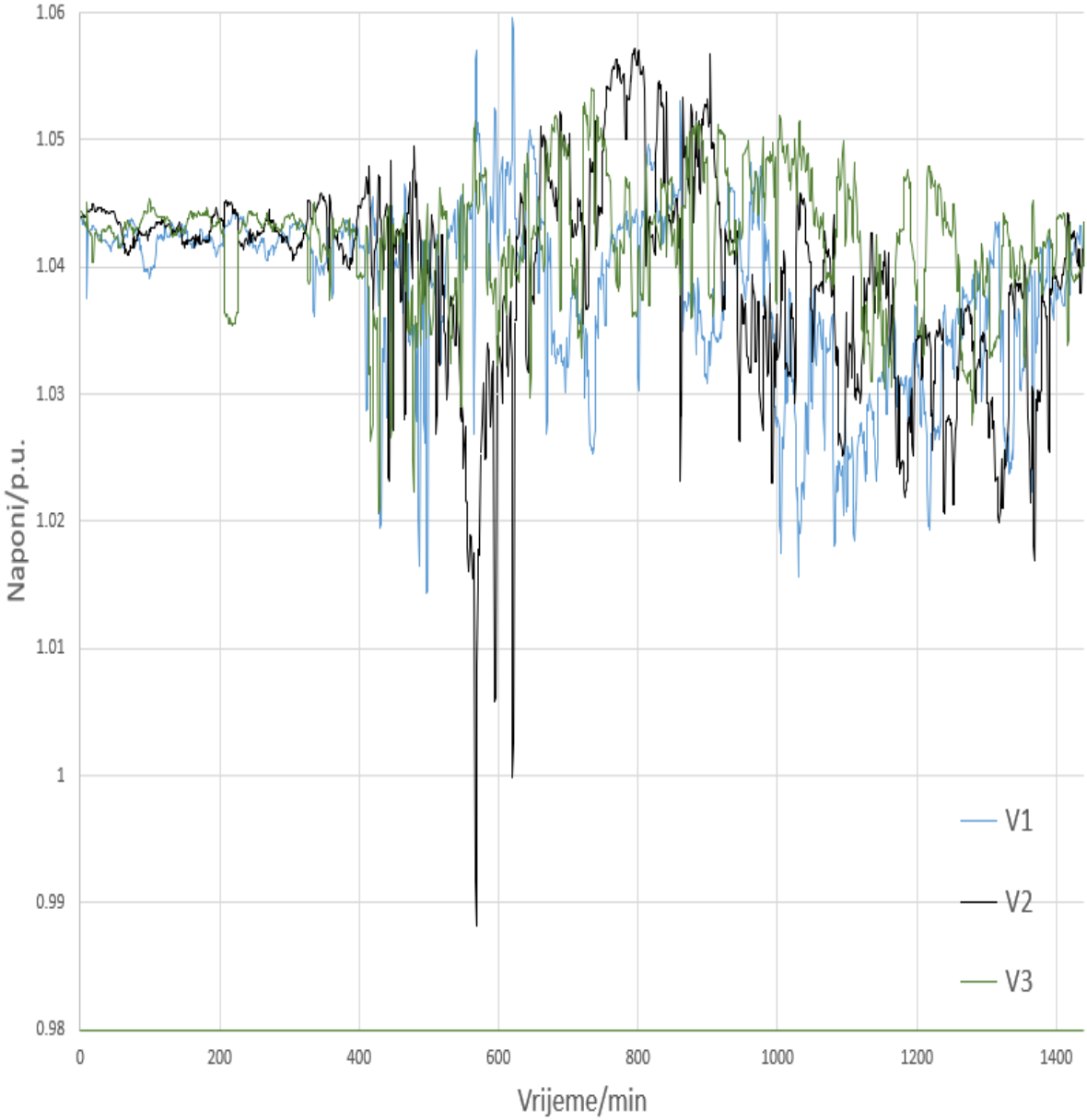
Često su vodovi na krajevima distribucijskih izvoda dimenzionirani za vrlo male snage, što odmah otklanja mogućnost postavljanja FN sustava na njihovim krajevima. Prema tome FN sustavi postaviti će se bliže transformatorskoj stanici, kako bi napajali potrošače koji su spojeni dalje niz izvod. Nadalje, zbog nesimetrije u fazama, a s ciljem postizanja što veće simetrije, FN sustavi biti će podjednako raspodijeljeni po fazama. Na potrošačke sabirnice spajat će se jednofazni FN sustavi.



Slika 5.5. *Razmjena snaga na početku izvoda*

Ukupno je integrirano 11 FN sustava, instalirana snaga iznosi 24 kW. Na potrošačke sabirnice prve faze instalirano je 8 kW. U drugoj fazi instalirano je 10 kW, a trećoj fazi 6 kW. *Monitor*

objekt postavljen je na sekundarnim sabirnicama transformatora i na krajevima izvoda. Prikupljeni su podatci proizvodnje i potrošnje, te naponske razine. Krivulja potrošnje s proizvodnjom FN sustava prikazana je na slici 5.5. Proizvodnja iz FN sustava pokriva vršnu potrošnju za vrijeme rada. No snaga koju injektiraju FN sustavi u popodnevnom periodu, prelazi potražnju. Druga faza koja je tijekom cijelog dana najopterećenija, u popodnevnim satima slabo je opterećena. Višak injektirane snage iznosi do maksimalno 5 kW, što izaziva blagi porast napona na krajevima izvoda slika 5.6.



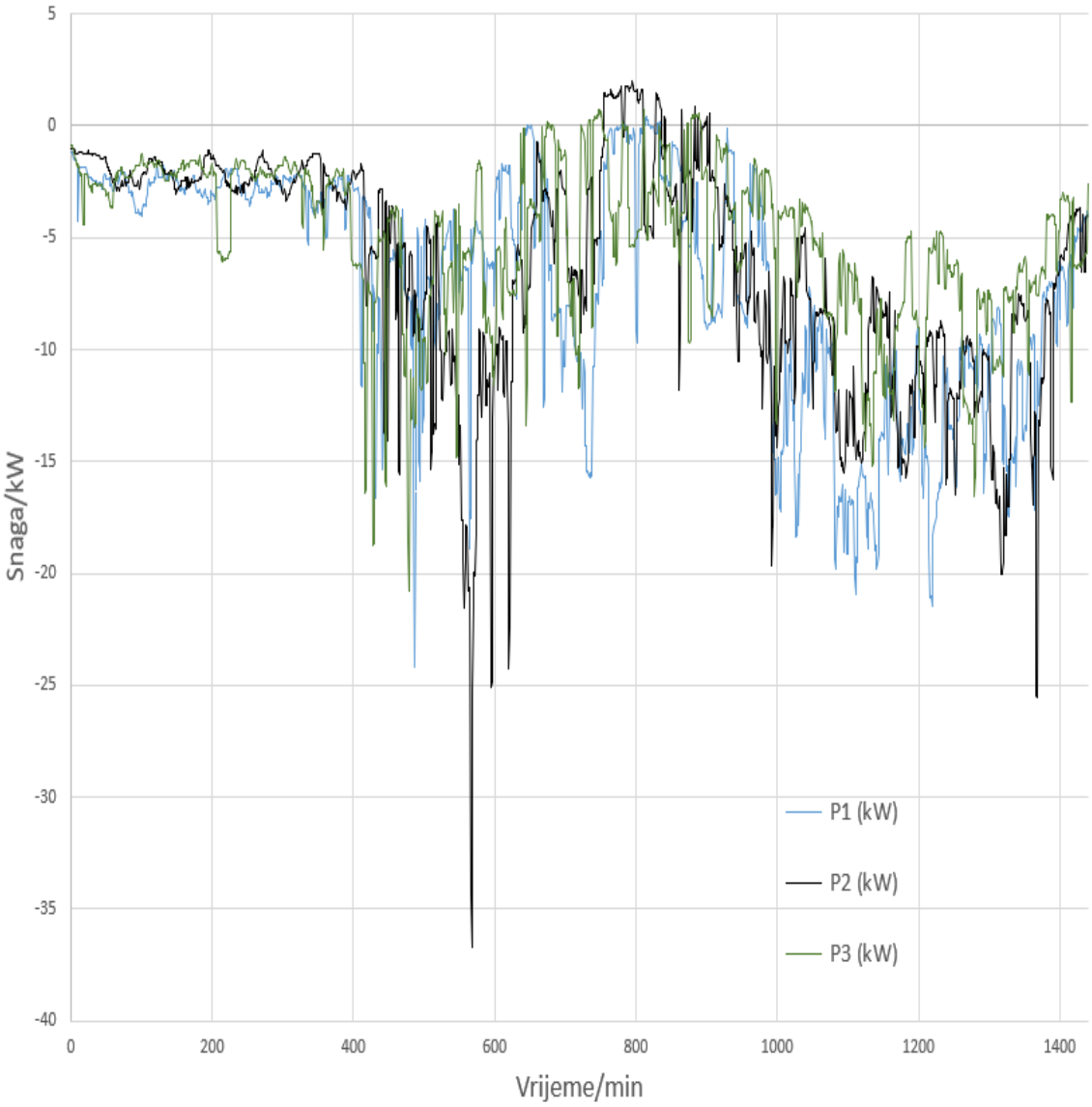
Slika 5.6. *Napon na kraju NN EU testnog izvoda*

Maksimalni porast napona zabilježen je u prvoj fazi te iznosi 1.0593 p.u. Minimalna vrijednost napona iznosi 0.9875 p.u što je u granicama prihvatljivosti. Proizvodnja energije iz FN sustava nije imala značajan utjecaj na mrežu. Vršne potrošnje i dalje su problem te su vrlo izražene u

ranijim jutarnjim satima, te kasnijim popodnevnim i večernjim. Tek je nekoliko blagih vršnih potrošnji otklonjeno proizvodnjom tijekom popodneva. Integracijom FN sustava na 10% potrošačkih sabirnica, instalirane snage 24 kW, dovela je do obrata u tokovima snaga. Pri tome je maksimalna moguća injektirana snaga FN sustava smanjena za 20%, te iznosi maksimalnih 18 kW za vrijeme najviše vrijednosti Sunčevog zračenja.

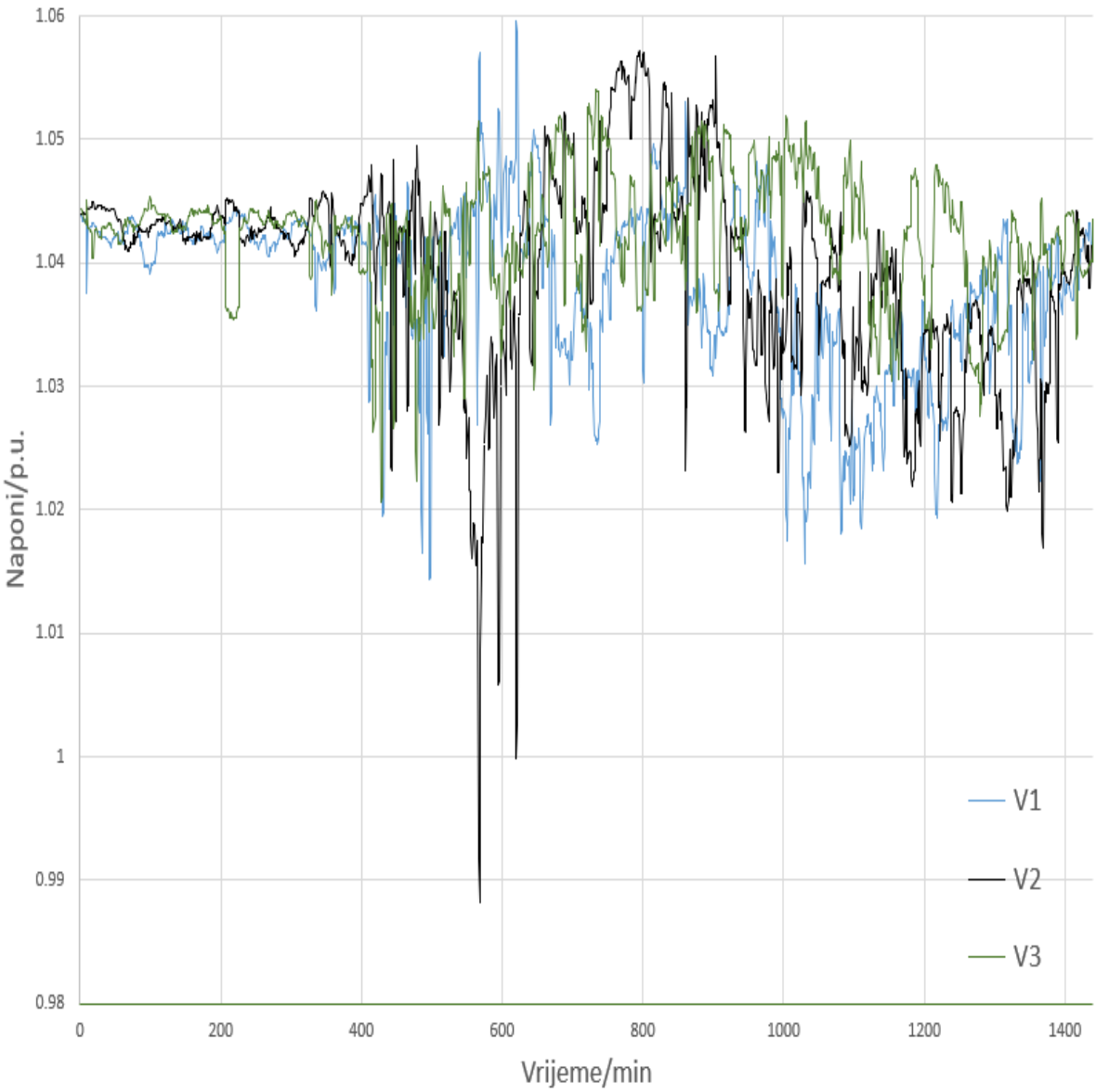
5.2.2. Analiza rezultata simulacije II. slučaj – Proizvodnja FN sustava bez uzlaznih tokova snage u nadređenu mrežu

S obzirom na to da je mreža relativno slabo opterećena teško je integrirati veće snage FN sustava, a da ne dođe do narušavanja uvjeta na lokalnom izvodu. Ukupna instalirana snaga iznosi 10 kW. Instalirana snaga prve faze je 3.5 kW, druge 4 kW i treće 2.5 kW.



Slika 5.7. *Razmjena snaga na početku izvoda*

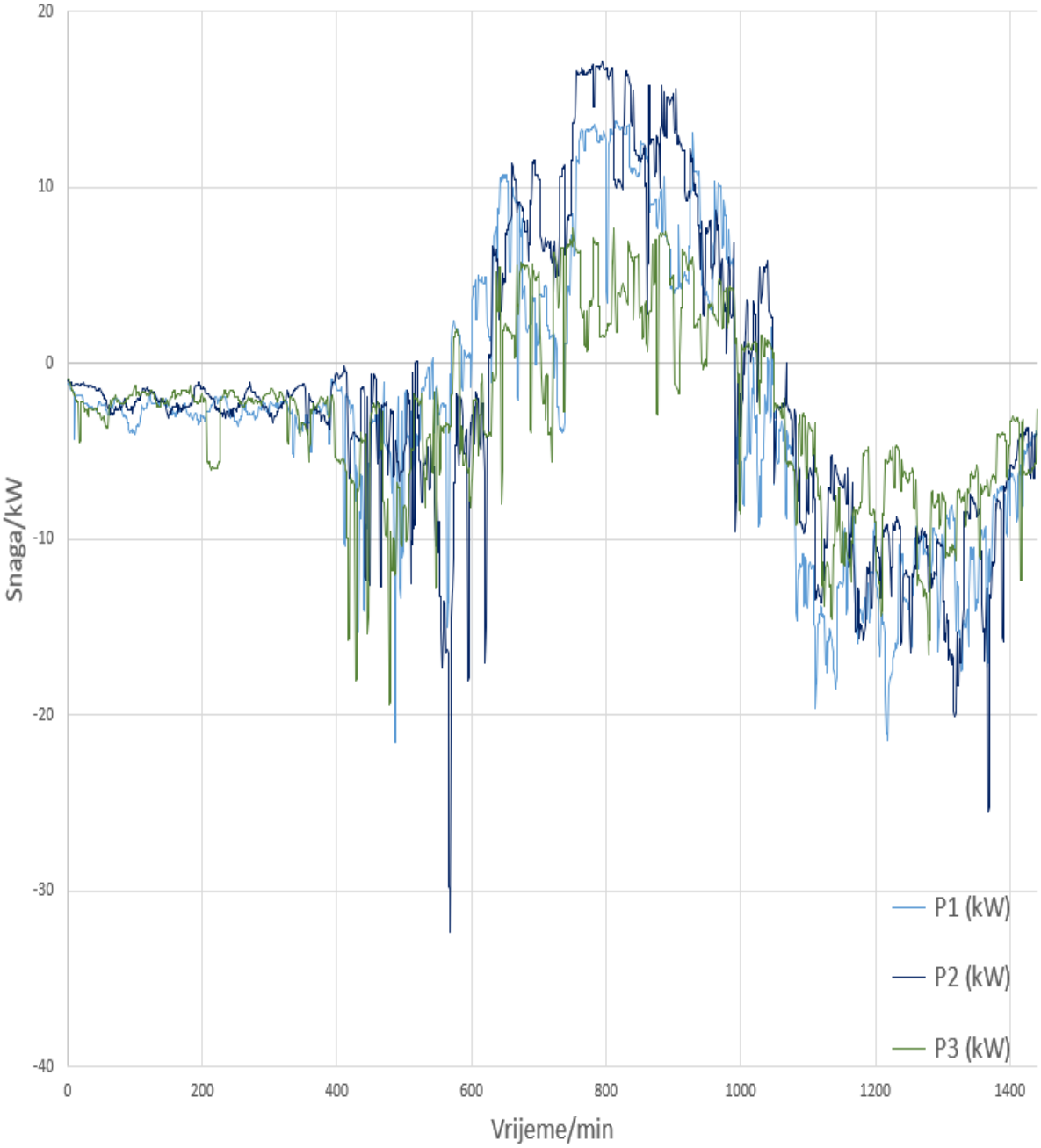
FN sustavi u mrežu injektiraju oko 7.75 kW za vrijeme najviše vrijednosti Sunčeva zračenja. Krivulja potrošnje prikazana je na slici 5.7. Ovo je granični slučaj za FN sustave, pri kojem snage ne prelaze minimalnu potrošnju i ne dolazi do promjene u tokovima snaga na izvodu. Vršne potrošnje tokom popodneva smanjene su i ne prelaze 15 kW. Naponski profil popravio se samo u kratkom popodnevnom periodu za vrijeme visoke solarne radijacije. Kao što se može vidjeti na slici 5.8., napon se kreće u granicama od 0.985 do 1.057 p.u, kao i u prethodnom slučaju. Nema značajne promjene u gubicima prijenosa snage vodom.



Slika 5.8. *Napon na kraju NN EU testnog izvoda*

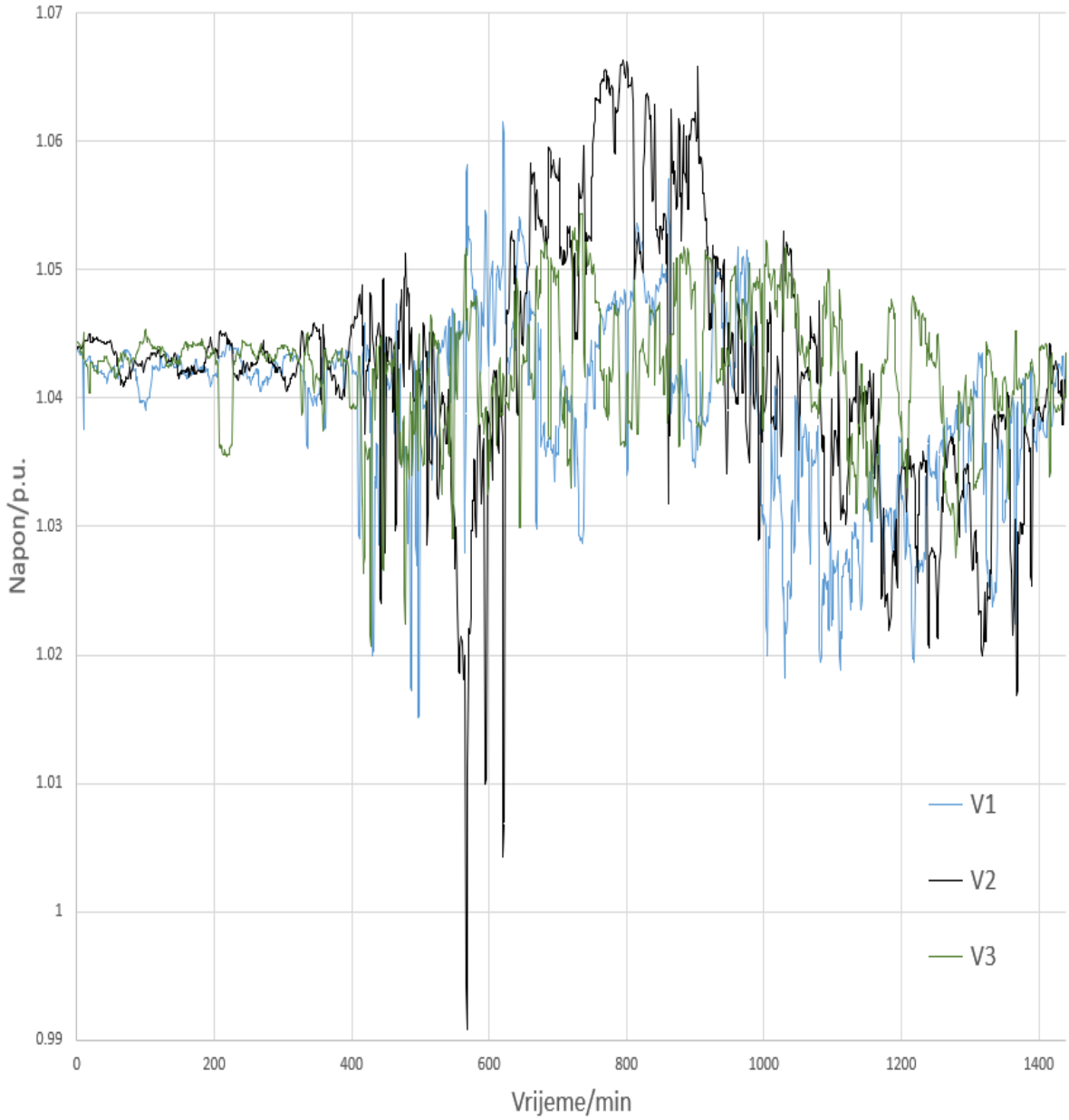
5.2.3. Analiza rezultata simulacije III. slučaj – FN sustavi većih snaga

Za slučaj simulacije većih snaga koje FN sustav injektira, integrirano je 11 FN sustava, no ovaj puta duplo veće snage u odnosu na analizu 5.9. Maksimalne snage raspoređene po fazama su sljedeće. Prva faza 16 kW, druga faza 18 kW i treća faza 9 kW. Prema dijagramu potrošnje slika 5.10. može se zaključiti kako cijeli vod između 10 i 16 sati radi kao mala elektrana, te proizvodi višak snage do maksimalnih 12 kW, koji se pojavljuju u drugoj fazi.



Slika 5.9. *Razmjena snaga na početku izvoda*

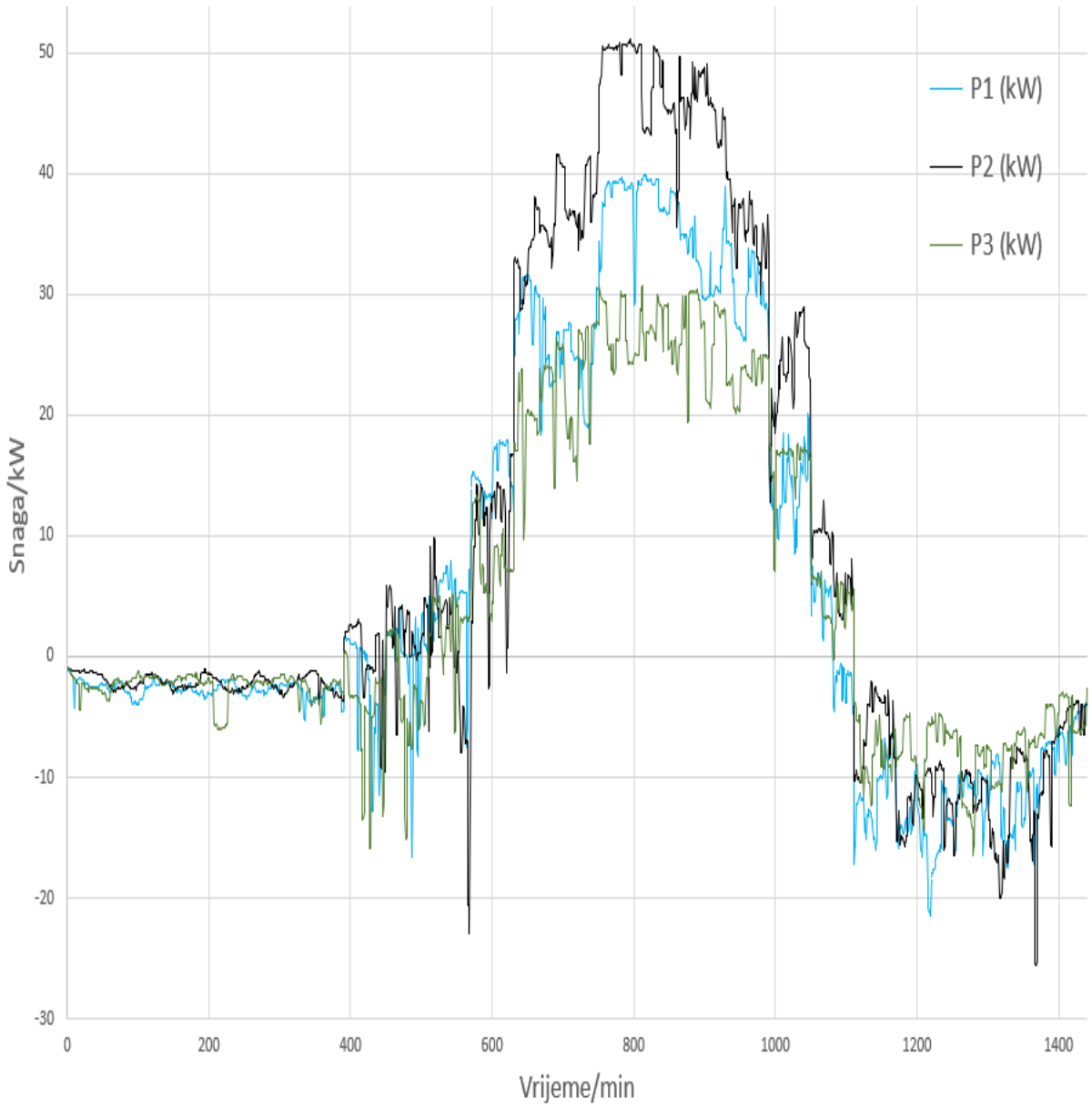
Najveća vršna opterećenja u sustavu u jutarnjim i večernjim satima nisu pokrivena, te se tijekom dana javlja velika razlika u potrošnji i proizvodnji. S obzirom na velike razlike u snagama, napon se mijenja značajnije slika 5.2.7. Naponska razina na krajevima izvoda kreće se u granicama od 0.989 do 1.0612 p.u, što je zadovoljavajuće za sustav. Problem i dalje ostaje što tradicionalni NN izvodi nemaju mogućnost toka snage u oba smjera. Kako bi se regulirali tokovi snaga, pri integriranju većih snaga nužno je postaviti baterije koje mogu smanjiti razliku u potrošnji i proizvodnji. Mogu raditi kao izvor i kao trošilo te time omogućuju balans između proizvodnje i potražnje.



Slika 5.10. *Napon na kraju NN EU testnog izvoda*

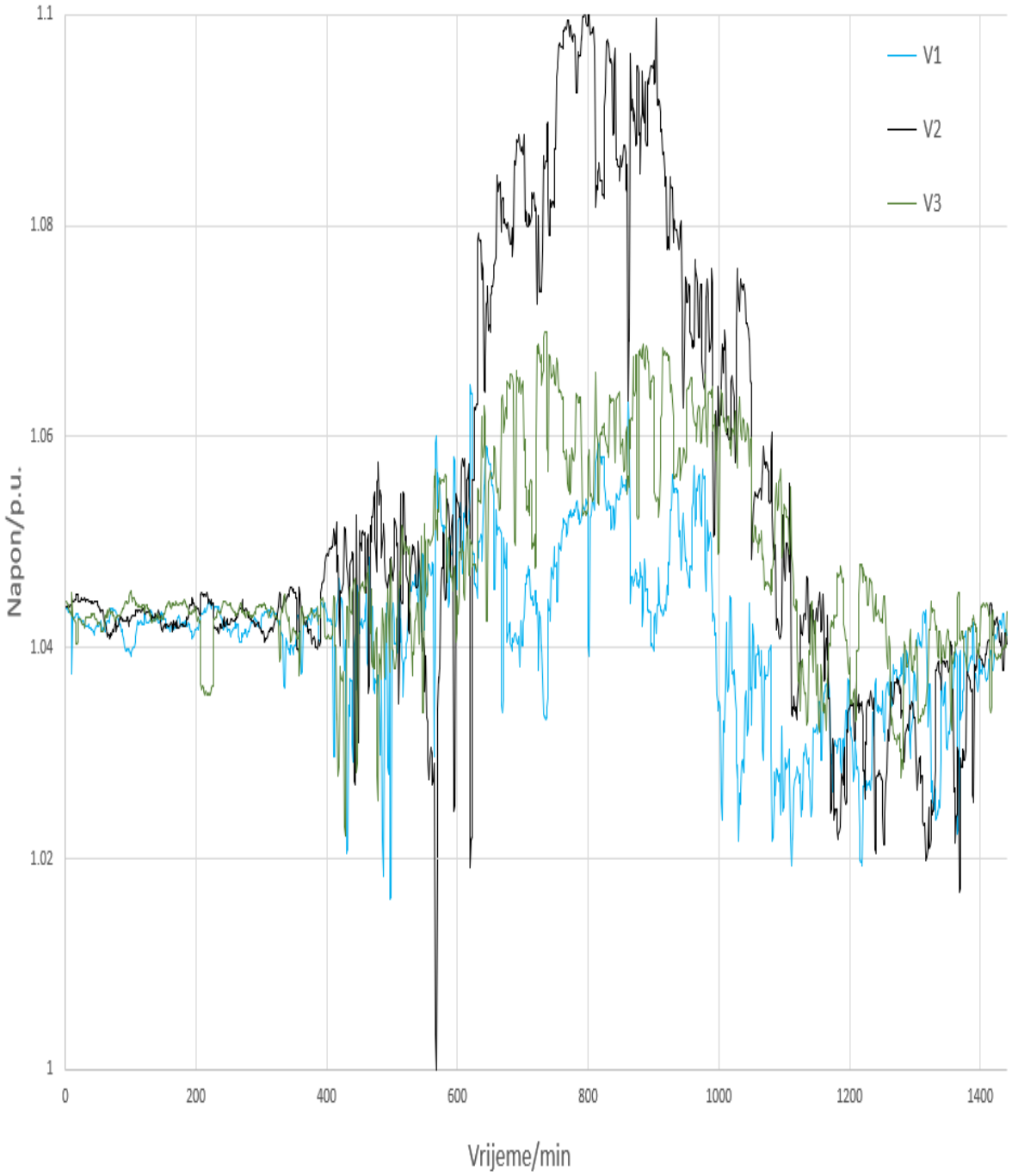
5.2.4. Analiza rezultata simulacije IV. slučaj – Narušavanje naponskog profila

Do značajnijeg porasta napona na krajevima izvoda dolazi integracijom većih snaga FN sustava. Kao posljednji granični slučaj pri integracije FN sustava uzet je nedozvoljeni porast napona. Instalirana snaga FN sustava iznosi 128 kW. Instalirana snaga u prvoj fazi iznosi 48 kW, u drugoj fazi iznosi 50 kW, a u trećoj 30 kW.



Slika 5.11. *Razmjena snaga na početku izvoda*

Snage se kreću u granicama od 22.89 kW maksimalne potrošnje do 50.68 kW proizvodnje. Pri maksimalnoj injektiranoj snazi napon iznosi 1.1 p.u. Najniži iznos napona zabilježen je za vrijeme maksimalne potrošnje, iznosi 1 p.u.



Slika 5.12. *Napon na kraju NN EU testnog izvoda*

5.3. Simulacija i analiza FN sustava s baterijskim spremnicima na NN EU testnom izvodu

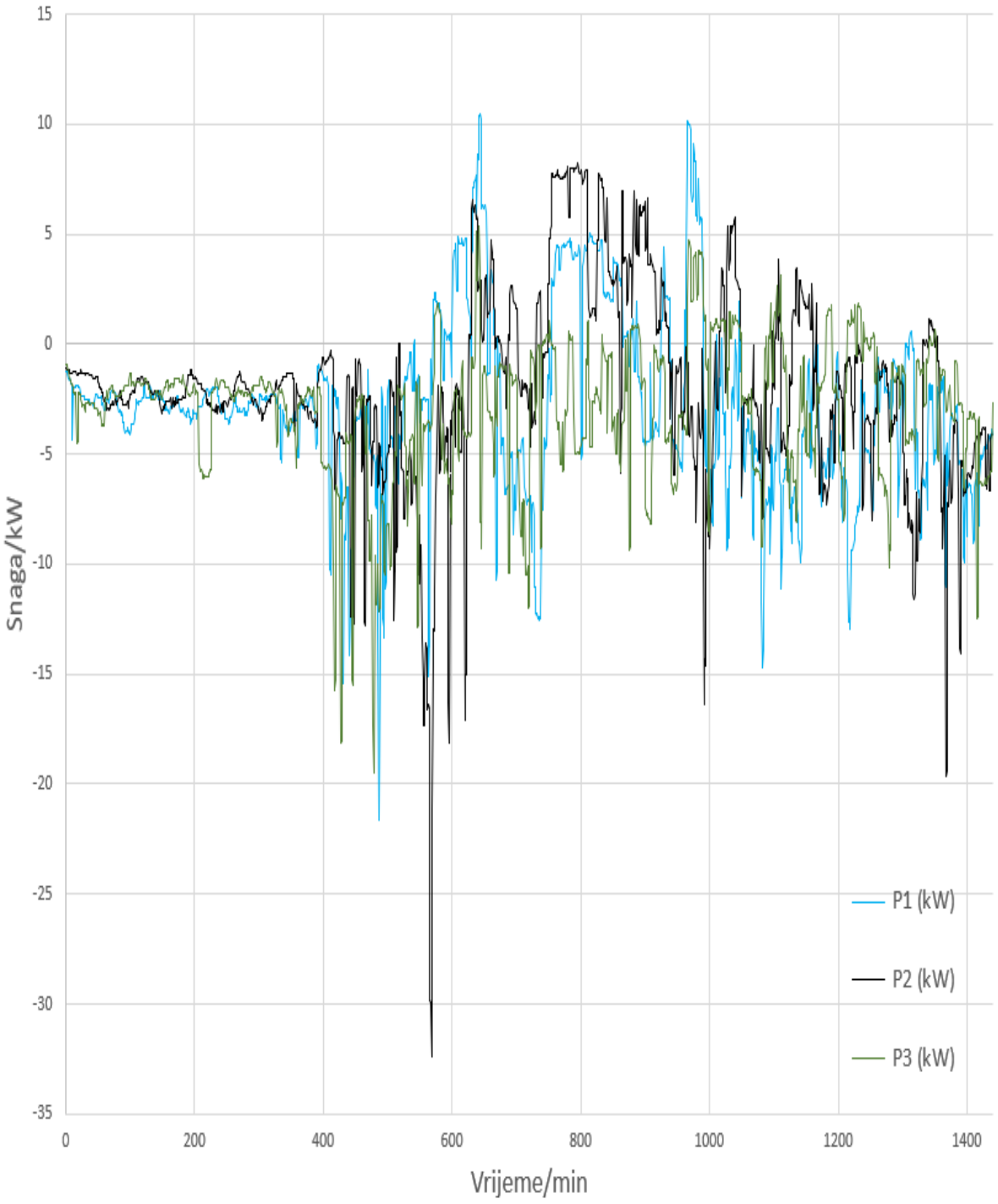
Prethodnom analizom utvrđeno je da veći broj integriranih FN sustava na lokalnom izvodu proizvodi višak energije za vrijeme najveće solarne radijacije u popodnevnim satima. Kako ne bi došlo do obrata u tokovima snaga prema transformatorskoj stanici, u sljedećoj analizi modelirat će se baterije. Baterije se spajaju na istu sabirnicu kao i FN sustavi i također su jednofazne za potrošače. Cilj je modelirati baterije tako da se pune za vrijeme najveće proizvodnje FN sustava, a prazne kada je mreža najopterećenija u večernjim satima.

Prema modelu krivulje jakosti Sunčevog zračenja *MyIrrad* slika 4.3.*5*, modelira se dio krivulje punjenja baterija. Pražnjenje se definira prema potražnji u sustavu. Kao najpogodnija solucija za pražnjenje baterije, s obzirom na predviđanje potrošnje, distribucijski sustav rasteretit će se u večernjim satima. Pomoću objekta *loadshape* kreirana je krivulja punjenja i pražnjenja baterija slika 4.6.2. Punjenje baterije započinje u popodnevnim satima, kako bi u prije podnevnim proizvodnja FN sustava pokrila vršnu potrošnju. Pražnjenje započinje u kasnim popodnevnim satima, te se prazni sve do kraja dana.

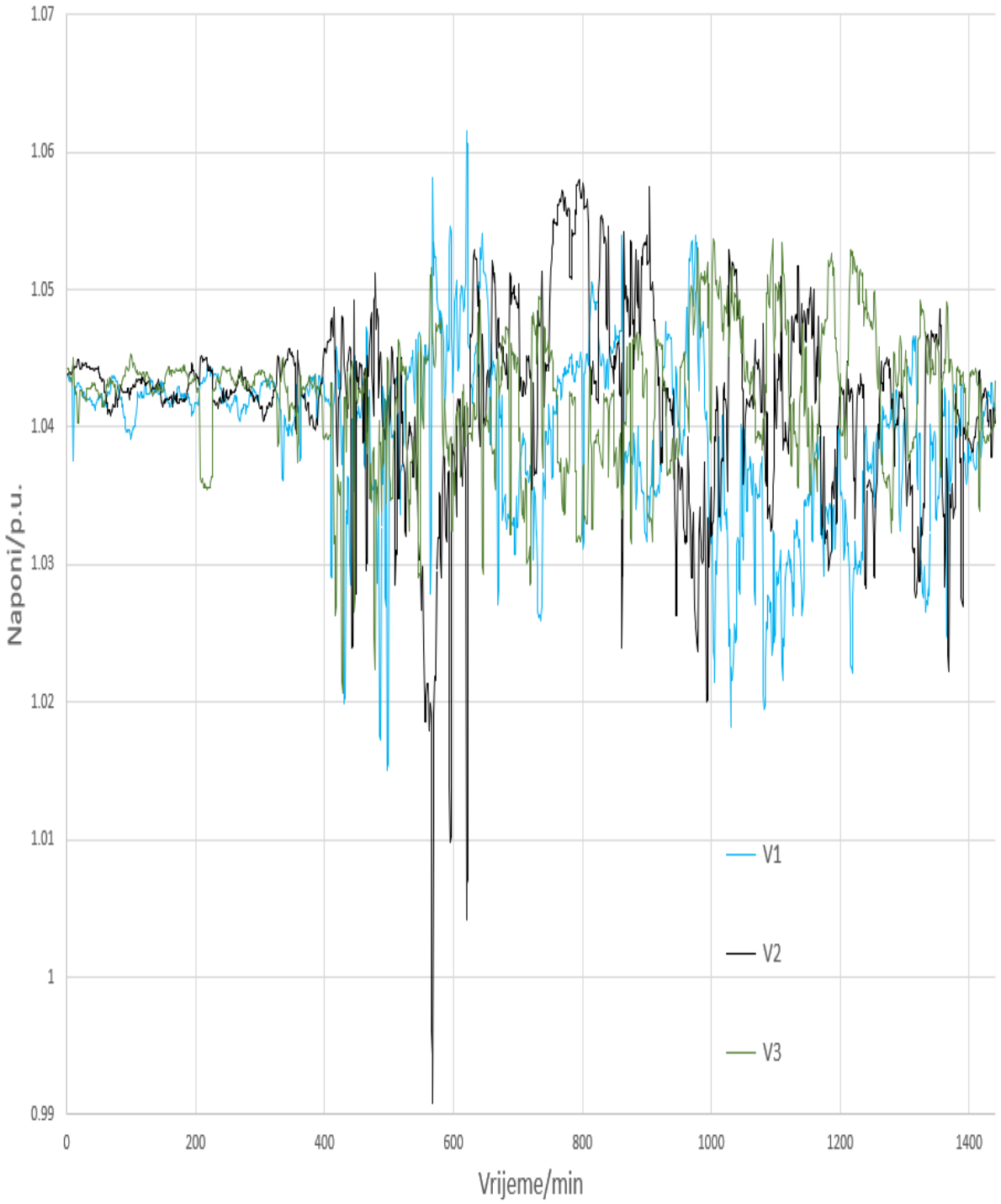
Baterijski sustavi modelirani su pomoću objekta *storage*. Instalirana snaga FN sustava raspoređena je na sve tri faze, te iznosi 43 kW. Instalirana snaga prve faze iznosi 16 kW, druge faze 18 kW i treće 9 kW. Nazivna snaga baterija iznosi 2 kW, a njihov kapacitet 15 kWh. Mjerenje i prikupljanje podataka potrošnje odnosno proizvodnje vrši se na sekundarnoj sabirnici transformatora, a napon se kontrolira na krajevima izvoda.

5.3.1. Analiza rezultata simulacije

FN sustavi rade punom snagom bez pohrane sve do popodneva, kako bi smanjili jutarnju vršnu potražnju. Prema dijagramu 5.3.1 maksimalna proizvodnja iz FN sustava pohranjena je u najkritičnijem periodu, za vrijeme maksimalne FN generacije. U fazi dva ne potpuno uspješno, s obzirom na varijacije u minimalnoj i maksimalnoj potražnji. Najveći problem ostaju vršne proizvodnje koje se javljaju prije početka punjenja baterije i završetkom punjenja baterije. Porast napona uzrokovan povećanom proizvodnjom maksimalnog je iznosa 1.0614 p.u. Potrošnja u večernjim satima smanjena je, kao i kretanje naponski granica koje su između 1.018 i 1.053 p.u.



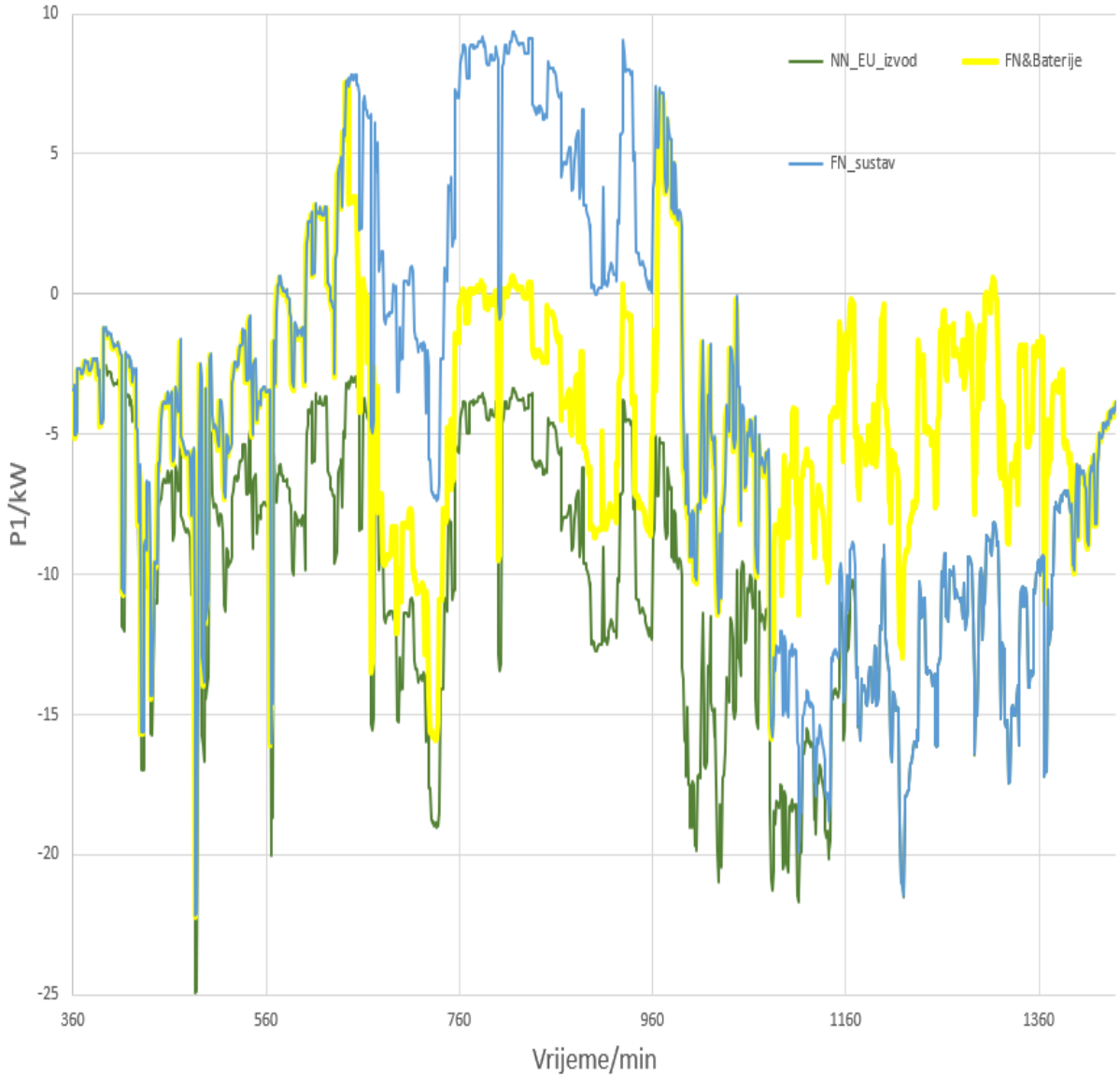
Slika 5.13. *Razmjena snaga na početku izvoda*



Slika 5.14. *Napon na kraju NN EU testnog izvoda*

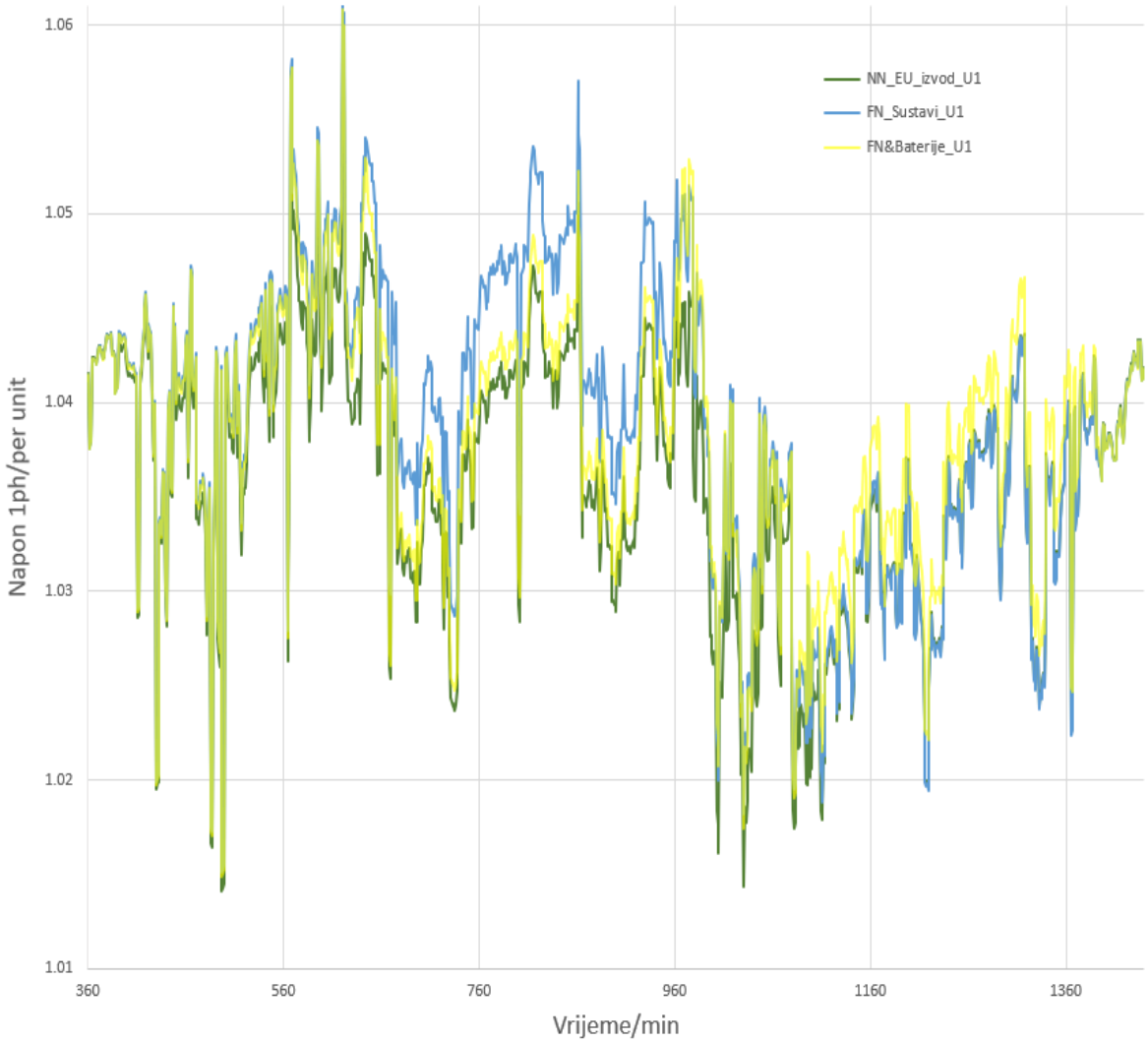
5.4. Usporedba rezultata simulacije

Analiza s baterijskim spremnicima koristila je FN sustave analizirane u poglavlju 5.2.3. Prema tome biti će uspoređeni rezultati referentnog slučaja, FN sustava i potrošnje, te FN sustava s baterijama i potrošnje. Rezultati će biti uspoređeni po fazama, a s obzirom da u noćnim satima nema utjecaja ni FN sustava niti baterijskih spremnika karakteristike se promatraju od 6-24h (360 – 1440 min). Na slici 5.15. prikazani su rezultati tokova snaga dobiveni za sve tri simulacije, na prvoj fazi. Slika 5.16. prikazuje rezultate napona na krajevima izvoda za sve tri simulacije na prvoj fazi. Tokovi snaga u periodu od 9:30 do 11:00 sati za oba slučaja prelaze vrijednost potražnje. Pojavom veće potražnje u periodu od 11:00 do 12:00 smanjuju se na prihvatljivu razinu, no potražnja je kratkotrajna, pa se u slučaju bez baterijskih spremnika, snaga iza 12:00h opet podiže.



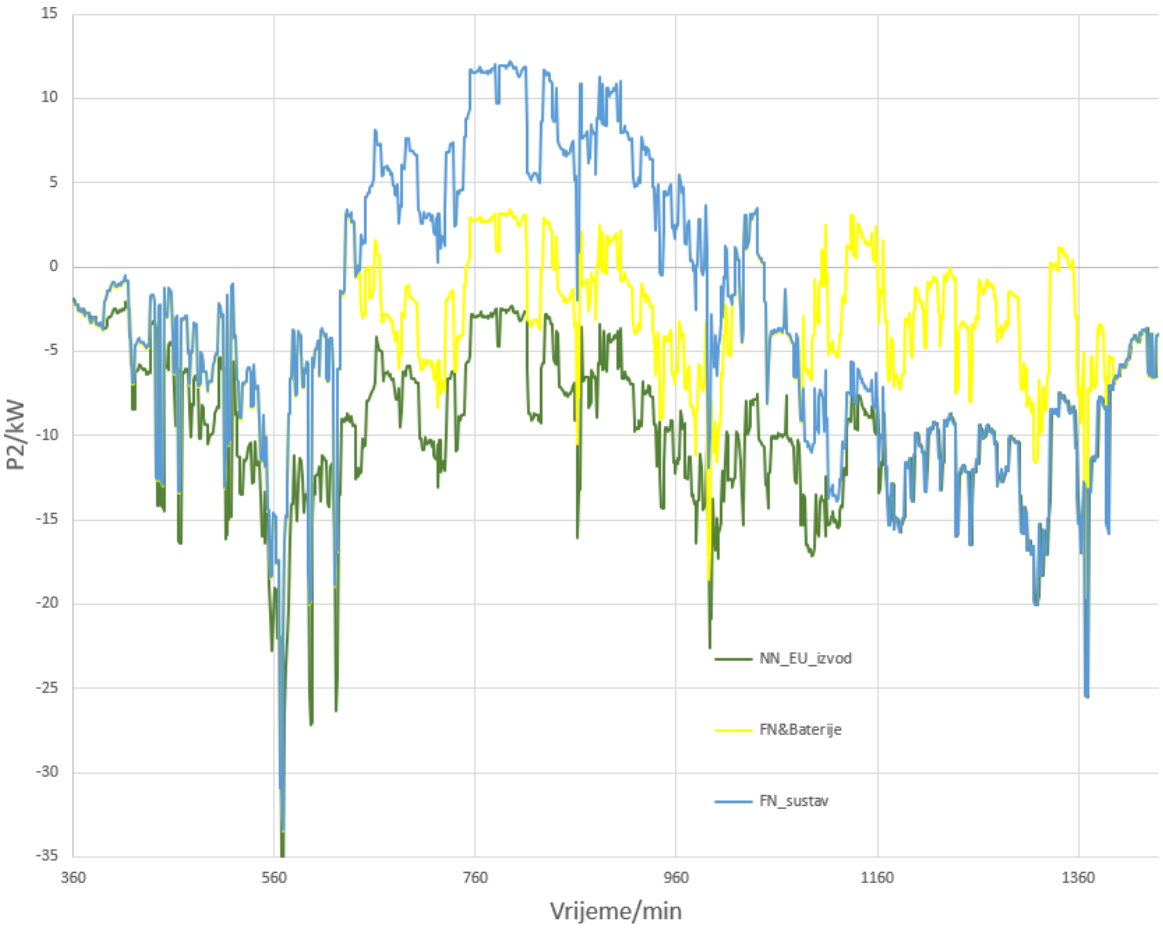
Slika 5.15. *Razmjena snaga na početku izvoda za sva tri slučaja prva faza*

Ukoliko rade bez pohrane FN sustavi svojom generacijom u periodu od 12:00h do 16:00h uzrokuju porast napona u maksimalnom iznosu od 1.057 p.u, što je. Postavljam baterijskih spremnika uz FN sustave, tokovi snaga ne prelaze vrijednost minimalne potrošnje. Naponska razina pri tome doseže maksimalnu vrijednost od 1.048 p.u. U slučaju da je mreža bez proizvodnje, maksimalna vrijednost napona iznosi 1.033 p.u. Proizvodnja ponovno premašuje potražnju na vodu, prestankom punjenja baterija u 16h, no kratkotrajna je s obzirom na postepeno pojavljivanje kasne popodnevne i večernje potražnje. Baterije započinju proces pražnjenja u periodu velike večernje potražnje u 17:30h. Naponski profil drastično je popravljen dodatnom generacijom u večernjim satima. Maksimalna večernja potrošnja bez proizvodnje iznosila je 21.46 kW, pri tome je pad napona iznosio 1.019 p.u. Baterijski spremnici smanjili su iznos maksimalne potrošnju na 12.97 kW i pri tome popravili naponski profil, te on iznosi 1.0221 p.u.



Slika 5.16. *Napon prve faze na kraju izvoda za sva tri slučaja*

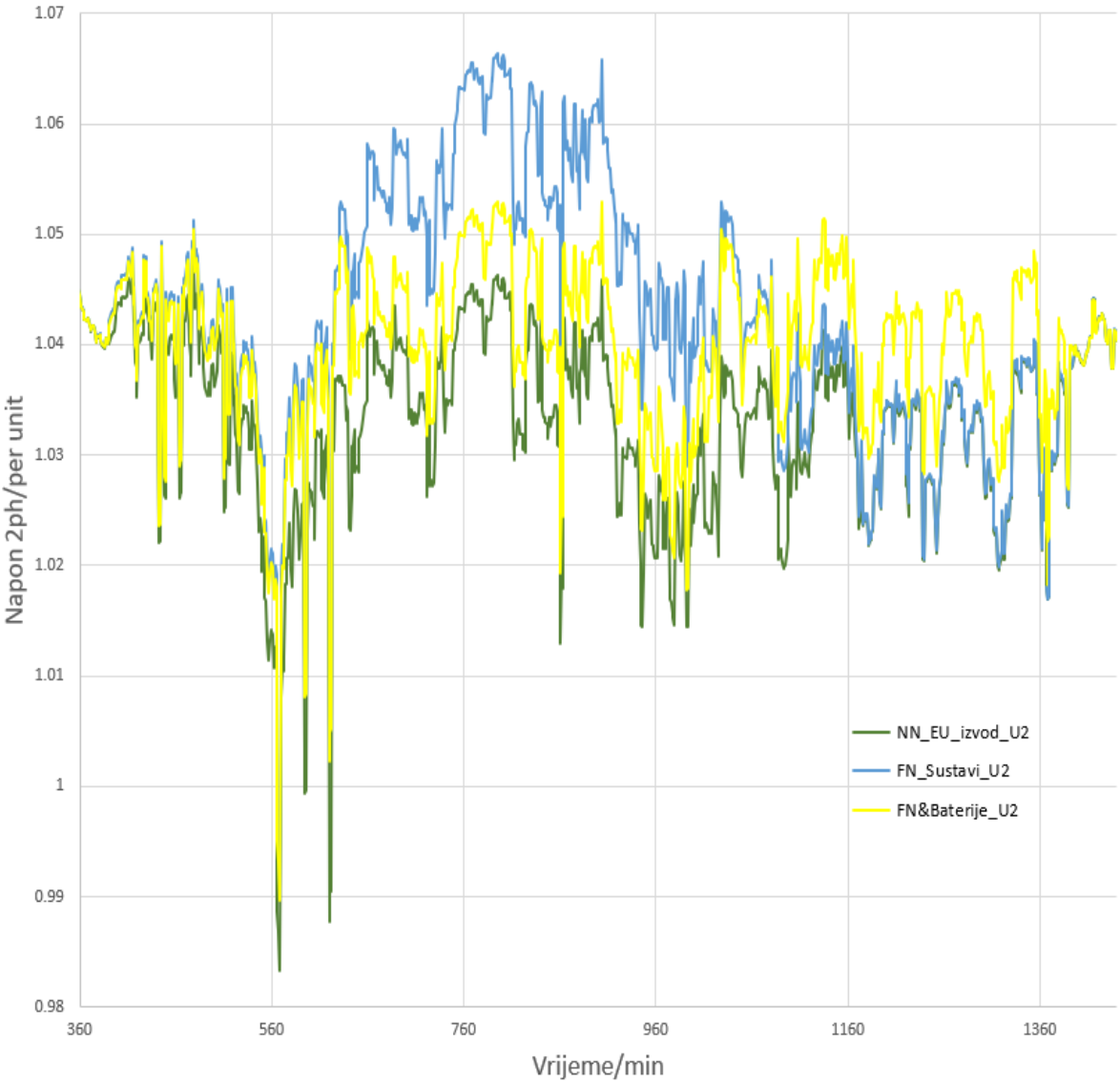
Tokovi snaga u drugoj fazi prikazani su na slici 5.17. Puno su manjih varijacija u odnosu na prethodnu prvu fazu. Iako druga faza u ranijim jutarnjim satima ima maksimalnu potrošnju koja ide do 35 kW, te je poprilično velik udarac na mrežu u sva tri slučaja. FN radi preslabom snagom, a baterije su prazne, te njihovo punjenje prethodi tek u popodnevnim satima. Nakon toga u periodu od 11:00 do 16:00 snaga bez baterija, prelazi minimalnu potrošnju, te se vod ponašao kao proizvođač, s maksimalnim iznosom tijekom popodneva od 11.98 kW, porast napona pri tome iznosi 1.066 p.u. U isto vrijeme ukoliko FN radi s baterijama, snaga je puno manja, ali i dalje izvod radi kao proizvođač, a iznosa je 3 kW, dok je napon na maksimalnih 1.05 p.u. NN EU testni izvod bez proizvodnje u tom vremenu ima iznos potražnje od 2.74 kW, s maksimalnim naponom 1.045 p.u.



Slika 5.17. *Razmjena snaga na početku izvoda za sva tri slučaja druga faza*

U kasnijim popodnevnim satima, napunjene baterije započinju pražnjenje u 17:30h. Naponski profil kao što se može vidjeti na slici 5.18. drastično se popravio pa varira u granicama od 1.025 p.u do 1.051 p.u. Usporedbe radi, za NN EU izvod bez baterija napon varira u iznosima

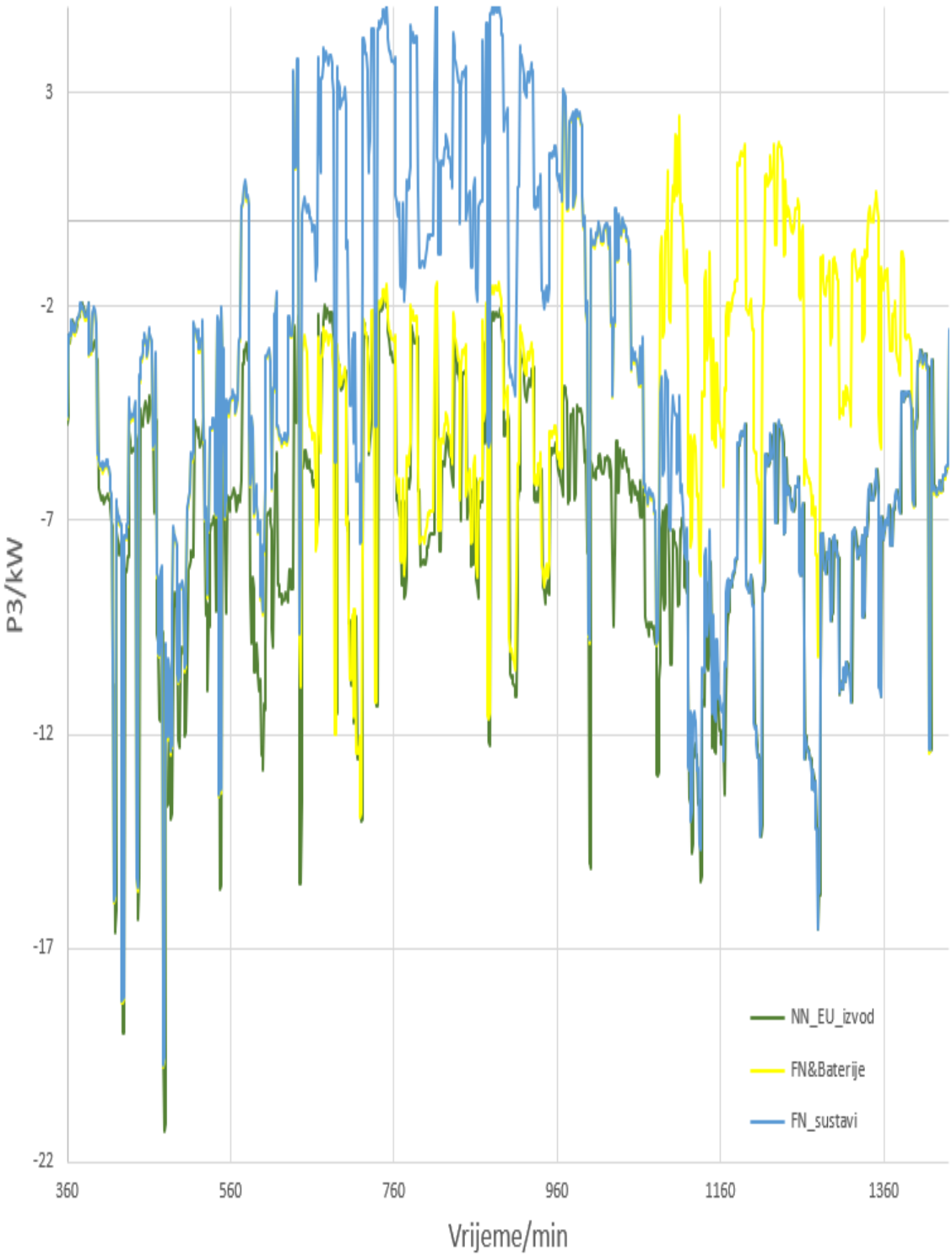
od 1.03 do 1.016 p.u. Maksimalna potrošnja od 25 kW, generacijom baterija smanjena je na puno prihvatljivijih 14 kW.



Slika 5.18. *Napon druge faze na kraju izvoda za sva tri slučaja*

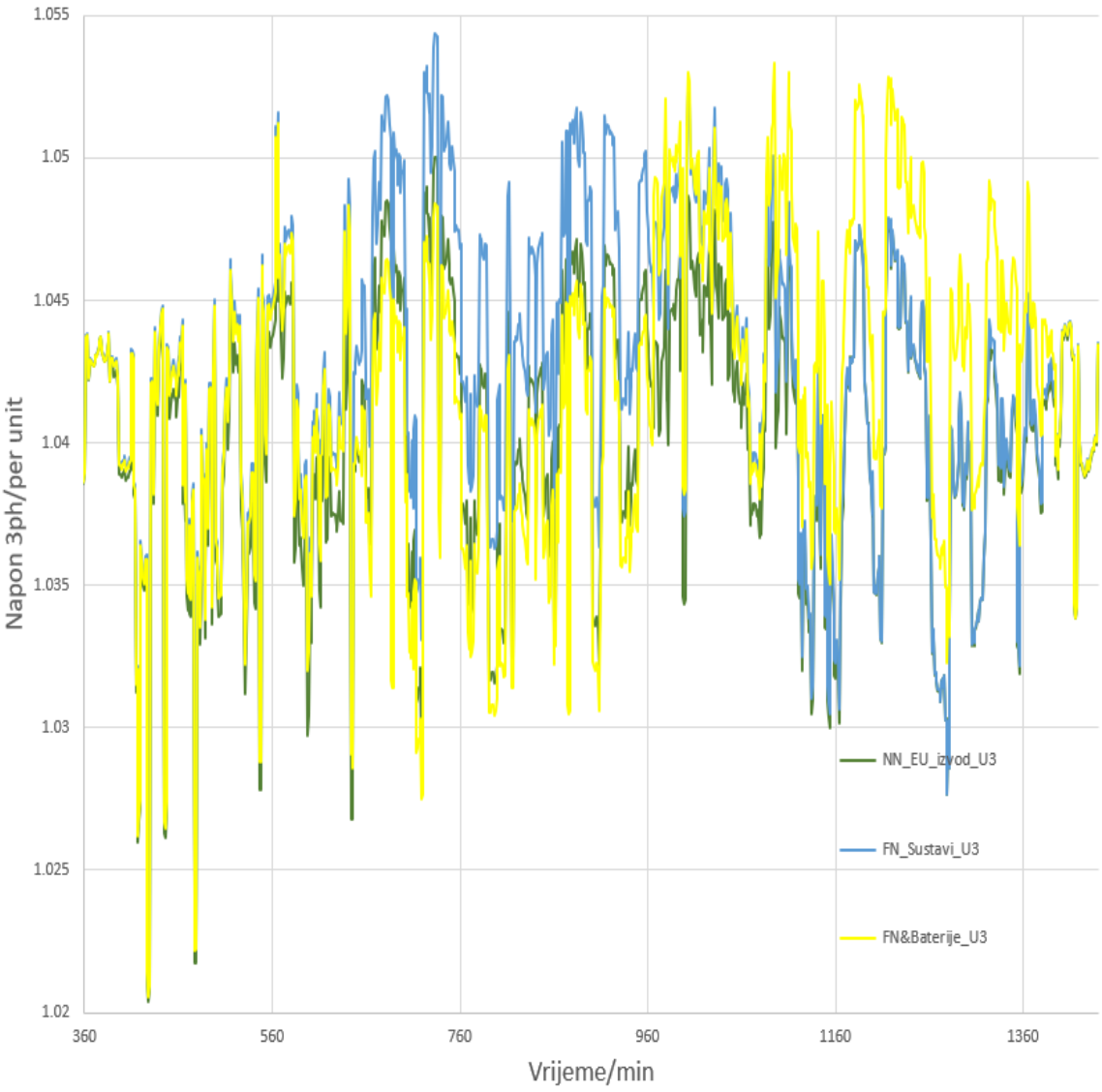
Treća faza najmanje je opterećena faza sustava, s toga su FN sustavi ukupne snage 9 kW dodani. U ranijem jutarnjem periodu od 9:30 do 11:00 generacija FN sustava ne prelazi potrošnju i smanjuje jutarnje vršne potrošnje neznatno. U periodu od 12:00 do 16:00, generacija FN sustava se pojačava, te ukoliko radi bez baterijskog spremnika, vod se ponaša kao proizvođač s maksimalnom snagom u trećoj fazi od 4.8 kW, napon iznosi . U isto vrijeme s baterijskim spremnicima, snaga je negativna, što znači da je potražnja veća te iznosi 1.72 kW. Dok je potražnja na vodu nešto veća od 2 kW. Naponi se za to vrijeme kreću u

granicama, za FN sustav 1.054 p.u, za FN sustav i baterije 1.047 p.u, a za NN Eu izvod 1.047 p.u.



Slika 5.19. *Tokovi snaga u trećoj fazi za sva tri slučaj*

Baterije uspješno pohranjuju energiju za vrijeme rada FN sustava. Pražnjenje započinju također u isto vrijeme kao i sve ostale faze 17:30h. Pa tako bitno popravlja naponske prilike i rasterećuje distribucijski vod. U određenim vremenskim periodima čak se pojavljuje i blaga proizvodnja u večernjim satima, s obzirom da je treća faza najslabije opterećena. Maksimalna potrošnja na NN EU izvodu bez proizvodnje, iznosila je 16.573 kW, pad napona pri tome iznosi 1.027 p.u. Generacija iz baterija smanjuje maksimalnu potrošnju na 12.32 kW i podiže napon na 1.032 p.u. Naponi se na izvodu bez proizvodnje u večernjim satima kreču u iznosu od 1.027 do 1.049 p.u. S generacijom iz baterijskih spremnika napon se podiže, te se kreče granicama od 1.032 do 1.0528 p.u. Naponi za sve tri faze prikazani su na slici 5.20.



Slika 5.20. *Napon treće faze na kraju izvoda za sva tri slučaja*

Usporede li se rezultati generacije FN sustava u poglavlju 5.2.1. s FN sustavima koji su ugrađeni uz baterijske spremnike poglavlje 5.2.3., rezultati pokazuju da bi se postavljanjem baterijskih spremnika uz FN sustave, njihova maksimalna integracijska snaga povećala gotovo za duplo. Prema rezultatima koji su dobiveni za prvu fazu, ostaje ne riješen slučaj prevelike generacije FN sustava prije početka punjenja baterija. Kao rješenje u takvim slučajevima, bilo bi najbolje postaviti dodatne baterije, koje će preuzeti višak proizvedene snage, a zatim ih prazniti u večernjim satima kako bi se dodatno smanjila opterećenja.

6. ZAKLJUČAK

Tranzicija na samoodrživi elektroenergetski sustav tekla je vrlo sporo. No ubrzanim razvojem tehnologije i pravilnim odlukama koje donosi EU proces se ubrzava. Sve veći broj promotivnih programa i financijskih fondova omogućuje kupcima isplativiju integraciju. Decentralizacija tržišta otvorila je masivan interes kupca za vlastitom proizvodnjom.

Utjecaji kupca s vlastitom proizvodnjom na distribucijski sustav mogu se podijeliti na pozitivne i negativne. Pozitivni utjecaji ne predstavljaju problem, dok negativni mogu biti vrlo izražajni, te izazivaju brojne probleme. Povećana proizvodnja distribuiranih izvora na lokalnom izvodu za vrijeme manje potražnje, dovodi do promjena nad tokovima snaga. Kao posljedica, na lokalnom izvodu izražen je porast napona. Kvaliteta energije mora ostati zadovoljena, te upravo dozvoljeni porast napona predstavlja granicu maksimalne integracije kupaca s vlastitom proizvodnjom.

OpenDSS alat pruža mogućnost preciznih simulacija i detaljnih analiza distribucijskih mreža s visokim udjelom distribuirane proizvodnje. Modeli koji su dio OpenDSS dokumentacije omogućavaju korisnicima jednostavnost korištenja. Prema postojećim primjerima moguće je dizajnirati modele za posebne slučajeve kao što je primjerice model pri kojem je integrirana distribuirana proizvodnja na više od 10% sabirnica. Performanse programa su izvrsne, simulacije se izvršavaju vrlo brzo, i neovisne su o količini sabirnica i uvjetima u kojima se simulira. Osim što je moguće analizirati tokove snaga, OpenDSS može raditi i kao alat za simulaciju i dimenzioniranje elemenata zaštite u sustavima, analize harmonika, analize i planiranje distribuirane proizvodnje.

IEEE NN EU izvod dimenzioniran je samo s 55 potrošača, a transformator nije opterećen niti s 10% snage što baš i nije realni slučaj. Često izvodi imaju mnogo veći broj potrošača i teško je modelirati uvjete bez prethodne analize izvoda na kojem se integrira distribuirana proizvodnja. Prema tome simulacije koje su izvedene, za još veću preciznost zahtijevaju preciznije modele lokalnih izvoda, te prije svega detaljna mjerenja na potrošačkim sabirnicama u realnim slučajevima. Integracija distribuirane proizvodnje na lokalnim izvodima direktno ovisi o minimalnoj potražnji u sustavu, što predstavlja ključne podatke za modeliranje. Tako bi precizni podatci dali precizne rezultate analize za određeni izvod.

U simulacijama kupci s vlastitom proizvodnjom modelirani su s ciljem kako bi se izrazio negativan utjecaj na distribucijsku mrežu. Prije svega modelirani su FN sustavi na 10% potrošačkih sabirnica bez baterijskih spremnika, s pojavom maksimalne proizvodnje tokom dana. Prilikom velike proizvodnje snaga FN sustava prelazi minimalnu potrošnju, što dovodi do promjene toka snage prema nadređenoj mreži. Tek u slučaju vrlo male proizvodnje, sustavi integrirani na svega 3% potrošačkih sabirnica, snaga ne mijenja smjer i ne dolazi do prevelikih promjena za distribucijsku mrežu.

Simulacije izvršene s FN sustavima i baterijama dale su puno bolje rezultate. Pri tome moguće je integrirati distribuiranu proizvodnju i na više od 20% potrošačkih sabirnica. U tom slučaju baterije zahtijevaju potpunu kontrolu nad punjenjem i pražnjenjem. Punjenje baterije odvija se u trenutcima kada proizvodnja prelazi minimalnu potrošnju, te na taj način preuzima tok snage na sebe. Pražnjenje baterije odvija se u trenutcima kada se pojavljuju vršne potražnje na lokalnom izvodu.

Prema izvedenim simulacijama zahtjevi za sve većom integracijom distribuirane proizvodnje na lokalne izvode distribucijskih mreža u budućnosti će ovisiti o tehnologijama koje baterijama omogućuju mjerenje trenutnog stanja u mreži, te se na temelju njih upravlja baterijskim spremnicima.

POPIS LITERATURE

[1] Renewable energy statistics 2020 IRENA

[2] iDistributedPV: Solar PV on the Distribution Grid: Smart Integrated Solutions of Distributed Generation based on Solar PV, Energy Storage Devices and Active Demand Management. (pristup rujan 2020.) http://www.idistributedpv.eu

[3] Resarchgate: A Review of Virtual power plant Definitions, Components, Framework and Optimization Mahmoud M. Othman* Y. G. Hegazy** Almoataz Y. Abdelaziz* *Department of Electrical Power & Machines, Faculty of Engineering, Ain Shams University, Cairo, Egypt, (prisutp ostvaren rujan 2020.)

[4] Integration of Distriubited Generation in the Power System, Math H.J. Bollen, Fainan Hassan, 2011. godina

[5] Real European Low Voltage Test Network for Smart Grid Applications by Arpan Koirala

[6] Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije – HO CIRED, 1. savjetovanje Šibenik, 18.-21. svibnja 2008., dr. sc. Minea Skok, mr. sc. Mario Marinčević, dr.sc Goran Majstorović, S04-16, (prisutp ostvaren rujan 2020.)

[7] Resarchgate: Alokacija distribuiranih izvora električne energije u mreži ODS-a, Rene Prenc, Universiy of Rijeka, (prisutp ostvaren rujan 2020.)

[8] Mrežna pravila elektroenergetskog sustava (NN, br. 36/06)

[9] European Energy Storage Technology development roadmap 2017 update: https://eera-es.eu/wp-content/uploads/2016/03/EASE-EERA-Storage-Technology-Development-Roadmap-2017-HR.pdf (prisutp ostvaren rujan 2020.)

[10] Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije – HO CIRED, 4. (10.) savjetovanje Trogir/Seget Donji, 11. - 14. svibnja 2014., dipl.ing.el. Mladen Vuksanić, dipl.ing.el. Igor Đurić, dipl.ing.el. Davor Vuković, dipl.ing.el. Tomislav Alinjak, S05-17, (prisutp ostvaren rujan 2020.)

[11] OpenDSS Manual: The Open Distribution System Simulator™ (OpenDSS) Roger C. Dugan Davis Montenegro Electric Power Research Institute, Inc. April 2018

[12] OpenDSS PVSystem2 and InvControl2 Element Models, Paulo Radatz

[13] OpenDSS STORAGE Element and STORAGECONTROLLER Element, ERPI

[14] Researchgate: Impact of Photovoltaic (PV) Systems on Distribution Networks, Wadhah Esmaeel, Chin Kim Gan, Mohd Ruddin Ab Ghani (prisutp ostvaren rujan 2020.)

Sažetak

Kupci s vlastitom proizvodnjom igraju važnu ulogu u tranziciji elektroenergetskog sustava na samoodrživi. Ali sve veća integracija distribuirane proizvodnje na lokalne izvode izaziva do sada nepoznate promjene za distribucijske sustave. Tokovi snaga koji mijenjaju smjer prema naređenoj mreži i porast napona uzrokovan povećanom proizvodnjom mogu uzrokovati nepovoljne utjecaje na lokalne izvode. U ovom radu pomoću programskog alata OpenDSS simulirani su i analizirani stvarni uvjeti na primjeru niskonaponskog testnog izvoda. Na temelju analize modelirani su FN sustavi i baterijski spremnici. Također izvršene su simulacije za slučajeve s proizvodnjom FN sustava i baterijskom pohranom te su utvrđeni utjecaji kupca s vlastitom proizvodnjom na distribucijsku mrežu.

Ključne riječi: baterijski spremnici, FN sustavi, kupac s vlastitom proizvodnjom, OpenDSS, niskonaponski testni izvod, porast napona, tokovi snaga,

Abstract

Prosumer are very important in transition of energy power system to sustainable. Increase in distributed generation has unpredictable impacts on distributed networks. Power flow with opposite direction to MV substation and high voltages could possible lead to serious power quality issues. Real time power flow was simulated and analyzed for low voltage test feeder in simulation tool OpenDSS. PV system and battery storages were created as models in OpenDSS based on analysis of low voltage feeder. Then the edge cases were simulated for distributed generation from PV systems and battery storages. Analyses were compered to determine the impacts of prosumers on distributed networks.

Key word: battery storage, PV system, prosumers, OpenDSS, low voltage feeder, increase of voltage, power flow

Životopis

Benjamin Berta rođen je u Osijeku 10.03.1994. godine. Pohađao je osnovnu školu Antuna Mihanovića u Donjem Miholjcu. Nakon osnovne škole upisuje opću elektrotehničku školu u SŠ Valpovo koju završava 2013. godine. Po završetku srednje škole upisuje preddiplomski studiji elektrotehnike, smjer Energetika na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Tijekom preddiplomskog studija odlazi na kulturnu razmjenu kao student u SAD. Nakon povratka 2017. godine upisuje diplomski studij smjer Održiva Elektroenergetika također na istoimenom fakultetu.

Prilozi

Prilog 1: definicija PV sustava u OpenDSS-u III. slučaj

PVSystems.txt

```
New PVSystem.PV70 phases=1 bus1=907.1 kV=0.22  kVA=30  irrad=.98  Pmpp=4 temperature=25 PF=1 %cutin=0.1 %cutout=0.1
effcurve=Myeff  P-TCurve=MyPvsT Daily=MyIrrad  TDaily=MyTemp
New PVSystem.PV73 phases=1 bus1=908.1 kV=0.22  kVA=30  irrad=.98  Pmpp=4 temperature=25 PF=1 %cutin=0.1 %cutout=0.1
effcurve=Myeff  P-TCurve=MyPvsT Daily=MyIrrad  TDaily=MyTemp
New PVSystem.PV289 phases=1 bus1=909.1 kV=0.22  kVA=30  irrad=.98  Pmpp=4 temperature=25 PF=1 %cutin=0.1 %cutout=0.1
effcurve=Myeff  P-TCurve=MyPvsT Daily=MyIrrad  TDaily=MyTemp
New PVSystem.PV349 phases=1 bus1=910.1 kV=0.22  kVA=30  irrad=.98  Pmpp=4 temperature=25 PF=1 %cutin=0.1 %cutout=0.1
effcurve=Myeff  P-TCurve=MyPvsT Daily=MyIrrad  TDaily=MyTemp
// FN sustavi druga faza
New PVSystem.PV83 phases=1 bus1=911.2 kV=0.22  kVA=30  irrad=.98  Pmpp=4.5 temperature=25 PF=1 %cutin=0.1 %cutout=0.1
effcurve=Myeff  P-TCurve=MyPvsT Daily=MyIrrad  TDaily=MyTemp
New PVSystem.PV406 phases=1 bus1=912.2 kV=0.22  kVA=30  irrad=.98  Pmpp=4.5 temperature=25 PF=1 %cutin=0.1 %cutout=0.1
effcurve=Myeff  P-TCurve=MyPvsT Daily=MyIrrad  TDaily=MyTemp
New PVSystem.PV522 phases=1 bus1=913.2 kV=0.22  kVA=30  irrad=.98  Pmpp=4.5 temperature=25 PF=1 %cutin=0.1 %cutout=0.1
effcurve=Myeff  P-TCurve=MyPvsT Daily=MyIrrad  TDaily=MyTemp
New PVSystem.PV688 phases=1 bus1=916.2 kV=0.22  kVA=30  irrad=.98  Pmpp=4.5 temperature=25 PF=1 %cutin=0.1 %cutout=0.1
effcurve=Myeff  P-TCurve=MyPvsT Daily=MyIrrad  TDaily=MyTemp
// FN sustavi treća faza
New PVSystem.PV337 phases=1 bus1=914.3 kV=0.22  kVA=30  irrad=.98  Pmpp=3 temperature=25 PF=1 %cutin=0.1 %cutout=0.1
effcurve=Myeff  P-TCurve=MyPvsT Daily=MyIrrad  TDaily=MyTemp
New PVSystem.PV342 phases=1 bus1=915.3 kV=0.22  kVA=30  irrad=.98  Pmpp=3 temperature=25 PF=1 %cutin=0.1 %cutout=0.1
effcurve=Myeff  P-TCurve=MyPvsT Daily=MyIrrad  TDaily=MyTemp
New PVSystem.PV556 phases=1 bus1=917.3 kV=0.22  kVA=30  irrad=.98  Pmpp=3 temperature=25 PF=1 %cutin=0.1 %cutout=0.1
effcurve=Myeff  P-TCurve=MyPvsT Daily=MyIrrad  TDaily=MyTemp
```

Prilog 2: definicija baterijskih spremnika u OpenDSS-u za FN sustave III. slučaj

BatteryStorages.txt

```
// -------------------------------------First phase batteries-----------------------------------------------------------
New Storage.BatteryPV70 phases=1 Bus1=907.1 kV=0.22 kWrated=2 kWhrated=15 kWhStored=5 State=IDLING dispmode=follow Daily=SC_LOADSHAPE1PH
%discharge=100 %charge=100 chargetrigger=-0.75 dischargetrigger=0.6

New Storage.BatteryPV73 phases=1 Bus1=908.1 kV=0.22 kWrated=2 kWhrated=15 kWhStored=5 State=IDLING dispmode=follow Daily=SC_LOADSHAPE1PH
%discharge=100 %charge=100 chargetrigger=-0.75 dischargetrigger=0.6

New Storage.BatteryPV289 phases=1 Bus1=909.1 kV=0.22 kWrated=2 kWhrated=15 kWhStored=5 State=IDLING dispmode=follow Daily=SC_LOADSHAPE1PH
%discharge=100 %charge=100 chargetrigger=-0.75 dischargetrigger=0.6

New Storage.BatteryPV349 phases=1 Bus1=910.1 kV=0.22 kWrated=2 kWhrated=15 kWhStored=5 State=IDLING dispmode=follow Daily=SC_LOADSHAPE1PH
%discharge=100 %charge=100 chargetrigger=-0.75 dischargetrigger=0.6

// -------------------------------------Second phase batteries-----------------------------------------------------------
New Storage.BatteryPV83 phases=1 Bus1=911.2 kV=0.22 kWrated=2 kWhrated=18 kWhStored=5 State=IDLING dispmode=follow Daily=SC_LOADSHAPE2PH
%discharge=100 %charge=75 chargetrigger=-0.75 dischargetrigger=0.6

New Storage.BatteryPV406 phases=1 Bus1=912.2 kV=0.22 kWrated=2 kWhrated=18 kWhStored=5 State=IDLING dispmode=follow Daily=SC_LOADSHAPE2PH
%discharge=100 %charge=75 chargetrigger=-0.75 dischargetrigger=0.6

New Storage.BatteryPV522 phases=1 Bus1=913.2 kV=0.22 kWrated=2 kWhrated=18 kWhStored=5 State=IDLING dispmode=follow Daily=SC_LOADSHAPE2PH
%discharge=100 %charge=75 chargetrigger=-0.75 dischargetrigger=0.6

New Storage.BatteryPV688 phases=1 Bus1=916.2 kV=0.22 kWrated=2 kWhrated=18 kWhStored=5 State=IDLING dispmode=follow Daily=SC_LOADSHAPE2PH
%discharge=100 %charge=75 chargetrigger=-0.75 dischargetrigger=0.6

// ----------------------------------Third phase batteries-----------------------------------------------------------
New Storage.BatteryPV337 phases=1 Bus1=914.3 kV=0.22 kWrated=2 kWhrated=15 kWhStored=5 State=IDLING dispmode=follow Daily=SC_LOADSHAPE3PH
%discharge=100 %charge=100 chargetrigger=-0.75 dischargetrigger=0.6

New Storage.BatteryPV342 phases=1 Bus1=915.3 kV=0.22 kWrated=2 kWhrated=15 kWhStored=5 State=IDLING dispmode=follow Daily=SC_LOADSHAPE3PH
%discharge=100 %charge=100 chargetrigger=-0.75 dischargetrigger=0.6

New Storage.BatteryPV556 phases=1 Bus1=917.3 kV=0.22 kWrated=2 kWhrated=15 kWhStored=5 State=IDLING dispmode=follow Daily=SC_LOADSHAPE3PH
%discharge=100 %charge=100 chargetrigger=-0.75 dischargetrigger=0.6
```