

# Analiza stabilnosti mikromreže

---

Farkaš, Valentin

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:327376>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-20**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**DIPLOMSKI STUDIJ**

**Analiza stabilnosti mikromreža**

**Diplomski rad**

**Valentin Farkaš**

**Osijek, 2020.**

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

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit

Osijek, 28.09.2020.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

Ime i prezime studenta:	Valentin Farkaš
Studij, smjer:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D-1169, 25.09.2019.
OIB studenta:	07018450681
Mentor:	Izv. prof. dr. sc. Predrag Marić
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	Izv. prof. dr. sc. Hrvoje Glavaš
Član Povjerenstva 1:	Izv. prof. dr. sc. Predrag Marić
Član Povjerenstva 2:	Ružica Kljajić
Naslov diplomskog rada:	Analiza stabilnosti mikromreže
Znanstvena grana rada:	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
Zadatak diplomskog rada:	Klasificirati stabilnost mikromreže. Modelirati mikromrežu u simulacijskom sučelju te analizirati više aspekata stabilnosti, te predložiti mjere za poboljšanje
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):	Vrlo dobar (4)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 1 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	28.09.2020.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis: Datum:



**FERIT**

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

## IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek, 21.11.2020.

Ime i prezime studenta:	Valentin Farkaš
Studij:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D-1169, 25.09.2019.
Turnitin podudaranje [%]:	15

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Analiza stabilnosti mikromreže**

izrađen pod vodstvom mentora Izv. prof. dr. sc. Predrag Marić

i sumentora

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

Potpis studenta:

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
1.1 Zadatak diplomskog rada.....	1
2. MIKROMREŽE.....	2
2.1. Koncept mikromreže.....	3
2.2. Rad i upravljanje mikromrežama.....	5
2.2.1 P-Q metoda upravljanja mrežom.....	5
2.2.2. V/f metoda.....	5
2.2.3. Arhitektura upravljanja mikromrežom.....	5
3. DEFINIRANJE I KLASIFIKACIJA STABILNOSTI U MIKROREŽAMA.....	7
3.1. Definicije stabilnosti .....	7
3.2. Klasifikacije stabilnosti.....	7
3.2.1. Stabilnost i ravnoteža napajanja.....	8
3.2.2. Stabilnos upravljačkog sustava .....	10
3.3. Veliki nasuprot malim poremećajima.....	11
4. ANALIZA NAPONSKE STABILNOSTI MIKROMREŽE U DIg SILENT PowerFactory SUČELJU.....	13
4.1 Model mreže.....	13
4.2. Tokovi snaga i dijagram napona.....	15
4.3 Postavljanje proizvodne karakteristike distribuiranih izvora.....	15
4.4. Analiza PV i QV krivulja.....	22
5. ZAKLJUČAK.....	27
LITERATURA .....	28
SAŽETAK.....	31
ABSTRACT.....	31

ŽIVOTOPIS.....	32
PRILOZI.....	33

## **1. UVOD**

U moderno vrijeme život bez električne energije bio bi nezamisliv te potreba za električnom energijom sve više i više raste zbog sve većeg razvoja društva. Zbog tog razloga električna energija koja se do sada proizvodila najčešće iz fosilnih goriva, a takva stvara ugljični dioksid te zagađuje okolinu nije dugoročno održiv plan. Jedno od najčešćih prijedloga rješenja za navedene probleme imamo u vidu koncepta mikromreže. Mikromreža predstavlja integriranje distribuirane proizvodnje električne energije, skladištenja električne energije te upravljanja potrošnjom. Velika prednost mikromreža, u smislu pouzdanosti opskrbe električnom energijom je u tome što mikromreže, koje su najčešće spojene sa glavnom mrežom, prilikom kvara glavne mreže mogu raditi i samostalno. Naziv mikromreže, veže se uz pojam vezan uz sustav sa distribuiranim izvorima te ga se ne smije vezati sa veličinom mreže, već uz njenu funkciju. Projektiranje, problematika i zaštita u mikromrežama zahtijevan je zadatak za inženjere, a potreba za sigurnim elektroenergetskim sustavom je primarna. Kvaliteta električne energije mora zadovoljavati određene uvjete, energija mora biti konstantno dostupna te troškovi opskrbe električnom energijom moraju biti optimalni [1]. U drugom dijelu rada opisana je problematika stabilnosti mikromreža s obnovljivim izvorima energije, prikazani su primjeri P-V i Q-V krivulja kojima se određuju margine odnosno granice naponske stabilnosti.. U posljednjem je poglavlju programskom simulacijom u DIgSILENT PowerFactory softveru analizirana naponska stabilnost primjera mikromreže određivanjem P-V i Q-V krivulja.

### **1.1 Zadatak diplomskog rada**

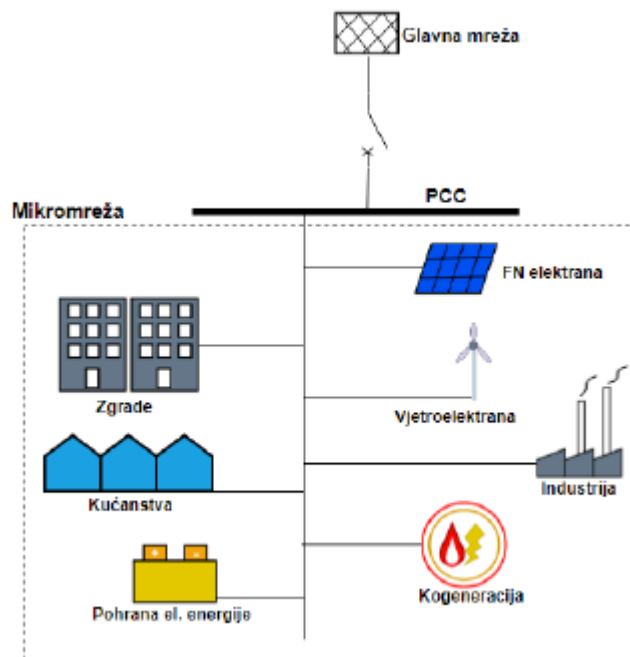
U diplomskom radu potrebno je klasificirati stabilnost mikromreže, modelirati mikromrežu u simulacijskom sučelju DIg SILENT te analizirati više aspekata stabilnosti, predložiti mjere za poboljšanje.

## 2. MIKROMREŽE

Problematika stabilnosti i performansi mikromreže je značajno drugačija od problematika konvencionalnog elektroenergetskog sustava, budući da je veličina mikromreža znatno manja od klasičnog velikog međusobno povezanog elektroenergetskog sustava. Nadalje, vodovi mikromreže su relativno kratki te rade na srednjim naponskim razinama, predstavljajući niži omjer reaktancije i otpora u usporedbi s konvencionalnim sistemima [2]. Dinamičke performanse mikromreža i svojstvene matematičke relacije između napona, kutova i između djelatnih i reaktivnih tokova snaga su drugačiji nego kod konvencionalnih mreža. Zbog toga što su mikromreže manje veličine od konvencionalnih elektroenergetskih sustava, imaju manji broj opterećenja te moguće vrlo brze promjene dobivene snage iz obnovljivih izvora energije, kao posljedice imamo veću nesigurnost u sustavu [3]. Balans između ponude i potražnje je kritičan u mikromrežama pa nam je vrlo bitno kako se ponašaju obnovljivi izvori energije [3], zbog toga što kod velikog broja obnovljivih izvora energije nemamo predvidivost proizvodnje, oni utječu na stabilnost cijelog sustava. Da bi taj utjecaj ublažili koristimo spremnike električne energije. Dvosmjerna snaga koja teče između proizvođača i engl. prosumer-a stvara dodatne zahtjeve za upravljanjem i zaštitom [4]. Uz to, inercija sustava je znatno manja u mikromrežama u odnosu na konvencionalni elektroenergetski sustav. Bitna problematika u otočnim načinima rada mikromreža, posebice u udaljenim zajednicama je mala inercija. U takvim je sustavima mala promjena u konfiguraciji mikromreža (kao primjer pokretanje ili isključivanje dizelskih generatora) može rezultirati u velikim variranjima napona i frekvencije [5]. To nam stvara izazov za stabilnosti pri radu konvencionalnih sinkronih generatora i proizvodnje iz obnovljivih izvora energije kada rade zajedno jer poremećaji u tom slučaju mogu dovesti do toga da se pretvarač preko kojega su spojeni obnovljivi izvori na mrežu ugasi [5]. Za razliku od konvencionalnih elektroenergetskih sustava, teret u mikromrežama je često nesimetričan [6]. Upravljanje mikromrežama pod takvim uvjetima značajne nesimetrije može ugroziti stabilnost sustava [7].



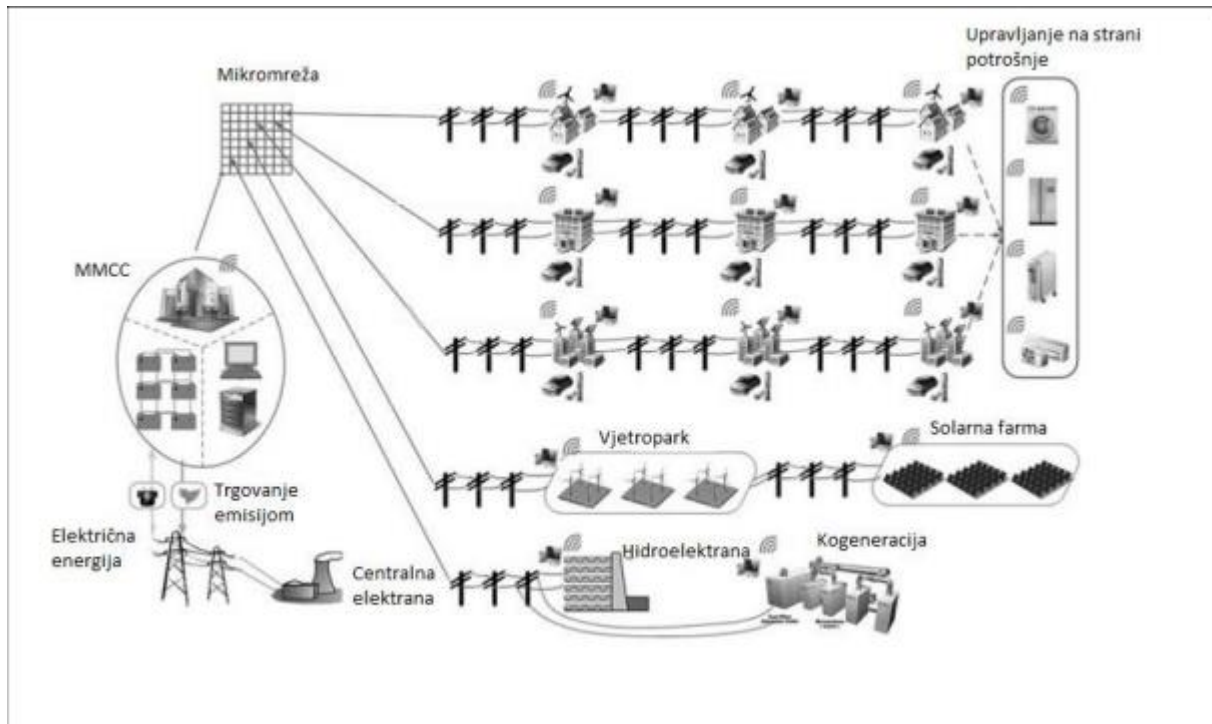
Na slici 2.1. prikazan je primjer jedne mikromreže, vidi se način spajanja sa glavnom mrežom preko točke zajedničkog povezivanja, mogućnost pohrane električne energije i mogućnosti rada u kogeneracijskom načinu rada, koji predstavlja proizvodnju električne kao i toplinske energije.



Slika 2.1. Primjer mikromreže [4]

Dodatno, tradicionalne tehnike i modeli za analizu stabilnosti pretpostavljaju simetričnost sustava, te zbog toga nisu ispravni i u analizi rada sustava koji nije simetričan., kao što je to slučaj kod mikromreža. Rezimirajući, najvažnije razlike mikromreža u usporedbi s elektroenergetskim sustavima u pogledu stabilnosti su sljedeće: manja veličina sustava, veća nesigurnost, niža inercija sustava, veći omjer  $R/X$  kod vodova, ograničenje snage kratkog spoja te nesimetrično trofazno opterećenje [5].

Na slici 2.2 prikazana je mikromreža na razini niskonaponske mreže [5].



Slika 2.2. Mikromreža na razini niskonaponske mreže [5]

## 2.1 Koncept mikromreža

Mikromreža može raditi kao samostalni otočni sustav ili češće, može biti spojena s glavnom mrežom [9].

Otočna mikromreža definirana je kao mreža kod koje nema priključenih točaka s glavnom mrežom. Takva vrsta mikromreže obično se koriste za udaljena područja ili na otocima. Da bi se takva područja mogla opskrbljivati potrebna je dobra strategija upravljanja potrošnjom. Tada mikromreža predstavlja novi način napajanja udaljenijih područja, te se tako eliminira potreba za postavljanjem dugačkih dalekovoda jer to nije ekonomično niti isplativo kada imamo manji broj korisnika ili su oni jako udaljeni [9].

Mikromreža koja je spojena na konvencionalnu elektroenergetsku mrežu predstavlja prijelaz s konvencionalnog elektroenergetskog sustava na pametnu mrežu prilagođavajući se tako proizvodnji sa distribuiranim izvorima. Ova vrsta mikromreža grupira nekoliko izmjeničnih generatora sa proizvodnjom iz obnovljivih izvora energije i potrošača. Kada je ukupna proizvodnja energije veća od potražnje energije u mikromreži, tada se višak snage može vratiti u glavnu mrežu kroz točku zajedničkog povezivanja (engl. Point of common coupling-PCC). Te,

ako proizvedena energija u mikromreži ne zadovoljava zahtjeve potražnje u mikromreži, onda će mikromreža uzimati električnu energiju iz glavne mreže putem PCC-a [9].

Prema literaturi [9]: Kako bi mikromreža upravljala potrošnjom, punjenjem te pražnjenjem baterija i ispravno preklapala između rada s glavnom mrežom i rada u otočnom načinu ključno je imati dobre tehnike upravljanja. Glavna značajka i prednost mikromreže spojene s glavnom mrežom je sposobnost odvajanja sustava od glavne mreže za vrijeme izvanrednih događaja te nastavak rada u otočnom radu, i sposobnost ponovnog autonomnog spajanja na mrežu. Prebivanje između otočnog rada i rada povezanog na glavnu mrežu obično se postiže pomoću dvosmjernog releja na PCC-u“.

## **2.2. Rad i upravljanje mikromrežama**

### **2.2.1 P-Q metoda upravljanja mikromrežom**

P-Q metoda služi za održavanje aktivne i reaktivne snage unutar određenih granica bez obzira na promjene napona i frekvencije izvan graničnih vrijednosti. Budući da su tokovi djelatne snage vezani za frekvenciju, a tokovi jalove snage za napon ova metoda koristi različite tehnike za održavanje djelatne i reaktivne snage unutar granica. U P-Q metodi je potrebno imati još jedan izvor energije koji će imati ulogu održavanja napona i frekvencije stabilnima. Ovo sve vrijedi kada je mikromreža u otočnom radu, budući da veliki elektroenergetski sustav ne dopušta prevelika odstupanja frekvencije i napona [9].

### **2.2.2 V/f metoda upravljanja mikromrežom**

V/f metoda za glavni cilj ima očuvanje iznosa napona i frekvencije na način da prilagođava djelatnu odnosno reaktivnu snagu. Reaktivna snaga se prilagođava s upravljačkim sklopom za održavanje napona, a sa upravljačkim sklopom za održavanje frekvencije prilagođava se djelatnu snagu. Kod mreža koje rade u otočnom načinu rada ovo je najčešći način upravljanja. [9]

### **2.2.3. Arhitektura upravljanja mikromrežom**

Kod projektiranja mikromreže neophodno je da svaki izvor energije ima dodijeljenu svoju ulogu da bi što lakše bila uspostavljena koordinacija u radu mreže. Kao jedan od najbitnijih načina upravljanja je master-slave način, kod otočnog rada glavni izvor preuzima održavanje napona i frekvencije pomoću prethodno opisane V/f metode, taj izvor onda upravlja i svim ostalim izvorima koji koriste PQ metodu upravljanja [9].

Uz master- slave način postoji i peer-to-peer način. Kod takvih sistema svi generatori ovisno o promjeni frekvencije mijenjaju tok radne snage, te ovisno o promjeni napona mijenjaju tok jalove snage na pojedinom distribuiranom izvoru. Ako dođe do pada frekvencije na distribuiranom izvoru, generator povećava izlaznu snagu te tako podiže i frekvenciju, te na sličan način ako dođe do pada napona, generator povećava izlaznu reaktivnu snagu i povećava se i napon. Tada će sustav raditi sa novim naponima i novom frekvencijom. Kao razliku između „master- slave „ i „peer-to-peer“ načina vidi se i po samome nazivu, kod master- slave imamo glavni izvor koji regulira napon i frekvenciju, dok kod peer-to-peer svi generatori djeluju i u reguliranju napona i reguliranju frekvencije po svojim karakteristikama [9].

Peer-to-peer ima prednosti uštede na neekonomičnim komunikacijskim protokolima te puno ugodniji prijelaz s mrežnog načina rada na otočni rad, međutim ova metoda se i dalje koristi u simulacijama [10].

### 3. Definiranje i klasifikacija stabilnosti u mikromrežama

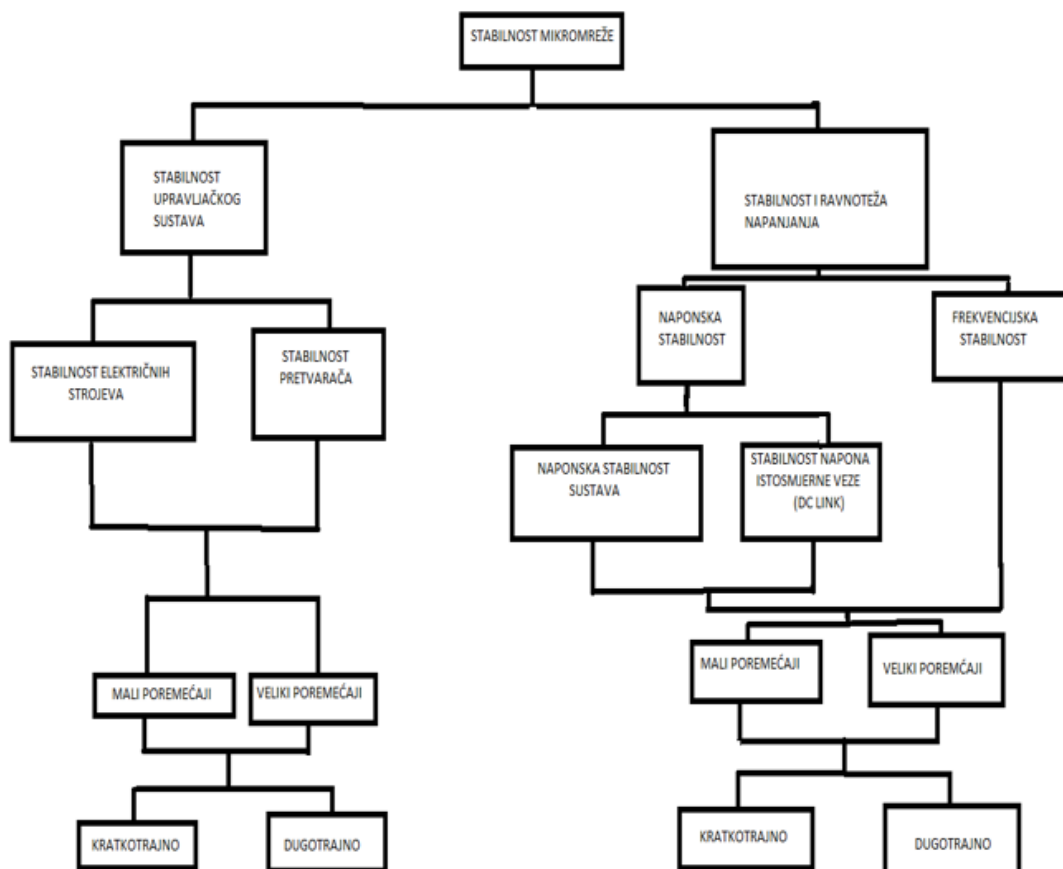
#### 3.1. Definicija stabilnosti

„Stabilnost elektroenergetskog sustava definira se kao sposobnost sustava da sa zadanim početnim uvjetima, zadrži stanje ravnoteže nakon utjecaja poremećaja, pri čemu će parametri sustava ostati jednaki“ [11]. Nakon poremećaja ne smije biti vidljivih promjena u sustavu u odnosu na stanje prije nego što je došlo do poremećaja.

Poremećaji mogu odgovarati bilo kojem vanjskom utjecaju kao što su promjena opterećenja i kvarovi komponenti, te se mogu podijeliti na male i velike. Pod malim poremećajima svrstavamo promjene opterećenja sustava koje se konstantno događaju i sustav im se konstantno mora prilagođavati. Veliki poremećaji uključuju kratke spojeve, neplanirane prijelaze s mrežnog na otočni način rada i ispad generatora. Ovisno o uzroku, nestabilnost s malim poremećajima može biti ili kratkoročna ili dugoročna pojava [12].

#### 3.2. Klasifikacija stabilnosti mikromreže

Klasifikacija stabilnosti mikromreže prikazana je na slici 3.1 :



Slika 3.1 Klasifikacija stabilnosti u mikromrežama [13]

Napon i frekvencija su značajno povezani u mikromrežama, te se na taj način suprotno razmatranjima pojma nestabilnosti u konvencionalnim elektroenergetskim sustavima, nestabilnost u mikromrežama očituje fluktuacijama više varijabli sustava. Zbog ove snažne veze između varijabli je teško klasificirati nestabilnost kao „naponska nestabilnost“ ili „frekvencijska nestabilnost“ temeljno samo na mjerenjima tih dviju varijabli. Prema slici 3.1. stabilnost u mikromrežama je podijeljena u dvije glavne kategorije :

1. Pojave koje se odnose na upravljanje sustavom i
2. Pojave koje se odnose na tokove djelatne i reaktivne snage.

Nestabilnost u mikromreži bez obzira na kategoriju može biti kratkotrajna ili dugotrajna; kratkotrajne su u trajanju od nekoliko sekundi, dok sve koje traju duže spadaju u dugotrajne [13].

### **3.2.1. Stabilnost i ravnoteža napajanja**

Stabilnost i ravnoteža izvora napajanja odnosi se na sposobnost sustava za održavanje balansa snage proizvodnje i potrošnje, te raspodjele potraživane snage između distribuiranih izvora energije (DER-ova).. Problemi s ovom kategorijom stabilnosti su povezane s ispadom generatora, kršenjem odnosno prekoračivanjem ograničenja DER-ova, loše raspodjele energije između DER-ova [14]. Osim toga, određene vrste opterećenja, primjerice induksijski motori mogu izazvati određene tipove nestabilnosti u sustavu uzrokovane naponskim propadima i generiranjem viših harmonika.. Ovakvi se problemi nadalje mogu svrstati u podkategorije stabilnosti frekvencijske i napona :

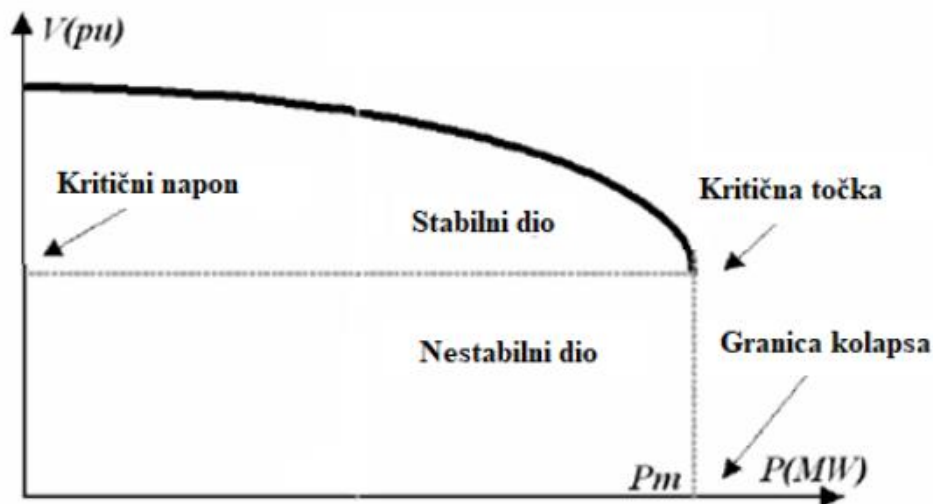
- 1.) Stabilnost frekvencije: regulacija frekvencije je glavni zadatak u izoliranim/otočnim mikromrežama. Mali broj generatorskih jedinica u mikromrežama pridonosi riziku od velikih poremećaja u slučaju ispada generatora, stoga, za takve poremećaje frekvencija sustava može imati velike promjene iznosa s vrlo velikom brzinom promjene [15]. Čvrsta veza između napona i frekvencije u mikromrežama dodatno otežava regulaciju frekvencije. Prvo, zbog visokog omjera R/X distribucijskih izvora energije (DER) u mikromreži konvencionalno odvajanje tokova djelatne snage i napona nije moguće [16]. Drugo, zbog relativno male veličine mikromreža, naponske promjene na terminalima distribucijskih izvora energije (DER) se gotovo trenutno odražavaju na strani opterećenja.
- 2.) Stabilnost napona: u konvencionalnim elektroenergetskim sustavima glavni uzrok pojave nestabilnosti napona su dugački dalekovodi koji ograničavaju prijenos snage između generatora i opterećenja odnosno potrošača. Međutim, u mikromrežama vodovi su relativno kratki, s relativno

malim padovima napona između oba kraja voda [18]. U mikromrežama, ograničenja distribucijskih izvora energije i osjetljivost potrošnje električne energije opterećenja o naponu su kritični čimbenici nestabilnosti napona. U konvencionalnim elektroenergetskim sustavima upravljanje tokovima jalove snage se uglavnom vrši lokalno reguliranjem napona na terminalima generatora i kompenzacijom opterećenja. Međutim, u mikromrežama vodovi su kratki, pa se s toga gotovo sve promjene napona na terminalima DER-ova odmah odražavaju u ostatku sustava [20]. Ovakva upravljanja izravno utječu na napon svih sabirnica sustava i zahtijevaju pravilnu koordinaciju DER-ova. Čak i male razlike u veličinama napona na DER-ovima, ako nisu adekvatno koordinirane mogu rezultirati značajnim tokovima jalovih snaga i s velikim naponskim oscilacijama [21].

Stabilnost napona u mikromreži se može promatrati s pomoću P-V i Q-V krivulja :

### PV - krivulje

Ovisnost napona o promjeni djelatne snage prikazuje se P-V krivuljama. Povećanjem djelatne snage koja se prenosi vodom dolazi do smanjenja napona na kraju voda sve do kritične vrijednosti. S daljnjim povećanjem djelatne snage dolazi do sloma napona [25].

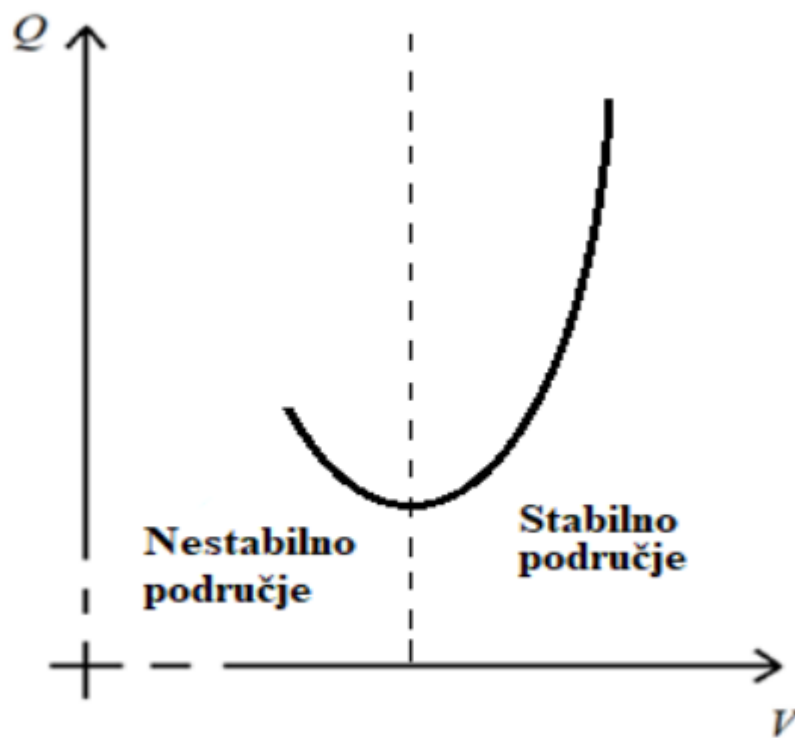


Slika 3.2. Prikaz P-V krivulje [26]

## Q-V krivulje

Q-V krivulje se upotrebljavaju pri analizi margina naponske stabilnosti, margina naponske stabilnosti je definirana kao udaljenost radne točke od točke kritičnog napona. Ovisnost napona s obzirom na reaktivnu snagu prikazuje se Q-V krivuljama [25]. Na slici 3.3 prikazana je Q-V krivulja, dno krivulje predstavlja granicu stabilnosti te minimum reaktivne snage za održiv pogon, lijevi dio predstavlja naponsku nestabilnost, a desni dio naponsku stabilnost.

Q-V krivulje se razvijaju za sabirnice koje su najpodložnije naponskom slomu.



Slika 3.3. Prikaz Q-V krivulje [23]

### 3.2.2. Stabilnost upravljačkog sustava

Problemi sa ovakvom vrstom stabilnosti mogu se pojaviti zbog neadekvatnih upravljačkih shema (npr. harmonička rezonancija paralelnih DER-ova) i/ili lošeg podešavanja jednog ili više uređaja



za upravljanje. Loše podešeni upravljački sustavi su primarni uzroci tj. izvori nestabilnosti dok se ponovno adekvatno ne podeše ili ne odspoje od ostatka sustava. Ova vrsta stabilnosti odnosi se na električne strojeve i pretvarače [22].

1.) Stabilnost električnih strojeva: Uobičajeno, ove vrsta stabilnosti se odnosi na sposobnost sinkronih strojeva da se vrate u sinkronizam s ostatkom sustava nakon kutnog ubrzanja tijekom kvara. Međutim, ovakvi problemi nisu primijećeni u mikromrežama. Na primjer, zbog prirode impedancije mikromreža, sinkroni strojevi mogu usporiti tijekom kratkih spojeva ako dođe do kvara na vodovima što je dokazano s eksperimentalnim rezultatima raspravljanim u [22].

2.) Stabilnost pretvarača : u mikromrežama pretvarači su skloni i malim i velikim poremećajima stabilnosti.. Suprotno niskofrekvencijskim oscilacijama u konvencionalnim EES, u mikromrežama se mogu pojaviti visokofrekvencijske oscilacije u rasponu od nekoliko Hz do nekoliko kHz [22], a ovaj se fenomen naziva harmonička nestabilnost.

### **3.3. Veliki nasuprot malim poremećajima**

U kontekstu mikromreža, veliki poremećaji se smatraju kratki spojevi, neplanirani prelazi na otočni način rada, ispadi generatora. Veliki poremećaji mogu rezultirati s velikim promjenama napona i frekvencije i promjenama snage između DER-ova [27]. Pravilna koordinacija snaga između DER-ova i vremena trajanja odziva njihovih regulatora od ključne su važnosti za zadržavanje stabilnosti sustava [6]. U smislu vremenskog trajanja, veliki poremećaji su kratkotrajna pojava, tj. u trajanju od nekoliko sekundi. Važno je napomenuti da planirano prebacivanje na otočni rad rezultira znatno manjim promjenama napona i frekvencije, budući da se vođenje DER-ova prilagođavaju s prethodnim otočnim radom. Kada se dogodi ovaj prijelaz, jedan od DER-ova u otočnom radu trebao bi biti u funkciji regulacije frekvencije mreže. Vremensko kašnjenje kod ovakvih događaja koje može potrajati i nekoliko perioda naglašava kompleksnost održavanja stabilnosti mikromreža, te predstavlja poseban problem kada je otočni rad neplaniran jer mikromreža ima jako malu ili nema inerciju uopće. Nadalje, ova pojava može rezultirati pojavom prenapona ili preniskih napona trajanja nekoliko perioda odnosno aktivacijom podnaponske ili prenaponske zaštite pretvarača čime će se dodatno pogoršati aspekti stabilnosti [28].

Mali poremećaji su promjene opterećenja sustava koja se konstantno događaju i sustav im se mora stalno prilagođavati. Ovisno o uzroku, mali poremećaji mogu biti ili kratkotrajne ili dugotrajne pojave. Na primjer, loša koordinacija raspodjele snage između distribucijskih energetskih izvora može dovesti do neprigušenih oscilacija koje brzo prelaze prihvatljive granice. S druge strane,

značajno opterećene mikromreže dugoročno mogu pokazati neprigušene oscilacije s malim promjenama opterećenja [28].

Manifestacija problema stabilnosti u mikromreži je prikazana u tablici 3.3.1 :

Kategorija	Stabilnost upravljačkog sustava		Stabilnost i ravnoteža napajanja	
	Stabilnost električnih strojeva	Stabilnost pretvarača	Stabilnost napona	Stabilnost frekvencije
Uzrok	Loše podešavanje upravljačkih uređaja	Loše podešavanje upravljačkih uređaja, harmonička nestabilnost, neuspješnost sinkronizacije	Ograničenja snage DER-ova, neadekvatna opskrbljenost jalovom snagom, loša raspodjela jalove snage	Ograničenja DER-ova s aktivnom snagom, neadekvatna opskrbljenost aktivnom snagom, loša raspodjela aktivne snage.
Manifestacija	Nepriugušene oscilacije, aperiodički porasti /padovi napona i/ili frekvencije	Nepriugušene oscilacije, visokofrekventne oscilacije	Velike promjene snage, visoki istosmjerni naponi	Niska pogonska frekvencija, velike promjene snage i frekvencije .

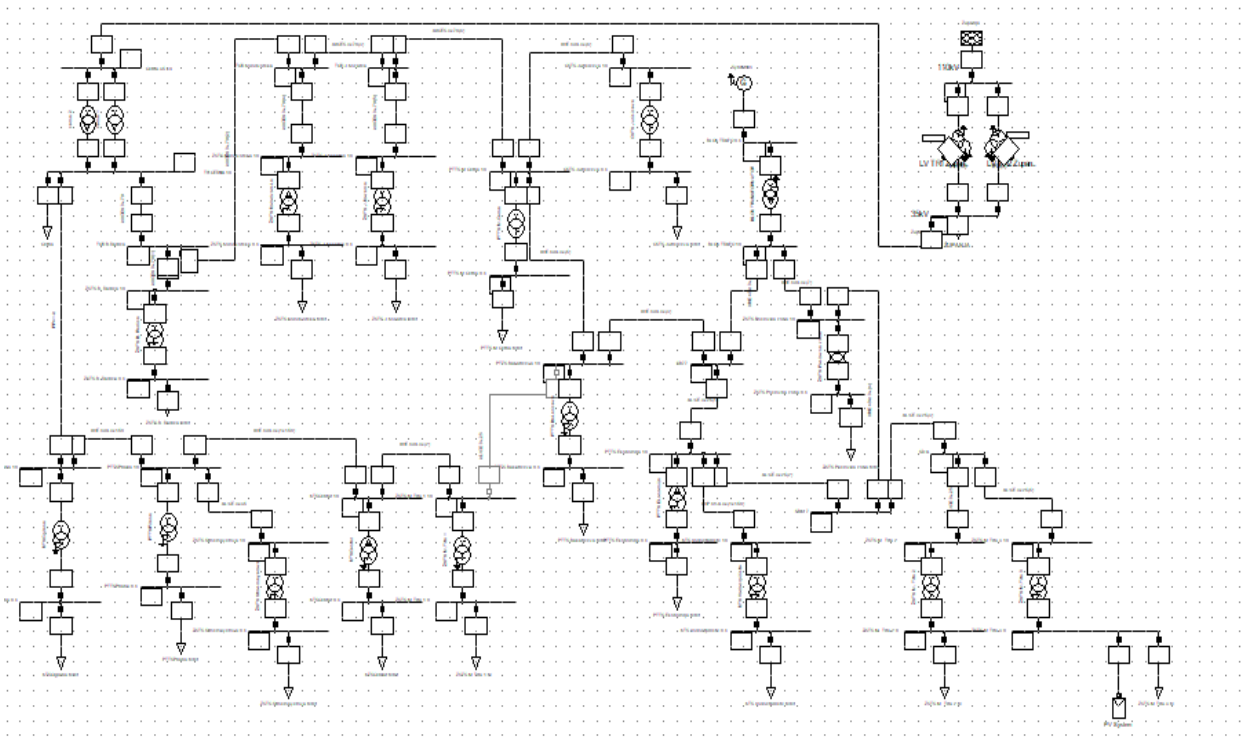
Tablica 3.3.1. Prikaz uzroka i manifestacija raznih tipova problema stabilnosti u

mikromrežama [27]

## 4. ANALIZA NAPONSKE STABILNOSTI MIKROMREŽE U DIgSILENT PowerFactory SUČELJU

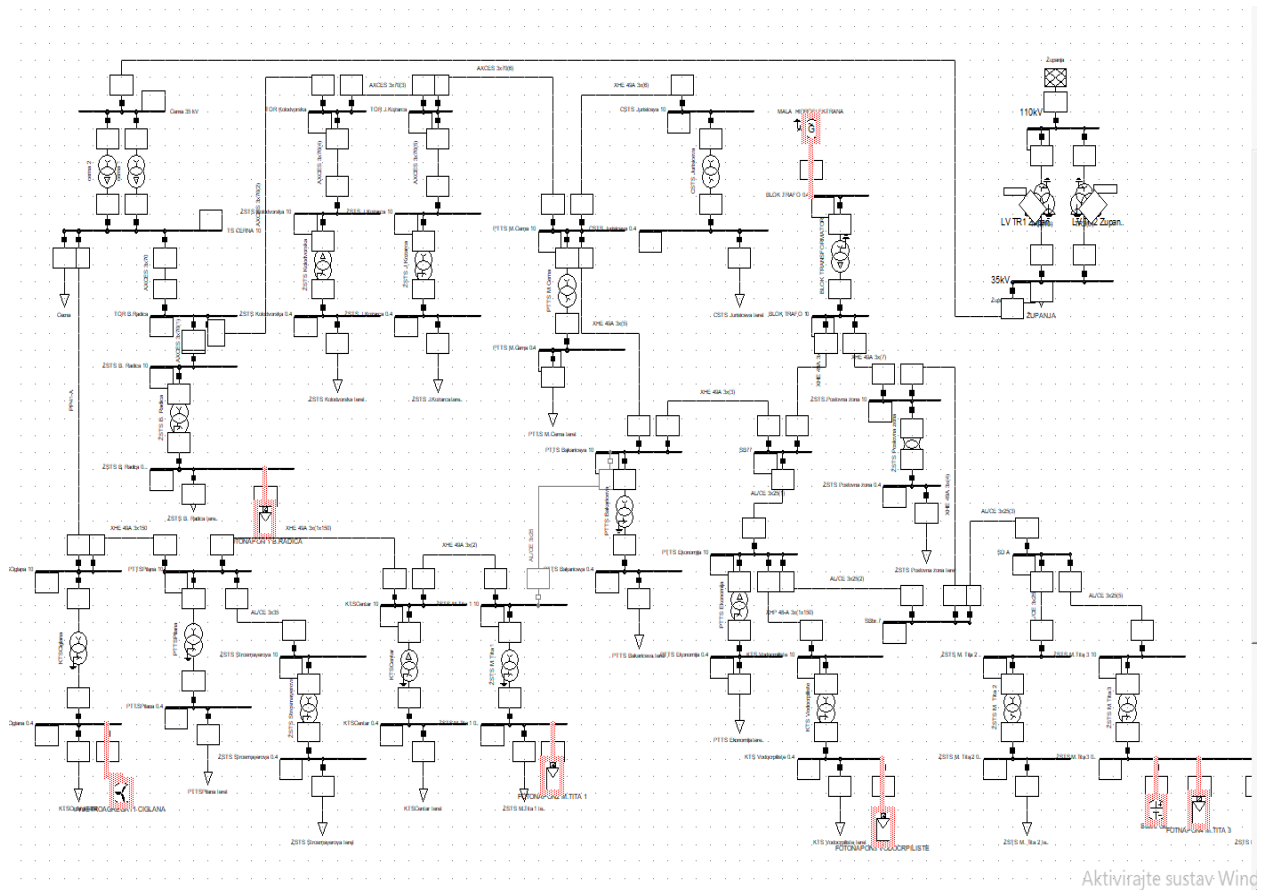
### 4.1. Model mreže

Model mreže u DIgSILENT PowerFactory prema kojem je rađena simulacija prikazan je na slici 4.1. Na ovaj model će biti dodani još obnovljivi izvori što je prikazano na slici 4.2. Promatrati će P-V i Q-V krivulja, gubici, tokovi djelatne i jalove snage prije i poslije priključenja DER-ova-



Slika 4.1. Model mreže u DIg SILENT-u bez priključenih DER-ova

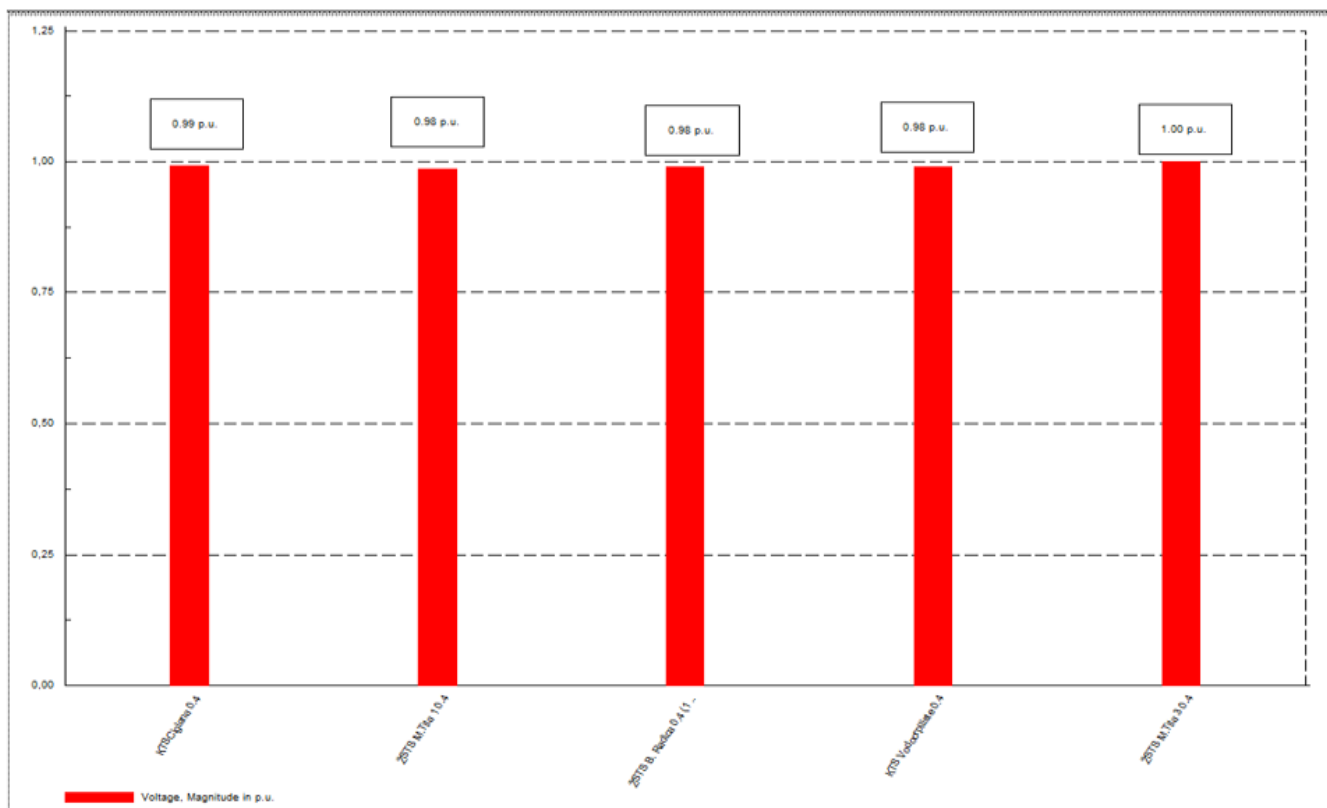
Na slici 4.2 vidi se model mreže nakon priključenja DER-ova koji su na slici označeni crvenom bojom, prikazane su 4 fotonaponske elektrane od kojih je jedna u sklopu sa baterijom koja nadopunjuje proizvodnju iz fotonapona, jedan vjetroagregat te mala hidroelektrana. U prilogu na kraju rada prikazan je zorniji prikaz točnih mjesta odnosno razmještaja koji je izvor na kojoj sabirnici.



Slika 4.2. Model mreže nakon priključenja DER-ova

## 4.2 Tokovi snaga i dijagrami napona

Prije priključenja DER-ova, sagledane su naponske prilike u mreži, uz nominalnu potrošnju. Na slici 4.2 vidi se dijagram napona na sabirnicama na koje će biti priključeni DER-ovi



Slika 4.3 Dijagrami napona na sabirnicama na kojima se planira priključenje DER-ova

Sabirnice na koje će biti priključeni distribuirani izvori nemaju narušena naponska ograničenja

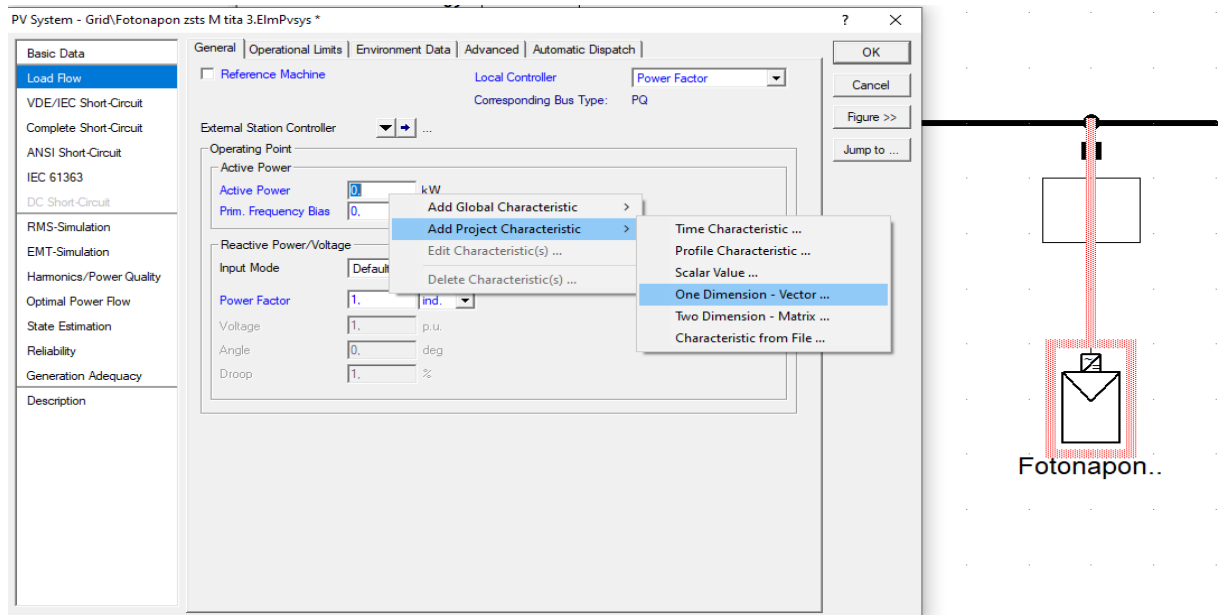
Sa grafikona se vidi da su svi naponi unutar dozvoljenih granica odstupanja. Najveće vrijednosti napona se javljaju kod sabirnicama najbližih mjestu na kojemu je mikromreža povezana sa elektroenergetskih sustavom. Udaljavajući se od sabirnica s kojima je mikromreža povezana sa elektroenergetskih sustavom, napon se smanjuje i najmanja vrijednost se javlja na sabirnicama najudaljenih potrošača.

## 4.3 Postavljanje proizvodne karakteristike distribuiranih izvora

U ovom poglavlju će se prikazivati na koji način se kod fotonaponskih elektrana postavlja satna proizvodnja te oblik krivulje proizvodnje fotonaponske elektrane, te skladištenja i proizvodnje iz

baterijskog sklopa koji nadopunjuje odnosno nadomješta proizvodnju iz fotonaponske elektrane kada ona ne proizvodi električnu energiju. Iduće slike će prikazivati način dodavanja satne proizvodnje na fotonaponsku elektranu u programskom alatu DIgSILENT.

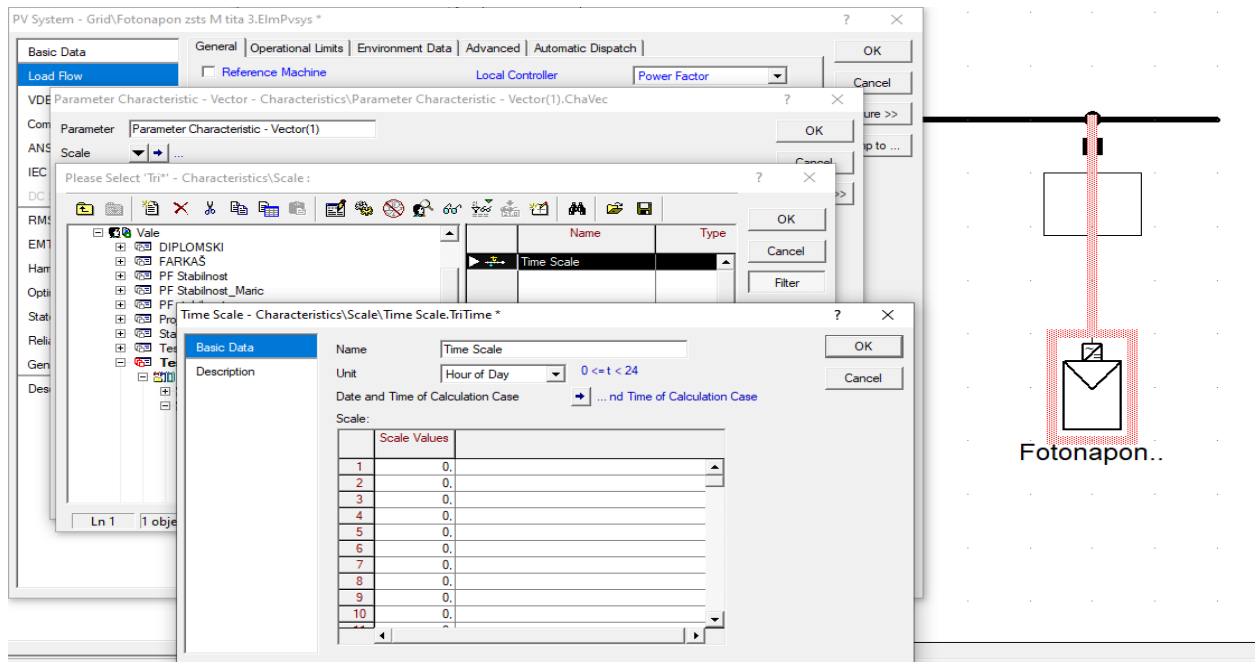
Dvostrukim klikom na fotonaponski modul te u dijaloškom okviru koji nam se otvara odabiremo „load flow“, zatim u „active power“ desnim klikom odabiremo „add project characteristics“ te „one dimensional-vector“, kao na slici 4.4.



Slika 4.4. Dodavanje satne proizvodnje fotonaponskoj elektrani

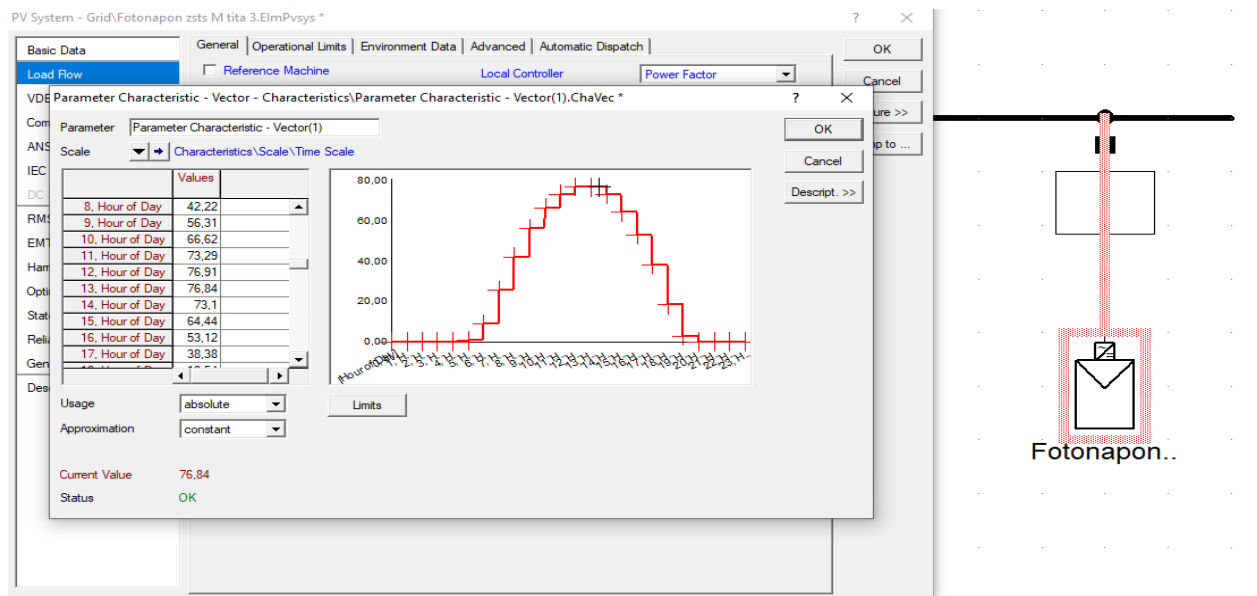
Nakon odabranog „one dimensional vectora“, u dijaloškom okviru odabiremo „new object“, te u novom dijaloškom okviru odabiremo „time scale“, zatim dobivamo izgled kao na slici gdje odabiremo „hours of day“ i unosimo vrijednosti koje želimo, bitno je napomenuti da prvi sat

kreće od 0 a ne od 1 te da imamo onda 23 redka a ne 24.



Slika 4.5. Dodavanje satne proizvodnje fotonaponskoj elektrani korak 2

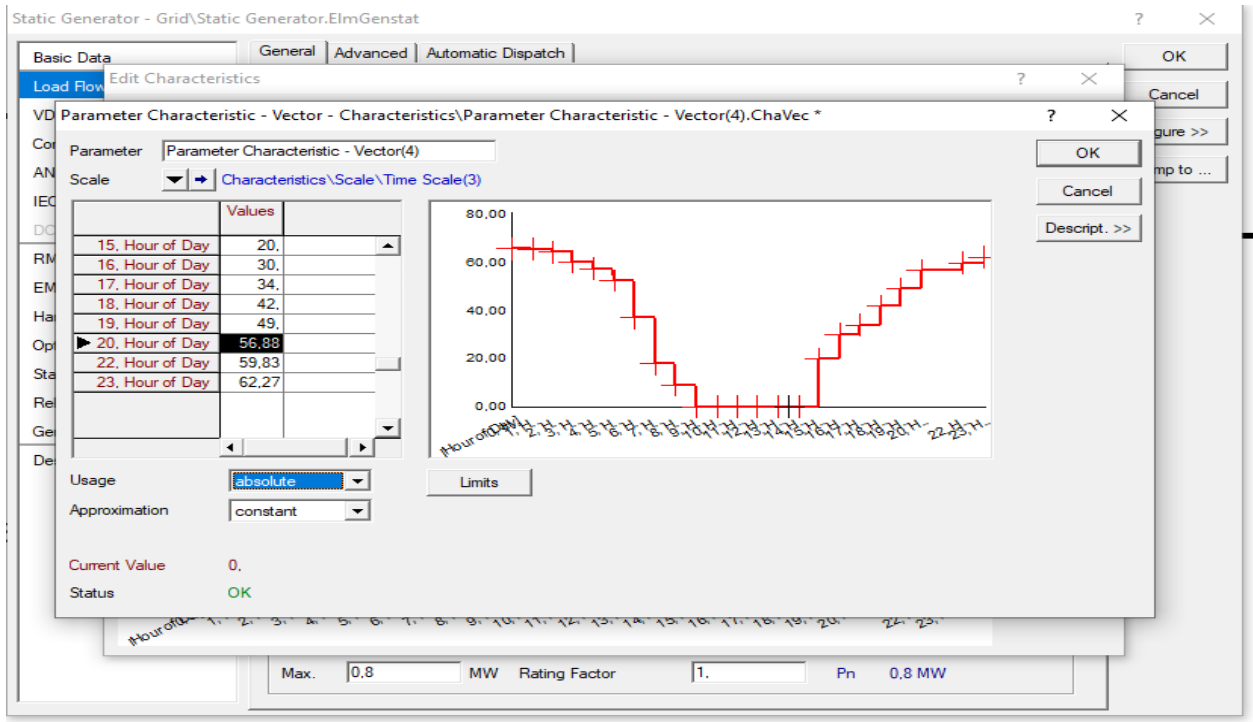
Nakon što smo postavili „scale values“ za dnevnu proizvodnju unosimo proizvodnju koju želimo te nakon toga dobivamo i krivulju proizvodnje fotonaponske elektrane koja izgleda kao na slici 4.6.



Slika 4.6. Dodavanje satne proizvodnje i izgled krivulje proizvodnje fotonaponske elektrane

Postupak ćemo ponoviti za sve fotonaponske module u mreži sa različitim podacima proizvodnje koje ćemo kasnije definirati i prikazati i u tablici 4.

Na slici 4.7. imamo prikaz satne proizvodnje iz baterije koja je spojena sa fotonaponskom elektranom te se po karakteristici jasno vidi da proizvodnja baterije nadopunjuje proizvodnju iz fotonaponske elektrane, odnosno kada nam fotonaponska elektrana daje maksimalnu energiju baterija je isključena.



Slika 4.7. Parametriranje baterije

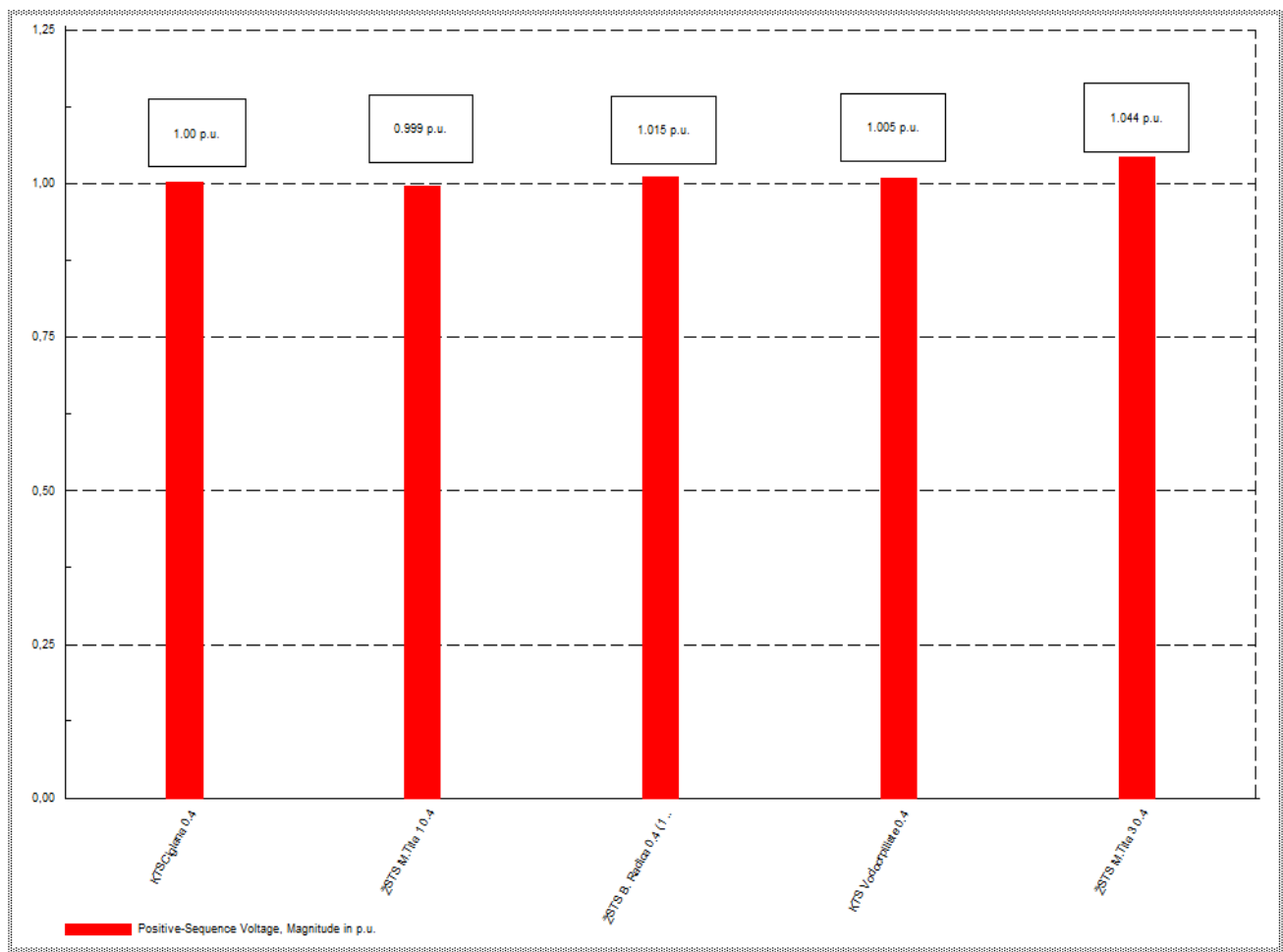


U tablici 4 biti će prikazane sve vrijednosti satne proizvodnje FN-a, i to tako da oznake predstavljaju : PG1→ ŽSTS B. Radica 0.4 PG2→ŽSTS M.Tita 1

PG3→ Vodocrpiliste 0.4 PG4→ ŽSTS M.Tita 3

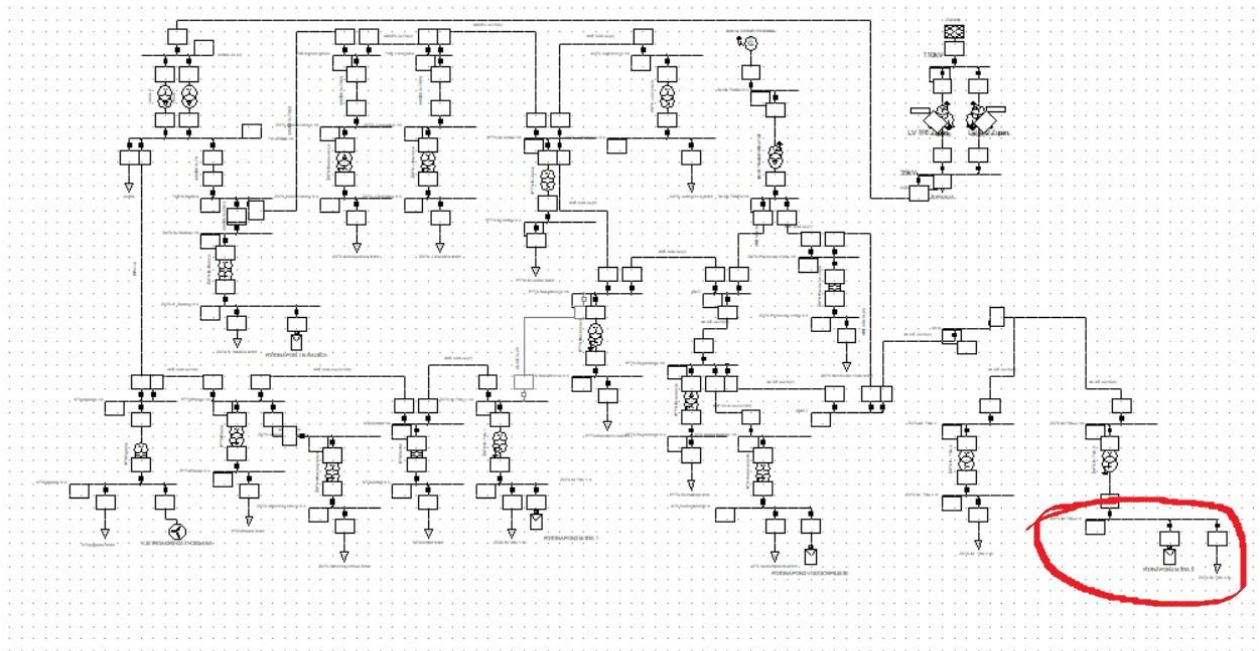
Vrijeme [h]	PG 1 [kW]	PG 2 [kW]	PG3 [kW]	PG4 [kW]
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,84	0,59	0,51	0,66
6	7,80	7,11	6,21	4,12
7	22,44	20,42	18,78	22,14
8	44,11	32,78	28,64	40,14
9	55,31	43,22	38,32	50,93
10	65,70	52,31	45,54	60,71
11	72,22	57,73	52,24	68,34
12	75,80	60,53	52,76	72,70
13	75,71	60,47	52,88	73,18
14	72,80	57,57	52,23	71,29
15	66,61	50,52	44,24	65,20
16	55,97	41,38	35,23	58,00
17	39,70	32,66	25,78	32,18
18	20,20	13,33	11,77	13,13
19	3,10	2,12	2,03	2,10
20	0,00	0,00	0,00	0,00
21	0,00	0,00	0,00	0,00
22	0,00	0,00	0,00	0,00
23	0,00	0,00	0,00	0,00

Tablica 4.1. Satna proizvodnja FN-a



Slika 4.8. Dijagrami napona na sabirnicama nakon priključenja DER-ova

Nakon priključenja distribuiranih izvora na sabirnicama mikromreže se javlja povećanje napona. Najviši napon se javlja u zadnjem stupcu dijagrama napona, zbog najveće proizvodnje fotonaponske elektrane na sabirnici M.Tita3, što se može vidjeti u tablici 4 gdje se vidi prikaz satne proizvodnje svih fotonaponskih elektrana. Lokacija fotonaponske elektrane M.Tita3 je prikazana na slici 4.9. te je zaokružena na cjelokupnom modelu crvenom bojom. Podešeno je da vjetroagregat ima  $\cos \varphi = 0,9$  kapacitivno, te da proizvodi djelatnu snagu od 0,8 MW.



Slika 4.9. Lokacija fotonaponske elektrane

U tablici 4.2 . je prikazan iznos tokova snaga prije i poslije priključenja DER-ova :

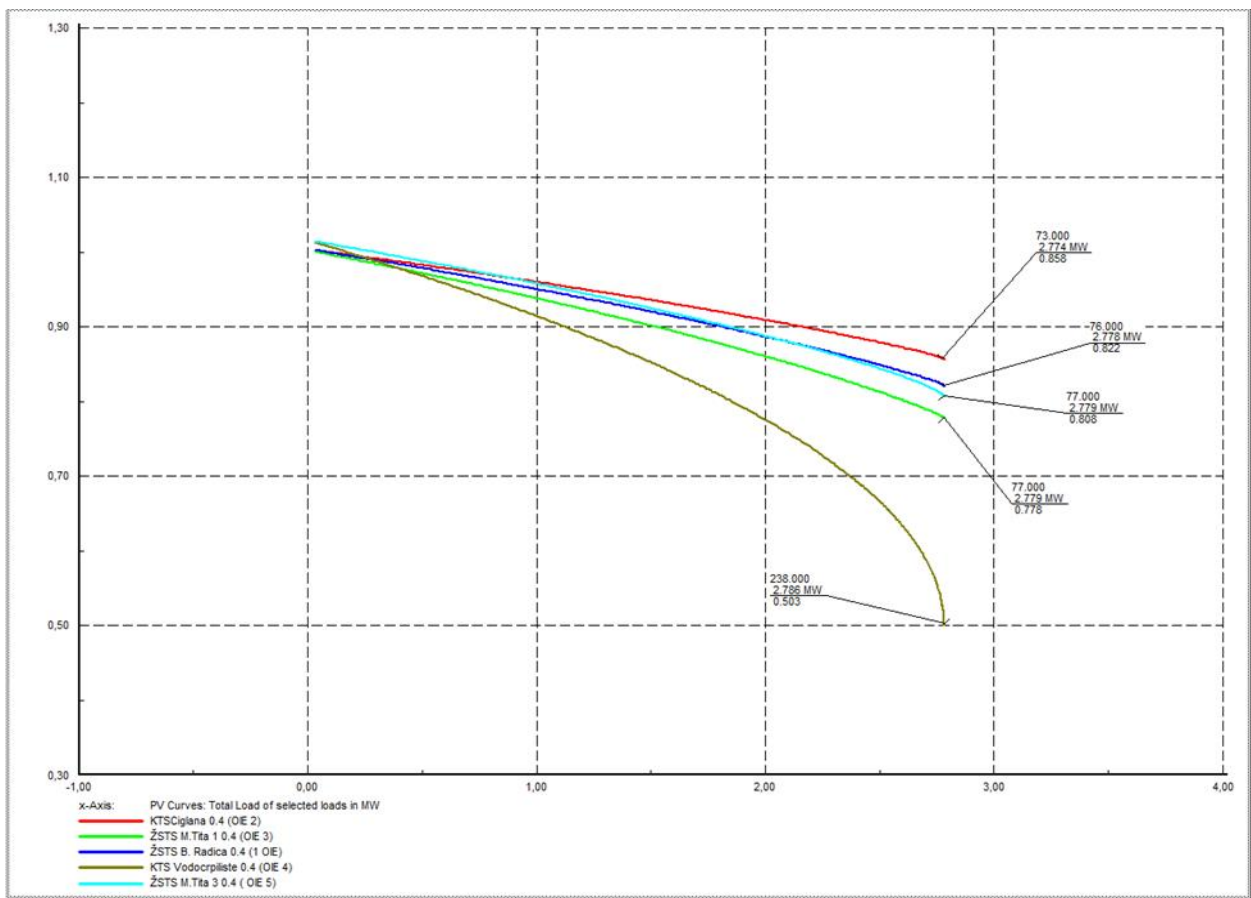
<b>Tokovi snaga</b>				
<b>Prije</b>			<b>Poslije</b>	
<b>Jedinice :</b>	<b>[MW]</b>	<b>[Mvar]</b>	<b>[MW]</b>	<b>[Mvar]</b>
Proizvodnja (generation)	1,06	0,0	2,44	0,00
Vanjska opskrba	18,05	8,37	16,68	8,21
Opterećenje P (U)	18,94	6,35	18,94	6,35
Opterećenje nazivno P (Un)	18,94	6,35	18,94	6,35
Gubitci (losses )	0,18	2,03	0,18	1,86
Utjecaj kapacitivnosti (line charging)	0,00	1,04	0,00	1,03
Instalirani kapacitet	1,45		3,39	

Tablica 4.2. Prikaz tokova snaga u mreži prije i poslije priključenja DER-ova

#### 4.4 Analiza PV i QV krivulja

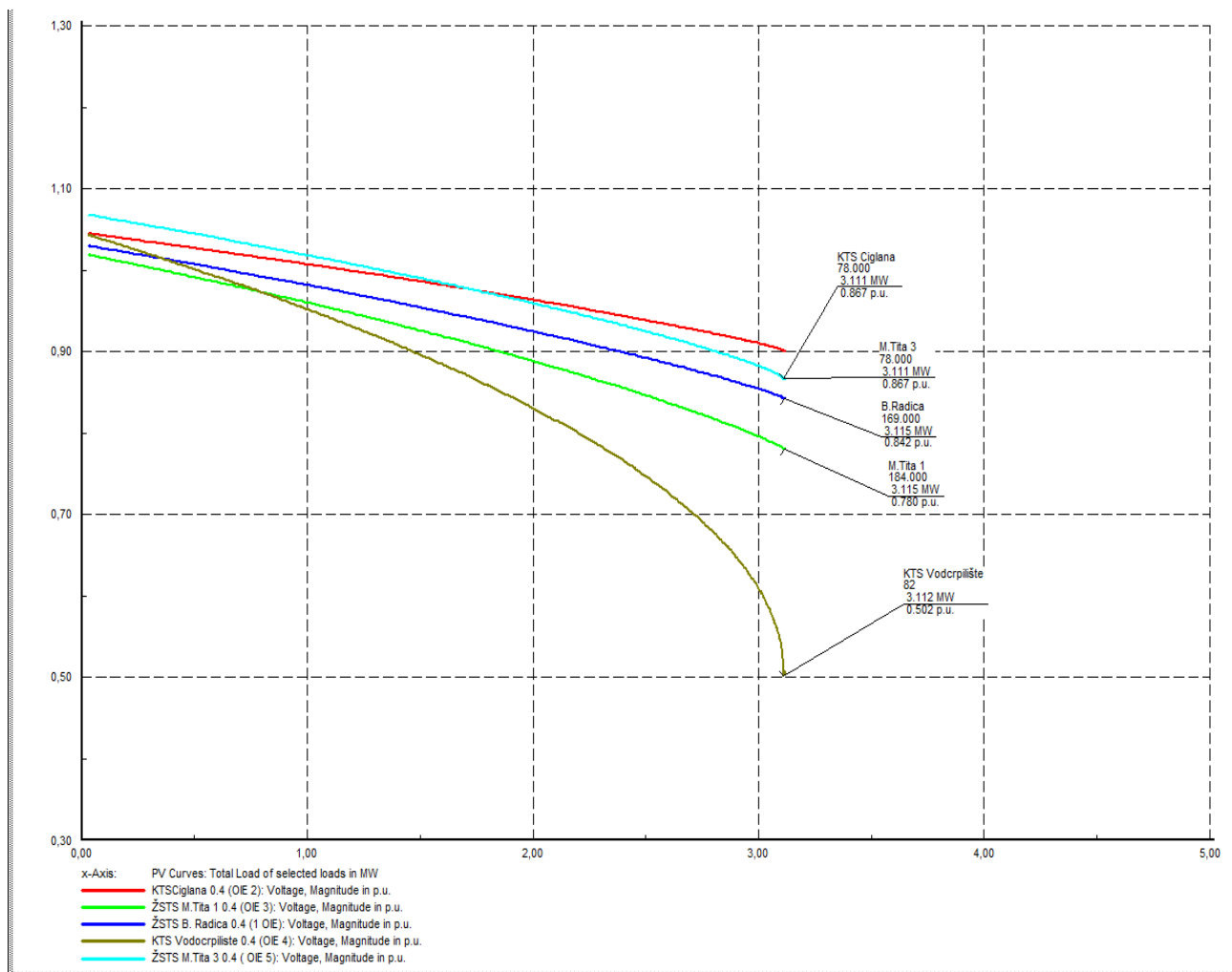
Slika 4.10. prikazuje P-V dijagram prije dodavanja DER-ova, iz krivulje možemo vidjeti ovisnost prenesene djelatne snage o naponu na sabirnicama, djelatna snaga potrošača se mijenja uz konstantan faktor snage što rezultira smanjenjem napona na potrošačkim sabirnicama, te nam to predstavlja nedostatak mikromreža. Rizik naponskog sloma se smanjuje udaljavanjem od točke kritičnog napona.

Slika 4.10. P-V krivulje na sabirnicama prije dodavanja DER-ova



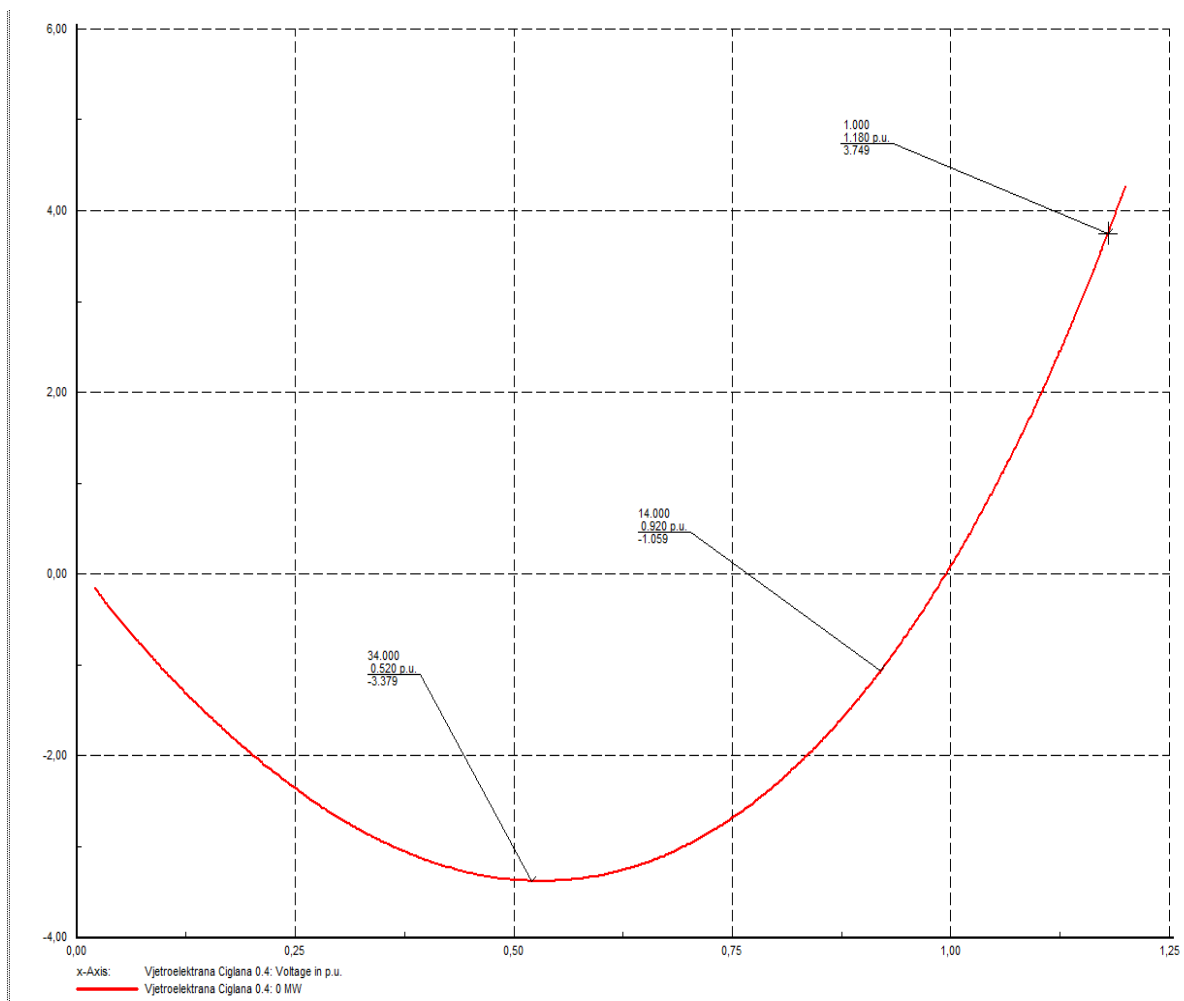
Slika 4.10 P-V krivulje na sabirnicama prije dodavanja DER-ova

Na slici 4.11. su prikazane P-V krivulje na sabirnicama nakon dodavanja distribuiranih izvora na sabirnice. Primjećuje se da se krivulja „produžila“ za svaku sabirnicu nakon dodavanja distribuiranih izvora što nam govori da nam točka kritičnog napona odnosno koljeno PV krivulje imaju veću vrijednost.



Slika 4.11. P-V krivulje na sabirnicama nakon dodanih DER-ova

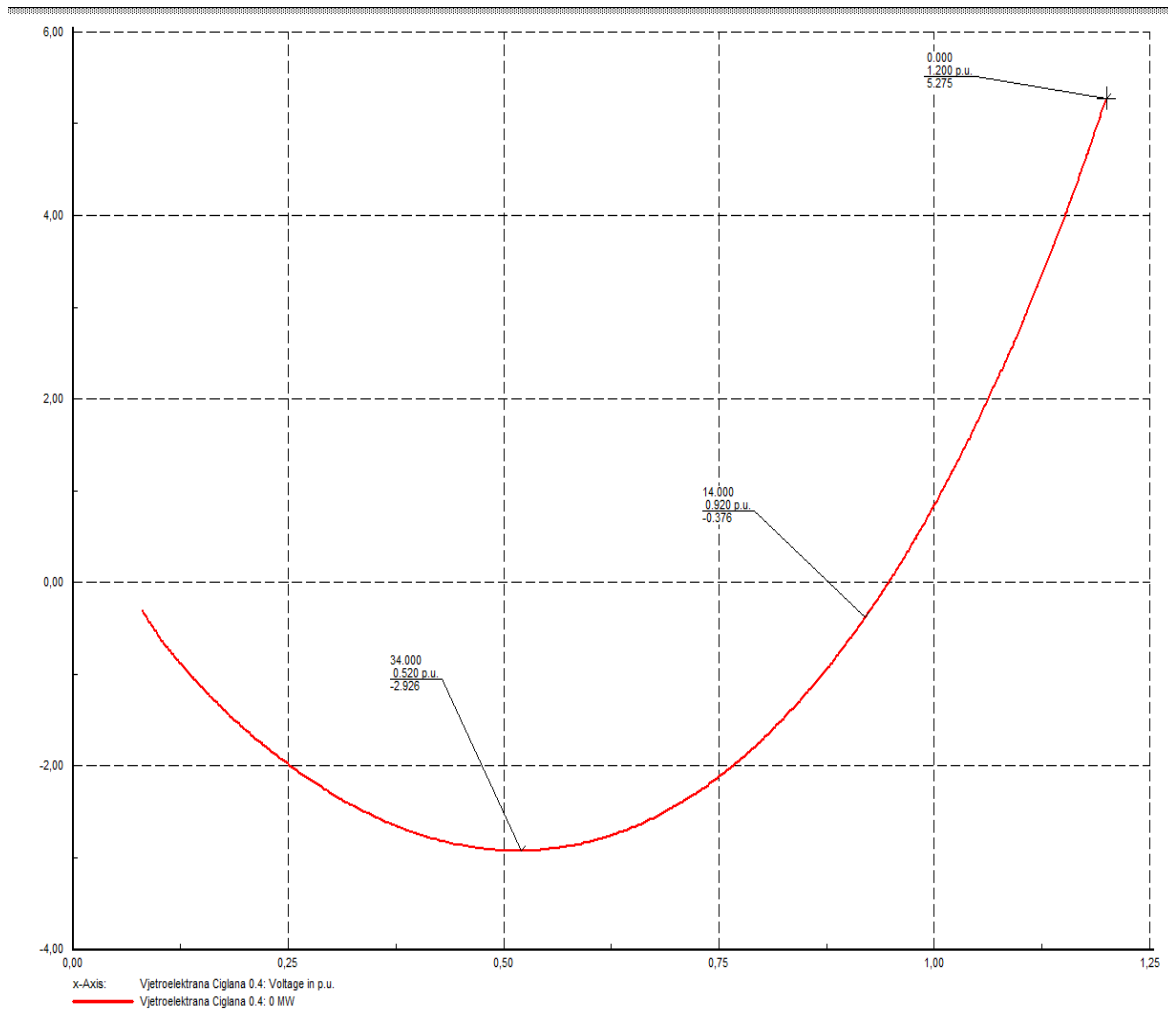
Na slici 4.12. prikazana je Q-V krivulja sabirnice, lokacija sabirnice prikazana je na slici 4.14. Pomoću Q-V krivulje određujemo udaljenost radne točke od točke kritičnog napona. Svaka Q-V krivulja prikazuje koliko jalove snage (Mvar) moramo dodati u sabirnički čvor kako bi napon u tom čvoru održali unutar zadanih granica pri konstantnoj injekciji radne snage.



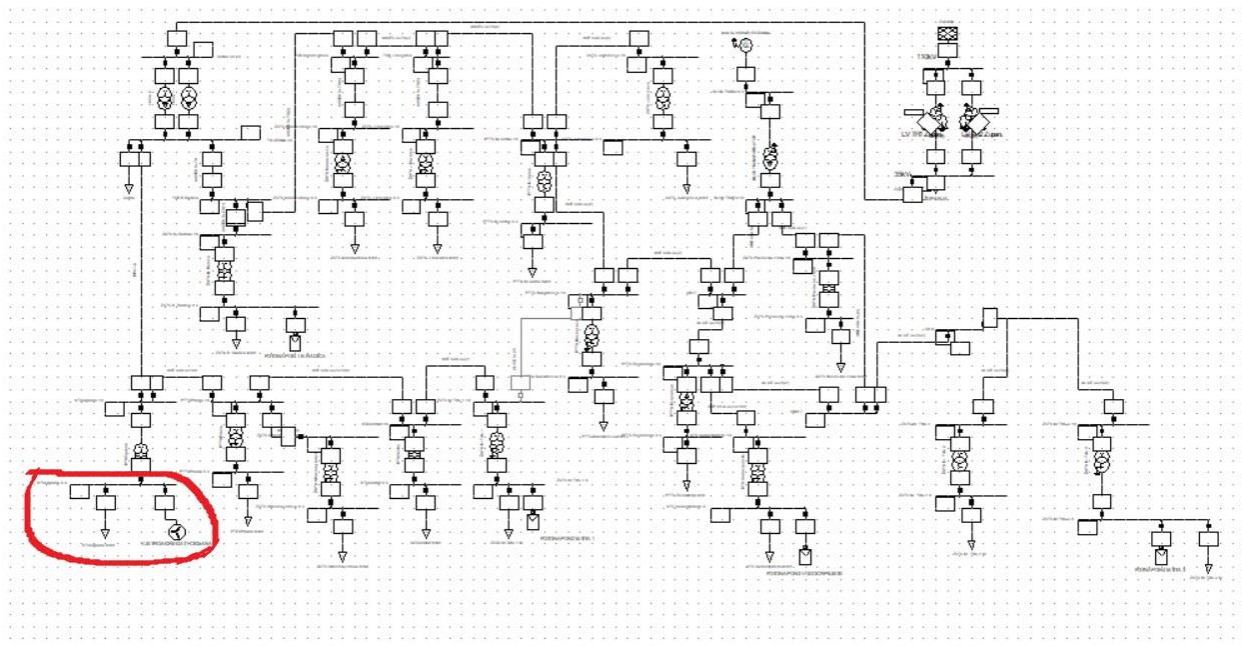
Slika 4.12. Q-V krivulja prije povećanja opterećenja

Dno Q-V krivulje predstavlja granicu stabilnosti. Točka na dnu krivulje je točka naponske nestabilnosti. Teret nam je u slučaju kao na slici 4.12 bio 0.135 MW i 0.048 Mvar-a.

Na slici 4.13 prikazana je Q-V krivulja sabirnice nakon povećanja opterećenja te sabirnice, teret nam je u ovom slučaju bio 0.725 MW i 0.2 Mvar-a, te imamo veći iznos jalove snage koju trebamo za očuvanje napona. Lokacija sabirnice prikazana je na slici 4.14.



Slika 4.13. Q-V krivulja nakon povećanja opterećenja



Slika 4.14. Lokacija sabirnice čija je Q-V krivulja prikazana



## 5. ZAKLJUČAK

Zadatak ovog rada bio je analizirati stabilnost sustava prije i nakon implementiranja distribuiranih izvora, kroz analizu iznosa napona na sabirnicama, P-V, Q-V krivulja na sabirnicama sustava na kojima su distribuirani izvori i postavljeni. U radu su odrađene teorijske osnove za P-V, Q-V krivulje, te je opisan način upravljanja mikromrežom. Rezultati analiza pokazuju da integracija distribuiranih generatora može značajno poboljšati naponske prilike distribuiranoj mreži (mikromreži). Iako mikromreža može raditi i u otočnom radu, iz praktičnog dijela zaključujemo kako je najbolje kada mikromreža radi spojena sa glavnom mrežom.

## LITERATURA

- [1] Primjenjivost mikromreža u distribucijskoj mreži HEP ODS-a. Živić Đurović, Marijana; Škrlec, Davor; Kezele, Bojan 2. Hrvatskog ogranka Međunarodne elektrodistribucijske konferencije (HO CIRED), svibanj 2010.
- [2] C. Li, S. K. Chaudhary, M. Savaghebi, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Power flow analysis for low-voltage ac and dc microgrids considering droop control and virtual impedance," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 6, pp. 2754–2764, Mar. 2016.
- [3] C. Yuen, A. Oudalov, and A. Timbus, "The provision of frequency control reserves from multiple microgrids," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 1, pp. 173–183, Jan. 2011.
- [4] A. Ipakchi and F. Albuyeh, "Grid of the future," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 7, no. 2, pp. 52–62, Apr. 2009.
- [5] A. H. Hajimiragha and M. R. D. Zadeh, "Research and development of a microgrid control and monitoring system for remote community of bella coola: Challenges, solutions, achievements and lessons learned," in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Smart Ener. Grid. Eng. (SEGE)*, Aug. 2013, pp. 1–6.
- [6] K. Strunz, E. Abbasi, C. Abbey, C. Andrieu, U. Annakkage, S. Barsali, R. C. Campbell, R. Fletcher, F. Gao, T. Gaunt, A. Gole, N. Hatziargyriou, R. Iravani, G. Joos, H. Konishi, M. Kuschke, E. Lakervi, C. Liu, J. Mahseredjian, F. Mosallat, D. Muthumuni, A. Orth, S. Papathanassiou, K. Rudion, Z. Styczynski, and S. C. Verma, "Benchmark systems for network integration of renewable and distributed energy resources," *CIGRE*, Paris, France, Tech. Rep. C6.04.02, Apr. 2014.
- [7] M. Farrokhbadi, S. Konig, C. Cañizares, K. Bhattacharya, and T. Leibfried, "Battery energy storage system models for microgrid stability analysis and dynamic simulation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 2, pp. 2301–2312, Aug. 2017.
- [8] C. Burgos-Mellado, C. Hernandez-Cariman, R. Cardenas, D. Saez, M. Sumner, A. Costabeber, and H. K. Morales Paredes, "Experimental evaluation of a CPT-based four-leg active power compensator for distributed generation," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 5, no. 2, pp. 747–759, June 2017.
- [9] D. Mah, P. Hills, V. O. K. Li, R. Balme, *Smart Grid Applications and Developments*, Springer-Verlag, 2014. Godine,
- [10] D. W. Gao, *Energy Storage for Sustainable microgrid* 2015. Elsevier Ltd.
- [11] M.F. Zia, E. Elbouchikhi, M. Benbouzid, *Microgrids energy management systems: a critical review on methods, solutions, and prospects*, *Appl. Energy* 222, str.1033-1055, 2018.godine, dostupno na : : <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.103>,

- [12] j. Driesen, F.Katiraei: „ Design for Distributed Energy Resources“, IEEE Power & Energy, Volume 6,Number 3, Svibanj/Lipanj 2008.p.p 30.-39.
- [13] “Distributed generation technical interconnection requirements: Interconnections at voltages 50kV and below,” Hydro One Networks Inc., Toronto, Ontario, Tech. Rep. DT-10-015 R3, Mar. 2013.
- [14] A. Bernstein, J. L. Boudec, L. Reyes-Chamorro, and M. Paolone, “Realtime control of microgrids with explicit power setpoints: Unintentional islanding,” in Proc. IEEE PowerTech, Eindhoven, Netherlands, July 2015, pp. 1–6.
- [15] G. Dellile, B. Francois, and G. Malarange, “Dynamic frequency control support by energy storage to reduce the impact of wind and solar generation on isolated power system’s inertia,” IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 3, no. 4, pp. 931–939, Oct. 2012
- [16] A. H. Hajimiragha, M. R. Dadash Zadeh, and S. Moazeni, “Microgrids frequency control considerations within the framework of the optimal generation scheduling problem,” IEEE Trans. Smart Grid, vol. 6, no. 2, pp. 534–547, Mar. 2015
- [17] N. Pogaku, M. Prodanovic, and T. C. Green, “Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 22, no. 2, pp. 613–625, Mar. 2007.
- [18] M. Farrokhhabadi, C. A. Canizares, and K. Bhattacharya, “Frequency ~ control in isolated/islanded microgrids through voltage regulation,” IEEE Trans. Smart Grid, vol. 8, no. 3, pp. 1185–1194, Oct. 2015.
- [19] ] NERC Transmission Issues Subcommittee and System Protection and Control Subcommittee, “A technical reference paper fault-induced delayed voltage recovery,” North American Electric Reliability Corporation, Princeton, NJ, Tech. Rep. 1.2, June 2009.
- [20] B. Solanki, C. A. Canizares, and K. Bhattacharya, “Practical energy ~ management systems for isolated microgrids,” IEEE Trans. Smart Grid, pp. 1–14, in press.
- [21] C. K. Sao and P. W. Lehn, “Autonomous load sharing of voltage source converters,” IEEE Trans. Power Del., vol. 20, no. 2, pp. 1009–1016, Aug. 2016.
- [22] R. Belkacemi, S. Zarrabian, A. Babalola, and R. Craven, “Experimental transient stability analysis of microgrid systems: Lessons learned,” IEEE Trans. Power Del., vol. 28, no. 4, pp. 2428 – 2436, Oct. 2013.

- [23] Marwa A. Abd El-Hamid, Noha H.El.Amary, Voltage Instability Prediction Using Artificial Immunity System, International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 4, Issue 11, November-2013 559
- [24] P. Kundur, Power System Stability and Control, Electric Power Research Institute, McGrawHill, Inc. USA, 1994
- [25] Prabha Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw Hill, Inc, New York, 1994.;Bulent Aydin, "Voltage Security Assessment using PV and QV Curves", Master's Thesis, T.C.BAHÇEŞEHİR ÜNİVERSİTESİ, Istanbul, 2008
- [26] Marwa A. Abd El-Hamid, Noha H.El.Amary, Voltage Instability Prediction Using Artificial Immunity System, International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 4, Issue 11, November-2013 559
- [27] Microgrid Stability Definitions, Analysis, and Examples, IEEE Transaction on power systems, revised and resubmitted April 2019
- [28] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, ~ N. Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. V. Cutsem, and V. Vittal, "Definition and classification of power system stability," IEEE Trans. Power Syst., vol. 19, no. 2, pp. 1387–1401, May 2004.

## **SAŽETAK**

U radu je opisana mikromreža te problematika koja ide uz povezivanje mikromreže s elektroenergetskim sustavom. Definirana je stabilnost u mikromrežama te klasifikacija iste, gdje je detaljnije razrađena naponska stabilnost te u simulaciji promatrana naponska stabilnost prije i nakon implementiranja distribucijskih energetske izvora u programu DIgSILENT PowerFactory.

## **ABSTRACT**

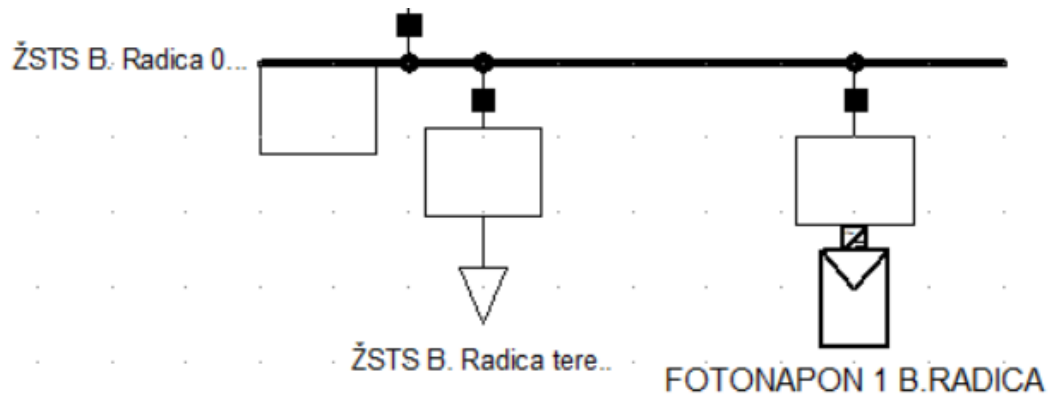
The paper describes the microgrid and the problems that go along with connecting the microgrid with the power system. Stability in microgrids was defined and its classification, where voltage stability was elaborated in more detail, and voltage stability was observed in the simulation before and after the implementation of distribution energy sources in the DIgSILENT PowerFactory program.

## **ŽIVOTOPIS**

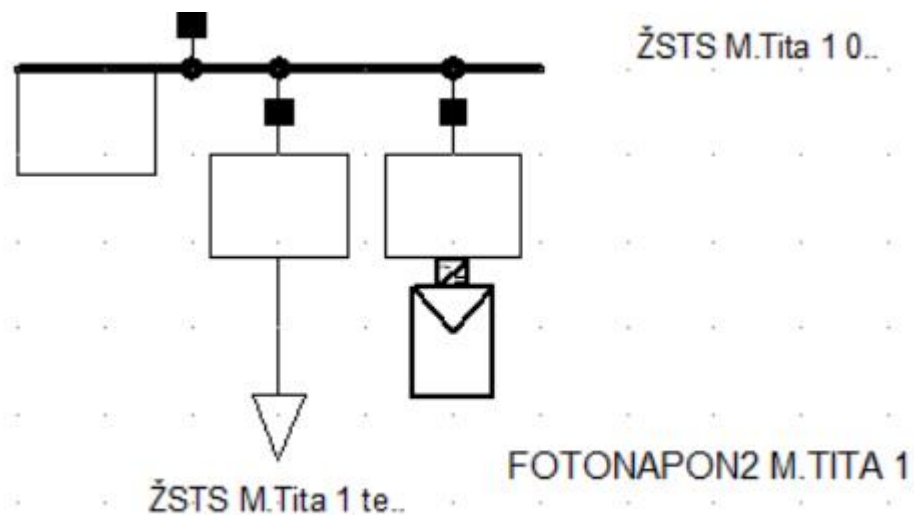
Valentin Farkaš rođen 1995. godine u Požegi. Srednju Tehničku školu upisuje 2010. godine smjer tehničar za mehatroniku koju završava 2014. Te iste godine upisuje fakultet u Osijeku, smjer elektrotehnika gdje bira smjer elektroenergetika. Godine 2018. Završava preddiplomski studij elektrotehnike te upisuje diplomski studij elektroenergetika te izborni blok industrijska elektrotehnika.

## PRILOZI

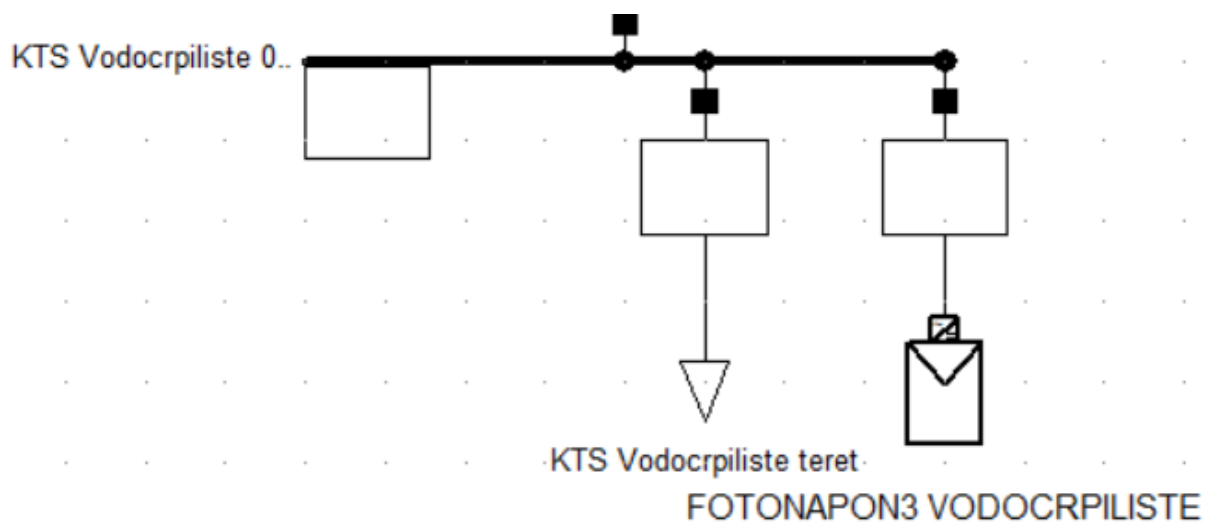
U priložima su postavljene slike koje pomnije prikazuju pojedine dijelove modelirane mikromreže te sabirnice na kojima su postavljani distribuirani izvori iz modela sa slike 4.2.



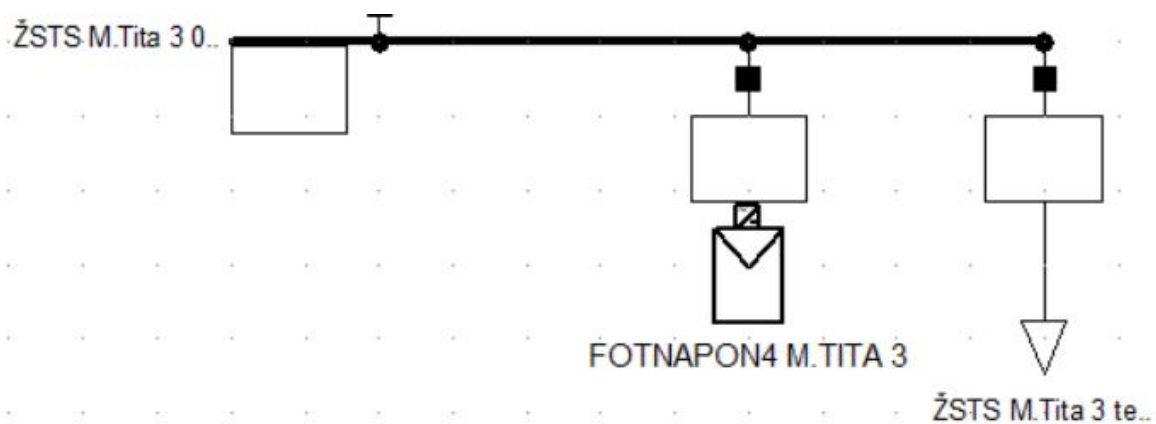
Slika P.1. Prikaz fotonaponske elektrane na sabirnici B. Radica



Slika P.2. Prikaz fotonaponske elektrane na sabirnici M.Tita 1

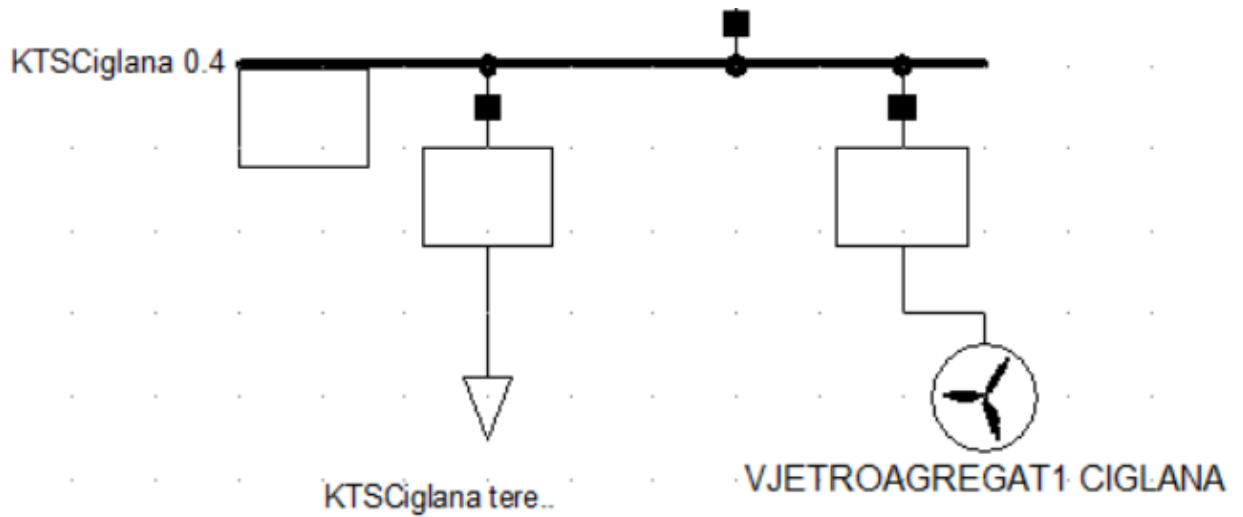


Slika P.3. Prikaz fotonaponske elektrane na sabirnici Vodocrpiliste

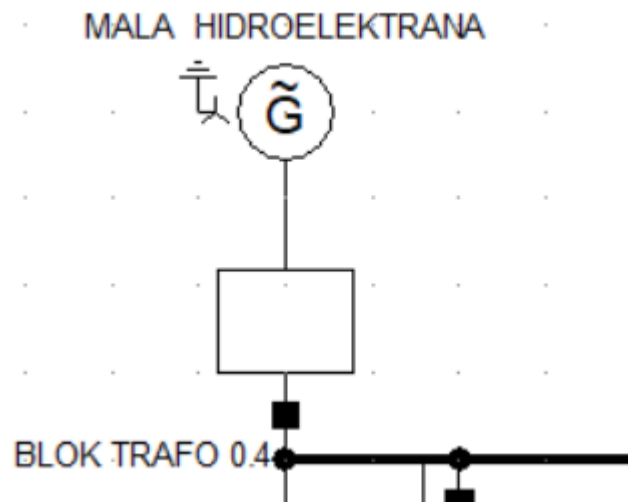


Slika P.4. Prikaz fotonaponske elektrane na sabirnici M.Tita 3





Slika P.5. Prikaz vjetroagregata na sabirnici Ciglana



Slika P.6. Prikaz Male hidroelektrane na sabirnici BLOK TRAF0 0.4