

# Analiza i prijedlog postavki zaštita OIE spojenih preko inverteruskog sučelja

---

Nedić, Fran

Master's thesis / Diplomski rad

2024

*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:200:641982>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-27**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni studij**

**ANALIZA I PRIJEDLOG POSTAVKI ZAŠTITA OIE  
SPOJENIH PREKO INVERTERSKOG SUČELJA**

**Diplomski rad**

**Fran Nedić**

**Osijek, 2024.**

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
1.1. Zadatak diplomskog rada .....	2
<b>2. PREGLED PODRUČJA TEME</b> .....	<b>3</b>
<b>3. UTJECAJ INTEGRACIJE ELEKTRANA IZ OIE NA PODEŠENJA ZAŠTITE ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA</b> .....	<b>7</b>
<b>3.1. Utjecaj distribuirane proizvodnje</b> .....	<b>7</b>
<b>3.2. Utjecaj i problemi zaštite nastali zbog distribuiranih izvora energije</b> .....	<b>8</b>
3.2.1. Struje kratkog spoja .....	8
3.2.2. Otočni pogon .....	12
3.2.3. Smanjenje dosega impedancijskih releja .....	14
3.2.4. Dvosmjerni tokovi snaga .....	14
3.2.5. Karakteristika napona .....	15
3.2.6. Automatski ponovni uklop (APU) .....	15
3.2.7. Ferorezonancija .....	16
3.2.8. Uzemljenje .....	16
<b>3.3. Vrste zaštite za distribuirane OIE</b> .....	<b>16</b>
<b>4. ANALIZA I PRIJEDLOG PODEŠENJA ZAŠTITE ZA OBNOVLJIVE IZVORE ENERGIJE SPOJENE PREKO INVERTERSKIH SUČELJA</b> .....	<b>22</b>
<b>4.1. Razlike između parametiranja nadstrujne zaštite između konvencionalnih sinkronih generatorskih i vjetroagregata spojenih preko inverterskog sučelja</b> .....	<b>24</b>
<b>4.2. Razlike između parametiranja podnaponske zaštite između konvencionalnih sinkronih generatorskih i vjetroagregata spojenih preko inverterskog sučelja</b> .....	<b>28</b>
<b>4.3. Razlike između parametiranja prenaponske zaštite između konvencionalnih sinkronih generatorskih i vjetroagregata spojenih preko inverterskog sučelja</b> .....	<b>33</b>
<b>4.4. Razlike između parametiranja nad / pod frekvencijske zaštite između konvencionalnih sinkronih generatorskih i vjetroagregata spojenih preko inverterskog sučelja</b> .....	<b>37</b>
<b>4.5. ROCOF (engl. <i>Rate of change of frequency</i>) zaštita obnovljivih izvora energije te prijedlog parametiranja zaštite od otočnog pogona</b> .....	<b>42</b>
<b>5. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>47</b>
<b>LITERATURA</b> .....	<b>49</b>



## 1. UVOD

Promjenjivi energetska miks je doveo do povećanja broja električnih generatora priključenih na distribucijsku mrežu. Spajanje bilo kakve distribuirane proizvodnje općenito povećava tokove snaga odnosno struje kvara koja se može disipirati tijekom kvarova koji su većinom kratkotrajni niskoomski spojevi između faza te zemljospoji. Takvi kvarovi uobičajeno rezultiraju brzim oslobađanjem energije pohranjene u inerciji spojenih generatora u obliku velikih struja kvara koje zauzvrat mogu dovesti do prekomjerne disipacije topline, nepoželjnih mehaničkih naprezanja mrežne opreme te dovesti do potencijalno opasnog porasta napona u mreži. Stoga, shema zaštite distribucijskog sustava ima zadatak isključiti najmanji mogući dio mreže koji sadrži kvar u najkraćem mogućem vremenu kako bi se najefikasnije zaštitila mrežna oprema te kako ne bi došlo do nepoželjnih posljedica te oštećenja opreme i ozljeda na radu. Točan izračun struje kvara u raznim dijelovima mreže te u pojedinim intervalima je ključno za ispravno podešenje postavki zaštitnih releja za siguran i ispravan rad prekidača te ostale mrežne opreme. Dobro je poznato da distribuirana proizvodnja spojena preko inverterskog sučelja smanjuje struju kvara s obzirom na konvencionalni rotirajući stroj slične nazivne snage, ali da se doprinos struji kratkog spoja distribuirane proizvodnje spojene preko inverterskog sučelja i dalje ne može zanemariti te mora biti uzet u obzir i uključen u izračun struje kratkog spoja. Kada su inverterska sučelja u mreži bila rijetka uobičajeno su se isključivala u uvjetima kvara te se njihov doprinos struji kvara mogao zanemariti, međutim dolaskom i širom upotrebom fotonaponskih i ostalih novih tehnologija mogu značajno utjecati na način na koji se mreža ponaša i reagira na kratki spoj i ostale kvarove u mreži. Tradicionalnom analizom kratkih spojeva, ponašanje generatora u slučaju kratkog spoja je predstavljeno jednostavnim linearnim ekvivalentnim modelima čiji parametri odražavaju uzbudu stroja te impedanciju namota. Tranzijentni period ponašanja tijekom kvara se uzima u obzir korištenjem različitih parametara ovisno o vremenskom periodu koji se promatra. Ako je u elektroenergetskom sustavu prisutno više generatora, onda je svaki od njih predstavljen i projektiran na isti način, bez obzira na vrstu kvara i njegovu udaljenost od mjesta kvara. Ponašanje distribuiranog generatora spojenog preko inverterskog sučelja na kvar u mreži ovisi uglavnom o njegovom upravljačkom sustavu, a ne o fizičkim parametrima. S druge strane, upravljački sustav pretvarača je specifičan s obzirom na njegovu primjenu. Štoviše, ovisno o njegovoj metodi ograničavanja struje, reakcija pretvarača na kvar ovisi o tome je li kvar koji se dogodio u mreži simetričan ili nesimetričan. Dodatna komplikacija nastaje pri izračunavanju struje kvara u mrežama koje sadrže više inverterskih sučelja u određivanju koji pretvarači osjete ograničenje struje, a koji ne.

Rad se sastoji od četiri poglavlja te je u prvom poglavlju prikazan uvod kao i zadatak te opis diplomskog rada. U drugom je poglavlju prikazan pregled područja teme. U trećem su poglavlju navedeni utjecaji distribuirane proizvodnje na elektroenergetski sustav, te se navode problemi pri parametriranju zaštite nastali zbog integracije obnovljivih izvora u mrežu. Isto tako, navode se vrste zaštite koje se koriste za distribuirane obnovljive izvore energije te način parametriranja same zaštite. Četvrto poglavlje se odnosi na model i parametre mreže koja je korištena za potrebe simulacije te analizu simulacijskih slučajeva u kojima se navode razlike između parametriranja zaštite za konvencionalne izvore energije s obzirom na distribuirane obnovljive izvore energije spojene preko inverterskog sučelja na mrežu.

### **1.1. Zadatak diplomskog rada**

Cilj ovog rada je na primjeru dijela mreže razrađenog u programskom paketu DigSILENT PowerFactory analizirati i dati prijedlog postavki zaštite obnovljivih izvora energije spojenih preko inverterskog sučelja te navesti razlike između parametriranja zaštite konvencionalnih izvora te obnovljivih izvora spojenih preko inverterskog sučelja. Prikazani su načini parametriranja i djelovanje pod / nad naponske, pod / nad frekvencijske, nadstrujne te ROCOF zaštite te je u zadnjem potpoglavlju dan prijedlog parametriranja zaštite obnovljivog izvora spojenog preko inverterskog sučelja od rada u otočnom pogonu.

## 2. PREGLED PODRUČJA TEME

Najutjecajniji čimbenik koji određuje doprinos struji kvara obnovljivog izvora spojenog preko inverterskog sučelja je shema upravljanja koja upravlja brzim uključivanjem i isključivanjem uređaja energetske elektronike kako bi se postigao zadani doprinos struji kvara te kako ne bi došlo do oštećenja samog invertera. Ključni cilj je ograničiti iznos struje unutar toplinske otpornosti poluvodičkih komponenata prisutnih u samom inverteru. Drugi ciljevi mogu biti nametnuti mrežnim pravilima te se isto tako moraju zadovoljiti. Procjena tranzijentne stabilnosti sustava pomoću kuta rotora se odnosi na ponašanje sinkronih generatora nakon što dođe do poremećaja u sustavu zbog nepredviđenih okolnosti. Ako sustav može održati svoj sinkronizam unatoč nepredviđenim okolnostima tada sustav ispunjava uvjete tranzijentne stabilnosti, a u slučaju da ne može održati svoj sinkronizam dolazi do potpunog raspada sustava [1].

Mnogi svjetski elektroenergetski sustavi su na jedan ili drugi način iskusili kompletan raspad ili ispad jednog dijela sustava [2] zbog tranzijentne nestabilnosti kuta rotora od kojih je značajan slučaj koji se dogodio u južnom dijelu Australije [3]. Taj događaj je privukao toliku pozornost inženjera elektroenergetskog sustava te šire javnosti da nakon toga potpuni raspad sustava postaje zabranjen te se ne dopušta njegovo događanje pod svaku cijenu. S obzirom na gore navedene činjenice, to opravdava stalne napore za razvoj pouzdanih i brzih metoda koje mogu procijeniti stabilnost sustava u stvarnom vremenu. Autori u [4] objašnjavaju indeks nazvan indeks prijelazne stabilnosti (engl. TSI – *transient stability index*) predstavljen kao nelinearna funkcija radne točke sustava u normalnom pogonu prije pojave prolaznog poremećaja. Formulacija indeksa prijelazne stabilnosti je najvažnija za pouzdanu i brzu analizu tranzijentne stabilnosti sustava.

Upravljanje stabilnošću današnjih elektroenergetskih sustava se temelji na desetljećima iskustva sa fizičkim svojstvima i regulacijskim odzivima velikih sinkronih generatora, obično veličine od stotina do čak tisuća megavata. Današnji elektroenergetski sustavi brzo prelaze na sve veći udio proizvodnje iz netradicionalnih izvora, poput vjetra i sunca, kao i uređaja za pohranu energije, poput baterija. Uz varijabilnu prirodu mnogih izvora obnovljive energije (zbog vremenski uvjetovanog načina proizvodnje), ti se noviji izvori razlikuju po veličini, od stambenih krovnih sustava (nekoliko kilovata) do energetske elektrane (stotine do čak tisuće megavata) i oni su međusobno povezani u cijeloj električnoj mreži iz distribucijskog sustava i izravno na visokonaponski prijenosni sustav. Što je najvažnije za potrebe potrošača, mnogi od ovih novih resursa povezani su s elektroenergetskim sustavom preko energetske elektroničke pretvarača, a ne rotirajućih elektromehaničkih strojeva. Zajedno, ove proizvodne tehnologije nazivaju se

distribuiranim izvorima energije spojenih preko inverterskih sučelja [5]. Inverteri se dinamički ne ponašaju isto kao sinkroni ili induksijski strojevi. Inverteri nemaju komponentu rotirajuće mase stoga ne razvijaju inerciju za prijenos struje kvara na temelju elektromagnetske karakteristike. Energetski elektronički izmjenjivači imaju mnogo bržu opadajuću karakteristiku za struje kvara jer uređaji nemaju pretežno induktivne karakteristike koje se asociraju s rotirajućim strojevima. Ove karakteristike diktiraju vremenske konstante uključene u strujni krug. Inverterima se također može upravljati na način drugačiji od rotirajućih strojeva jer se mogu parametrirati tako da mijenjaju vremenski period koji im je potreban da odgovore na uvjete kvara. To će također utjecati na karakteristike struje kvara pretvarača te na podešenje i parametrisiranje zaštitnih uređaja.

Sučelje pretvarača između obnovljivog (distribuiranog) izvora energije i priključka na elektroenergetski sustav može koristiti shemu upravljanja naponom ili shemu upravljanja strujom. Kondenzator istosmjernog međukruga između DC/AC pretvarača i distribuiranog izvora energije održava napon gotovo konstantnim tijekom prijelaznih stanja. Shema koja se bazira na regulaciji napona ima veće početno prekoračenje struje, dok shema regulacije struje ima znatno sporiji porast i opada natrag na vrijednosti stabilnog stanja. Doprinos kvaru bit će veći tijekom tranzijentnog razdoblja (tj. prvih 5-10 ciklusa) ako je obnovljivi izvor energije upravljan shemom regulacije napona [6].

Postoji potencijal za vrhunske sustave energetske elektronike sučelja za predočavanje konfiguracija s brzim poluvodičkim sklopkama na način koji ublažava negativne posljedice sustava sa obnovljivim izvorima energije [7]. Kako bi se odredila karakteristika struje kratkog spoja invertera, potrebno je provesti ispitivanje. Ovi rezultati ispitivanja mogu se koristiti za razvoj modela invertera za potrebu obnovljivih izvora energije koji se mogu koristiti u distribucijskim mrežama.

Kao tehnologija koja omogućuje nove prednosti, energetska elektronika se koristi za unaprjeđenje energetske učinkovitosti i veću integraciju obnovljivih izvora energije. Uz modernizaciju mreže, energetska elektronika također može igrati ulogu u naprednim mrežnim arhitekturama kao osnovni alat za bolju stabilnost i upravljivost mreže [8]. Ipak, integracija energetske elektronike velike snage postavlja nove izazove za stabilnost i kvalitetu električne energije modernih elektroenergetskih sustava na koje treba obratiti pozornost. Regulacijska nestabilnost na frekvencijama na kojima se generiraju nadharmonici i podharmonici je istraživana između invertera izvora struje i visokonaponske izmjenične mreže u uvjetima opterećenja visoke snage. Pojavljuju se novi problemi regulacije stabilnosti sa naponskim pretvaračima. U zadnjih nekoliko



godina, velika implementacija malih inverterski spojenih distribuiranih izvora je izazvala probleme u vezi održavanja napona i frekvencije na razini sustava stabilnosti (npr. isključivanje fotonaponskih sustava pri frekvenciji od 50.2 Hz u Njemačkoj, „Nessie krivulja“ na Havajima te „Duck“ krivulja u Kaliforniji) kao i probleme pri koordinaciji zaštite cjelokupnog sustava zbog dvosmjernih tokova snaga te nedovoljnom doprinosu invertera struji kratkog spoja [9]. Sukladno tome su operatori prijenosnog sustava te distributeri promijenili svoj stav u vezi malih inverterski napajanih distribuiranih izvora energije te zatražili njihovo aktivno sudjelovanje u regulaciji mrežne frekvencije i održavanju mrežnog napona stabilnim. Kao odgovor na te probleme, predložen je koncept pametnih invertera. Prema literaturi [10] i [11] autori predlažu pet glavnih prednosti odnosno parametara koje pametni inverteri nude u smislu rješavanja ključnih problema i trenutnih zahtijeva mreže s obzirom na stabilnost napona i frekvencije, dvosmjernih tokova snaga, varijabilnosti proizvodnje distribuiranih izvora energije te doprinosu struje kratkog spoja. Pet glavnih prednosti su: *Plug-and-play* (uključuje standardizaciju komunikacijskih protokola, distribuirana regulacija frekvencije te komunikacijski graf), samosvjesnost (otkrivanje kvarova u smislu detekcije, izolacije i klasifikacije, prognoziranje te pretpostavljanje vremena trajanja uređaja i unaprijeđena komunikacija pomoću alarma i statusa uređaja), prilagodljivost (pretpostavke mrežnih parametara, frekvencijsko-adaptivni način sinkronizacije s mrežom, optimizacija u stvarnom vremenu te fleksibilnost strujnog/naponskog izvora), autonomija (regulacija radnih te reaktivnih tokova snaga, fleksibilnost pri radu s mrežom te u nastavak rada u slučaju otočnog pogona ako je dozvoljeno mrežnim pravilima), kooperativnost (dinamičko napajanje mreže, dinamička potpora nadređenoj mreži, dijeljenje aktivne i reaktivne snage, pod ili nad-harmonijsko prigušenje, mogućnost mekog starta te koordinirana kompenzacija harmonika i nesimetrije napona). Nadalje, prema literaturi [12] i [13] razni koncepti upravljanja „virtualnih“ sinkronih strojeva su također predloženi radi postizanja stabilnosti mreže i autonomni rad. Autori predlažu korištenje sinkroinvertera tj. virtualnih sinkronih generatora bez sinkronizacijske komponente. Oni se mogu automatski sinkronizirati s mrežom prije spajanja te mogu nastaviti pratiti mrežnu frekvenciju nakon spajanja te time znatno poboljšavaju karakteristike, smanjujući složenost i računalno opterećenje upravljačkih uređaja. Sve funkcije originalnog sinkroinvertera kao što su regulacija frekvencije i napona te regulacija radne i jalove snage su i dalje prisutne. Rezultati eksperimenta su pokazali da predložena strategija odnosno micanje sinkronizacijske komponente, a u isto vrijeme poboljšavajući karakteristike virtualnog sinkronog generatora daje za 65% bolje rezultate u pogledu regulacije odnosno praćenja frekvencije, regulaciju radne snage za 83% te regulaciju jalove snage za oko 70% u odnosu na virtualne sinkrone generatore sa sinkronizacijskom jedinicom. Autori u literaturi [14] navode da distribuirani obnovljivi izvori

energije predstavljaju znatne izazove za projektiranje postavki zaštite. Usljed procvata distribuiranih izvora energije, razina kvara u mikromreži se značajno mijenja. Konvencionalne postavke zaštite su znatno kompromitirane odnosno na njih utječu priroda kvara, razina prodora, lokacija te trenutni način rada OIE koji može učiniti mikromrežu osjetljivom na ispade odnosno ostanak dijela mikromreže bez napajanja. Stoga, za poboljšanje otpornosti mikromreže je potrebno modificirati konvencionalne postavke zaštite. Zaštitni uređaji trebaju prilagoditi radne parametre kako bi se prilagodili promjenama parametara sustava zbog promjena pri normalnom pogonu ili zbog rekonfiguracije mreže. Komunikacijski potpomognuta zaštitna arhitektura, koja osigurava kontinuiranu razmjenu podataka između zaštitnih uređaja može pružiti brzu, sigurnu i pouzdanu zaštitu. Korištenje analize parametara mreže u stvarnom vremenu u mikromrežama može pomoći sustavu da predvidi kvarove.

### **3. UTJECAJ INTEGRACIJE ELEKTRANA IZ OIE NA PODEŠENJA ZAŠTITE ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA**

Projektiranje zaštite elektroenergetskog sustava je samo po sebi vrlo zahtjevan zadatak. Koristeći samo lokalna strujna mjerenja, svaki zaštitni relej bi trebao prepoznati kada se dogodio kvar u mreži, a kada se radi o normalnom stacionarnom pogonu. Normalni stacionarni pogon predstavlja slučaj kada zaštitni relej ne bi trebao generirati signal okidanja. Svaki zaštitni relej bi trebao moći napraviti ovu razliku za sva mjesta kvara, za sve vrste kvarova, za sve razine opterećenja, za bilo koju konfiguraciju mreže, bila ona bez rezervnog napajanja ili sa prisutnim rezervnim izvorima napajanja. Nadalje, releji bi trebali biti u mogućnosti osigurati rezervu za sve podređene releje ovisno o postavkama zaštite. Prisutnost distribuirane proizvodnje još više komplicira postavke zaštite pa će u sljedećim poglavljima biti navedeno kako i na koji način to riješiti.

#### **3.1. Utjecaj distribuirane proizvodnje**

Proizvodnja iz distribuiranih izvora utječe na projektiranje zaštite distribuirane mreže na nekoliko načina od kojih neki od načina nastaju zbog povećanja vrijednosti struje kvara zbog distribuiranih generatora u mreži. Isto tako, određeni problemi zaštite nastaju jer je doprinos struji kvara od strane generatora vrlo malen odnosno nedovoljan. Jedna od glavnih posljedica navedenog je rizik od nekontroliranog otočnog pogona koji je u većini distribucijskih sustava zabranjen propisanim mrežnim pravilima. Utjecaj distribuirane proizvodnje na zaštitu uvelike ovisi o doprinosu struji kvara iz distribuiranih izvora na što prvenstveno utječe veličina odnosno snaga distribuiranih izvora i vrsta sučelja preko kojih su spojeni distribuirani izvori na mrežu. Sinkroni generatori isporučuju kontinuiranu struju kratkog spoja, indukcijski (asinkroni) generatori doprinose tijekom jednog ili dva ciklusa u slučaju trofaznog simetričnog kratkog spoja i nešto duže u slučaju nesimetričnog kvara. Jedinice distribuiranih izvora koje su spojene preko sučelja energetske elektronike imaju vrlo ograničen doprinos struji kvara ili ga uopće nemaju.

Zaštita distribucijske mreže se u većini slučajeva bazira na nadstrujnoj zaštiti koja može biti vremenski neovisna ili vremenski inverzna i svaka ima svoje prednosti i nedostatke. Postavke zaštite trebaju biti takve da se svaki kvar u mreži otkloni dovoljno brzo s minimalnim utjecajem na potrošače, čak i u slučaju otkazivanja (kvara) zaštitnih uređaja. Određivanje takvih postavki zaštite za distribucijsku mrežu je zahtjevan zadatak jer mora uključivati sva moguća stanja sustava zato što zaštitni releji korišteni u distribucijskim mrežama imaju samo ograničenu količinu dostupnih informacija. Ulazni signali nadstrujnog releja su samo iznosi struja u sve tri faze.

Dodavanjem generatora distribucijskoj mreži će znatno promijeniti struje kvara i time povećati rizik kvara odnosno neispravne prorade zaštitnih uređaja. Zaštita može zakazati na dva različita načina:

-neželjena prorada: Otvaranje prekidača kada ne postoji kvar u mreži koji jamči napajanje tog dijela mreže – potrošači nepotrebno ostaju bez napajanja u slučaju jednostranog napajanja

-zakazivanje prorade: ne dolazi do otvaranja prekidača koji bi se trebao otvoriti kako bi otklonio kvar u sustavu ili otvaranje dolazi prekasno zbog krive prorade zaštitnog uređaja

Oba kvara se događaju povremeno, čak i u distribucijski mrežama bez distribuiranih izvora energije, prvenstveno zbog:

-neuspjeha koncepta (postavki) zaštite

-neuspjeha modela pri projektiranju uređaja

-kvara zbog krivog podešenja zaštite

- izoliranog kvara samog zaštitnog uređaja

### **3.2. Utjecaj i problemi zaštite nastali zbog distribuiranih izvora energije**

Većina distribucijskih sustava koristi tradicionalni radijalni sustav napajanja za prijenos električne energije do potrošača te ima implementirane postavke zaštite uzimajući u obzir tokove snaga koji idu samo u jednom smjeru odnosno od proizvodnje radijalno prema potrošačima. Penetracijom distribuiranih izvora energije dolazi do promjene u tokovima snaga odnosno sada energije može teći u oba smjera s obzirom da mreža postaje dvostrano napajana i samim time se i postavke zaštite i zaštitni uređaji moraju prilagoditi i parametrirati prema novim izvorima energije i novom stanju u mreži. U idućim potpoglavljima će se navesti postavke pri parametranju zaštite koje moraju biti uzete u obzir kada dolazi do integracije distribuiranih izvora energije u distribucijsku mrežu.

#### **3.2.1. Struje kratkog spoja**

Ispravna koordinacija releja, prekidača, osigurača te drugih nadstrujnih zaštitnih uređaja se mora temeljiti na raspoloživoj struji kvara. Struja kvara će ovisiti o načinu spajanja distribuiranog izvora na mrežu. Distribuirani izvori spojeni preko elemenata energetske elektronike ne daju značajan doprinos struji kratkog spoja i mogu se zanemariti pri parametranju postavki zaštite [15]. Koordinacija zaštite mora moći razlikovati kvarove koji se javljaju u blizini mjesta spoja PCC (engl. PCC - *point of common coupling*). Svaki kvar na strani mreže te unutar distribuiranog izvora

je potrebno ispravno identificirati i najbliži zaštitni uređaji moraju ispravno reagirati kao i prekidač. Ako je distribuirani izvor znatno veće snage u usporedbi sa okolnom mrežom, može imati značajan utjecaj na struju kvara koja dolazi iz trafostanice. To može uzrokovati neuspjeh pri okidanju, sekvencijalno okidanje ili probleme pri koordinaciji zaštite [16]. Zaštita možda neće moći otkriti struju kvara ako je:

-nastupio zemljospoj te priključak distribuiranog izvora ne osigurava da dođe do uzemljenja primarne struje izvora

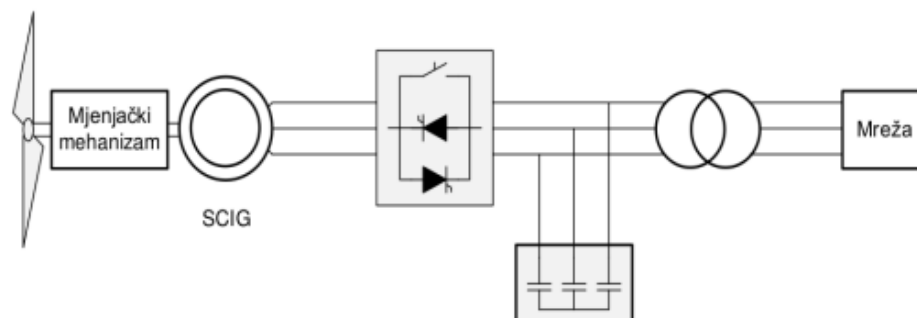
-distribuirani izvor je spojen jednofazno, spojen na fazu koja nije u kvaru

-kvar se sam gasi kada dođe do odvajanja velikog izvora struje te struja kvara pada na niske vrijednosti koja dolazi od distribuiranog izvora energije.

U tekstu ispod će se navesti izvedbe vjetroagregata te njihov doprinos struji kratkog spoja ovisno o samoj izvedbi te o načinu priključenja na mrežu.

### **Kavezni asinkroni generator – tip A**

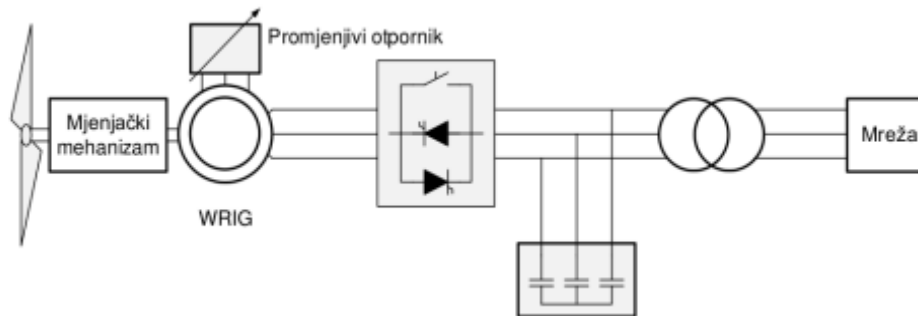
Asinkroni generatori prate mrežnu frekvenciju odnosno promjena frekvencije uzrokuje promjenu klizanja odnosno promjenu brzine asinkronog generatora kao i samu promjenu proizvedene električne energije. Osnovna prednost im je jednostavnija i jeftinija konstrukcija, iako s druge strane moraju imati kompenzacijski uređaj i priključni uređaj kako bi se omogućila sinkronizacija na mrežu. Doprinos struji kratkog spoja ovog tipa iznosi do šest puta iznosa nazivne struje.



Sl. 3.1. shema kaveznog asinkronog generatora tip A,[17]

### Klizno kolutni asinkroni generator sa promjenjivim otporom rotorskog kruga – tip B

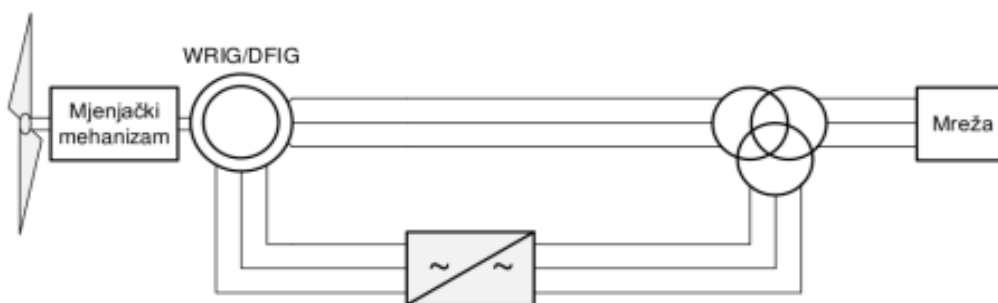
Za razliku od tipa A, ovakva izvedba ima mogućnost pogona pri većem rasponu brzina. Na rotorski je namot preko pretvarača spojen vanjski otpornik promjenjivog otpora s brзом regulacijom čime se utječe na momentnu karakteristiku odnosno na raspon dozvoljenog klizanja koje može iznositi i do -10 %. Doprinos struji kvara je sličan kao i kod vjetroagregata tipa A, ali se iznos smanjuje povećavanjem otpora rotorskog kruga.



Sl. 3.2. shema vjetroelektrane tipa B,[17]

### Dvostrano napajani asinkroni generator – tip C

Raspon dopuštenih brzina vrtnje znatno veći u odnosu na tip A, sadrži pretvarač koji je parametriran na postotak nazivne snage agregata, a ne na punu snagu. Neovisna regulacija djelatne i jalove snage, postoji mogućnost regulacije nagiba lopatica pri većim brzinama. Maksimalan doprinos struji kratkog spoja je oko tri puta iznosa nazivne struje.

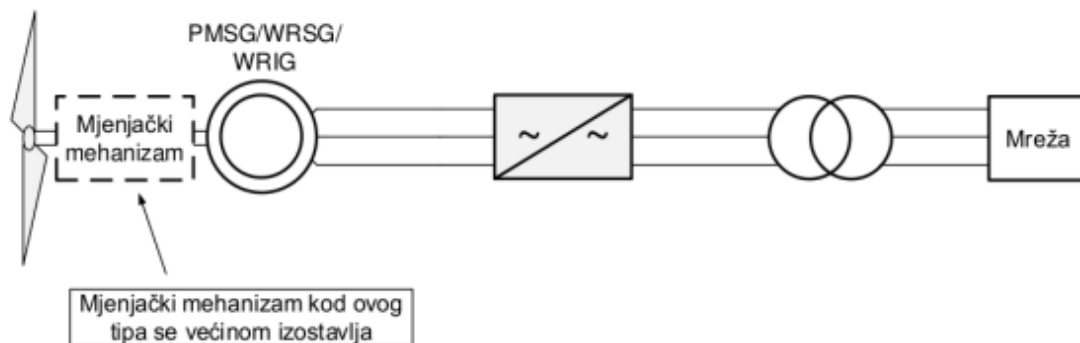


Sl. 3.3. shema vjetroelektrane tipa C,[17]

### Vjetroelektrane sa potpunim priključkom preko pretvarača – tip D

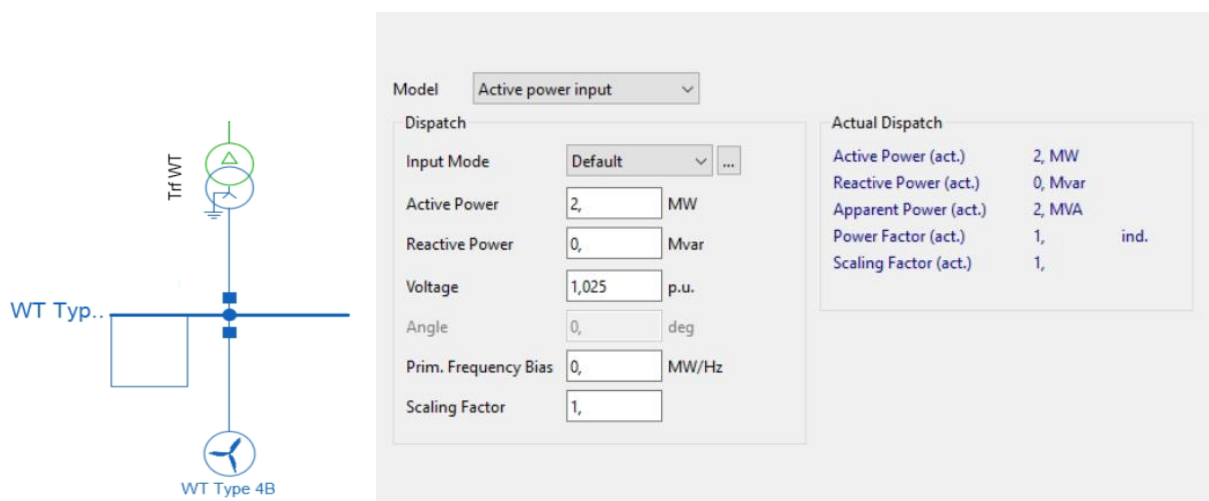
Ovakav tip elektrane korišten je za potrebe simulacije opisane u četvrtom poglavlju rada. Sinkroni ili asinkroni generatori koji su priključeni na mrežu preko pretvarača nazivne snage jednake nazivnoj snazi generatora. Imaju najveći raspon dozvoljenih pogonskih brzina te imaju mogućnost

regulacije djelatne i jalove snage u potpunosti. Kao što se može vidjeti i u simulacijama je da imaju doprinos struji kratkog spoja približno 1,1x In odnosno doprinos struji kratkog spoja je uvjetovan ograničenjem pretvarača.



Sl. 3.4. shema vjetroelektrane tipa D s potpunim priključkom preko pretvarača,[17]

Vjetroagregat korišten za potrebe simulacije koja je rađena u programskom paketu DigSILENT je prikazan na slici 3.5. te mu nazivna snaga iznosi 2 MVA pri faktoru snage  $\cos \varphi = 1$ . Maksimalan iznos struje kratkog spoja koji daje u mrežu iznosi 1 p.u. odnosno iznos nazivne struje invertera. Napon mu se održava u rasponu od 0,85 p.u. do 1,15 p.u. odnosno u tim granicama je priključen na mrežu te je u normalnom pogonu, a frekvencija mu je u rasponu između 49 i 51 Hz. Vjetroelektrana je nazivnog napona 0,69 kV povezana preko transformatora nazivne snage 2,5 MVA prijenosnog omjera 18/0,69 kV te spoja Dyn5 prikazanim na slici 3.5..



Sl. 3.5. Vjetroelektrana i osnovni podatci, modelirano u DigSILENT-u

### 3.2.2. Otočni pogon

Otočni pogon predstavlja stanje distribuiranog izvora kada više ne radi paralelno s distribucijskom mrežom koji se većinom događa zbog[18]:

-kvara koji je detektiran od strane mreže i rezultira otvaranjem prekidača, ali koji nije detektiran od strane zaštitnih uređaja distribuiranog izvora

-nenamjerno otvaranje prekidača distribucijskog voda zbog kvara zaštitne opreme

-namjerno isključivanje radi servisiranja bilo na mjestu spoja distribuiranog izvora ili na servisnom ulazu

-ljudska pogreška i stohastičko ponašanje vremenskih prilika i neprilika

Kritičan slučaj otočnog pogona je u slučaju kada distribuirani izvor radi u normalnom paralelnom pogonu s mrežom čak i kada je izgubljen spoj s distribuiranim sustavom (mrežom). U tom slučaju izolacijski uređaji ne rade s pretpostavkom da je mikromreža i dalje spojena na mrežu. Ovaj kontinuirani rad pri neodgovarajućim uvjetima se naziva nenamjeran otočni pogon. Glavni problemi u vezi ovog stanja su:

-sigurnost radnika je ugrožena distribuiranim izvorima koji napajaju mjesto kvara nakon što su primarni izvori energije isključeni i odspojeni pa se taj dio mreže smatra sigurnim za rad i servisiranje

-sigurnost potrošača može biti ugrožena s obzirom da distribuirana mreža nema mogućnost deenergiziranja vodova koji se smatraju „sigurnim“ za rad

-napon i frekvencija kojom se napajaju potrošači koji su u otočnom pogonu su izvan regulacije distribucijske mreže, ali je operator distribucijskog sustava i dalje odgovoran za tu skupinu potrošača (pitanja odgovornosti ako je kvaliteta električne energije narušena što rezultira oštećenjem opreme potrošača)

-sustavi zaštite otočnog pogona će biti neusklađeni zbog drastične promjene dostupnosti struje kratkog spoja

-otočni pogon može biti neadekvatno uzemljen interkonekcijom distribuiranog izvora

ehnike detekcije otočnog pogona – područje raznih istraživanja i ispitivanja, obično se dijele na:



pasivna detekcija – pasivne metode za otkrivanje otočnog pogona u osnovi prate nekoliko odabranih parametara kao što su napon i frekvencija kao i njihove karakteristike i uzrokuju da pretvarač (inverter) prestane konvertirati snagu kada postoji odstupanje tih veličina od normalnih zadanih vrijednosti. Neki od parametara koji se koriste za pasivnu detekciju su:

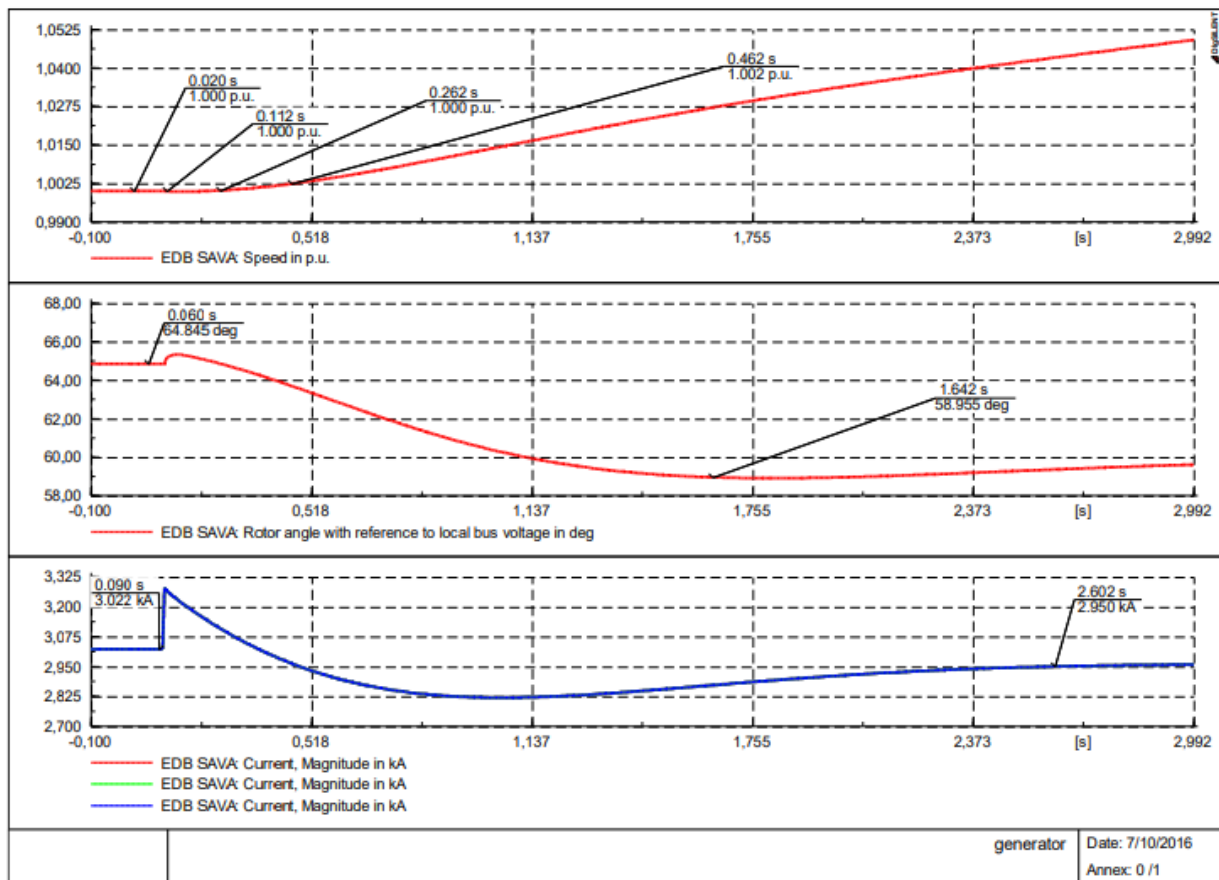
- prenapon / podnapon
- nadfrekvencija / podfrekvencija
- fazni skok napona
- detekcija harmonika napona
- detekcija strujnih harmonika

aktivna detekcija - Aktivne metode za otkrivanje otočnog pogona otkrivaju namjerne promjene ili smetnje nadređenoj distribucijskoj mreži, a zatim analiziraju odgovor kako bi utvrdili je li električna mreža sa svojom stabilnom frekvencijom, naponom i impedancijom i dalje spojena. Ako je mala promjena sposobna znatno utjecati na parametre priključka distribuiranog izvora unutar propisanih vrijednosti, aktivni krug uzrokuje prekid pretvorbe energije izmjenjivača. Aktivne metode su:

- mjerenje impedancije
- detekcija impedancije na određenoj frekvenciji
- pomak frekvencije u kliznom načinu
- promjena / skok frekvencije
- pomak faznog kut napona

Na slici 3.6. mogu se vidjeti veličine koje su karakteristične za određivanje odnosno prepoznavanje otočnog pogona mreže. Slika prikazuje simulaciju otočnog pogona za slučaj ravnoteže proizvedene snage generatora OIE i potrošnje otočnog dijela mreže. U trenutku  $t = 100$  ms dolazi do otočnog pogona te se vidi da je isporuka djelatne snage generatora otprilike jednakog iznosa kao i opterećenje dijela mreže s kojim je generator ostao u otočnom pogonu. ms dolazi do otočnog

pogona te se vidi da je isporuka djelatne snage generatora otprilike jednakog iznosa kao i opterećenje dijela mreže s kojim je generator ostao u otočnom pogonu.



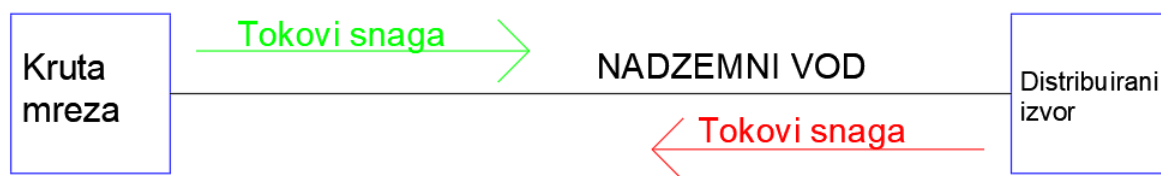
Sl. 3.6. Promjena brzine generatora, kut rotora generatora, struja generatora,[19]

### 3.2.3. Smanjenje doseg impendancijskih releja

Penetracija distribuiranih izvora utječe na unaprijed izračunate i postavljene zone za impendancijske releje. Napon se mijenja dodavanjem distribuiranog izvora koji utječe na impedanciju koju relej mjeri. Promjena impedancije čini da relej „vidi“ kvar dalje nego što zapravo je. Rezultat je da kvar mora biti bliže releju kako bi relej mogao raditi unutar izvorno predviđene zone udaljenosti. Aktivno područje releja je stoga skraćeno što znači da je njegov doseg smanjen.

### 3.2.4. Dvosmjerni tokovi snaga

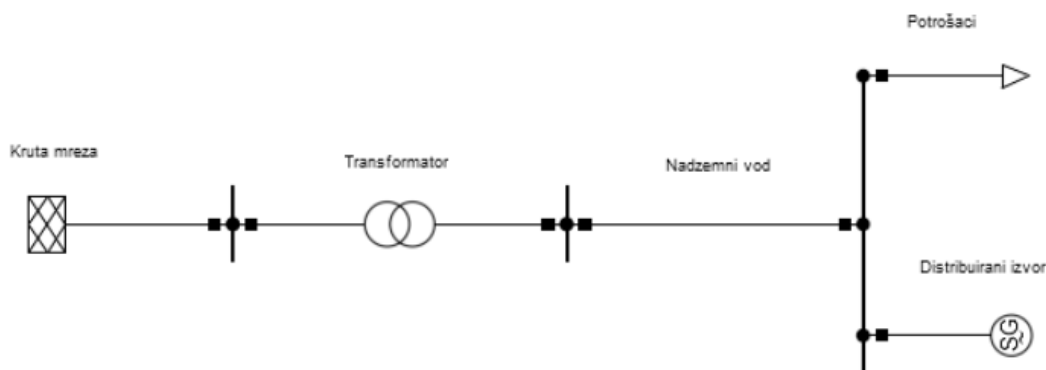
Standardne postavke zaštite koriste usmjerene nadstrujne releje. Radijalni izvodi su konfigurirani na način da energija odnosno napajanje dolazi iz jednog smjera. Uvođenjem distribuiranih izvora rezultira obrnutim tokovima snaga koji nisu bili uzeti u obzir pri izvornom parametranju zaštitnih uređaja.



Sl. 3.7. Dvosmjerni tokovi snaga

### 3.2.5. Karakteristika napona

Distribuirani izvori utječu na karakteristiku napona duž distribucijskog voda što može uzrokovati prenapon na vodu te dodatni naponski stres na opremu. Distribuirani izvor može pružiti koristan doprinos naponu u visoko opterećenim ili slabim mrežama samim time poboljšavajući kvalitetu električne energije. Također, distribuirani izvor može negativno utjecati na transformatore sa ručnom preklopkom mijenjajući opterećenje na transformator koji neće moći propustiti odnosno pravilno regulirati ulazni napon [20].



Sl. 3.8. Utjecaj distribuiranog izvora na naponske prilike u mreži

### 3.2.6. Automatski ponovni uklop (APU)

Kako bi se osigurao ispravan rad automatskog ponovnog uklopa i spriječilo ponovno uključenje izvan faze, distribuirani izvori se moraju kompletno odspojiti prije ponovnog uklopa [20]. Ako distribuirani izvor nastavi s normalnim pogonom nakon kvara u mreži dva problema mogu nastati kada se pokrene APU:

-kvar možda nije nestao jer je luk napajan od strane distribuiranog izvora stoga trenutni ponovni uklop neće biti moguć

-u otopnom dijelu mreže može doći do promjene frekvencije zbog neravnoteže djelatne snage što znači da bi ponovno uključivanje spojilo dva sustava koja rade asinkrono.

### 3.2.7. Ferorezonancija

Može doći do ferorezonancije i oštećenja opreme potrošača ili skupih transformatora. Budući da osigurači u sve tri faze ne okidaju istovremeno može se dogoditi da je transformator kratko vrijeme spojen samo preko dvije faze. Kapacitet kabela koji je u seriji sa induktivitetom transformatora može uzrokovati izobličene visoke vrijednosti napona i struje zbog rezonancije između nelinearnih induktiviteta i kapaciteta.

### 3.2.8. Uzemljenje

Spoj distribuiranog izvora s neuzemljenim primarnim namotima transformatora će zahtijevati analizu kompletne opreme (izolatori, odvodnici prenapona, prekidači, itd.) za rukovanje u uvjetima prenapona kada dođe do zemljospoja. Distribuirani izvor spojen preko uzemljenog trokut – zvijezda spoja (ili neuzemljene zvijezde), zemljospoji na vodu će uzrokovati struju uzemljenja u oba smjera, od kvara do transformatora kao i do istosmjernog transformatora. Drugi uvjet koji treba provjeriti je u slučaju kada se za određene konfiguracije transformatora izgubi spoj sa uzemljenjem i time cijeli sustav postane neuzemljen.

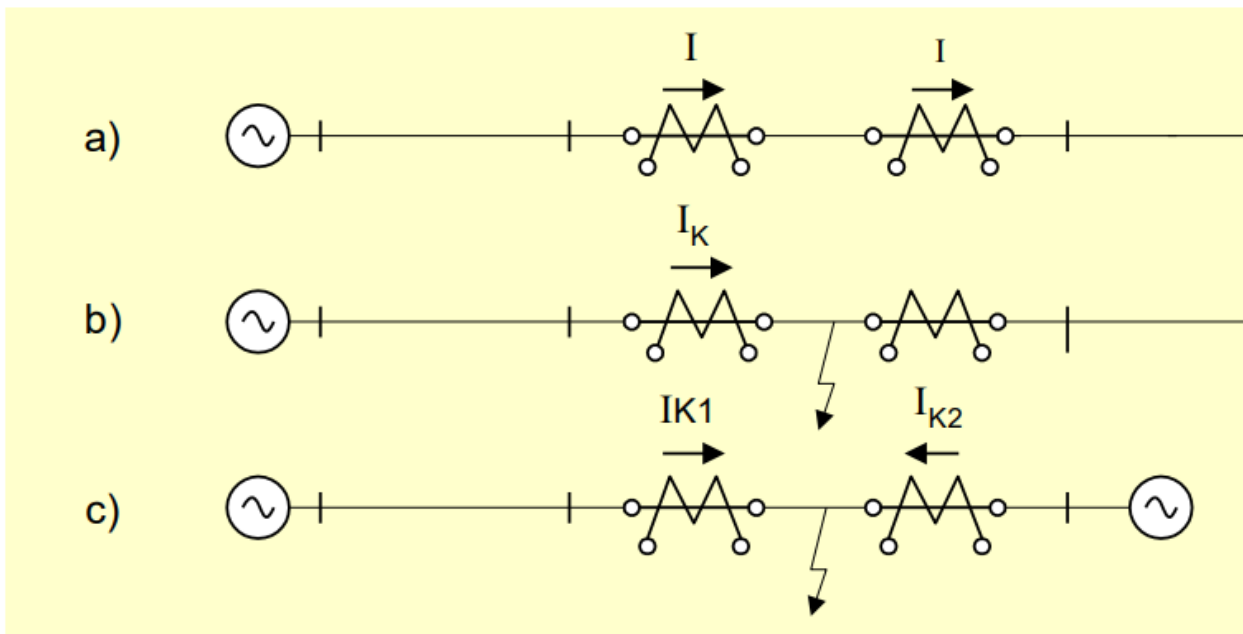
## 3.3. Vrste zaštite za distribuirane OIE

Zaštita distribuiranih izvora električne energije je ključna za poboljšanje otpornosti mreže brzim identificiranjem kvara i zatim izoliranjem neispravne komponente ili dijela mreže uz što manje ljudske intervencije. U posljednje vrijeme, predložene su različite postavke i vrste zaštite radi poboljšanja pouzdanosti kada distribuirani izvor radi ili u paralelnom pogonu s mrežom ili u otopnom načinu rada s ciljem zaštite distribuiranih izvora energije i okolne mreže kao i nadređene mreže. Te zaštite su:

-**Naponska zaštita** – Otkrivanje kvara u slučaju niske vrijednosti struje kvara se može postići korištenjem komponenti izvora napona. Moguće je izračunati vrijednosti komponente izvora napona za različite vrste kvarova. Uobičajena je praksa praćenje izlaznih napona distribuiranog izvora energije te zatim transformiranja trofaznih izmjeničnih napona u istosmjerne vrijednosti korištenjem Clarkove i Parkove transformacije [21]. Koristeći istosmjerne vrijednosti, signal poremećaja se može izračunati kao odstupanje naponskog signala od onog pri normalnom pogonu. U slučaju nesimetričnog kvara, istosmjerne komponente prikazuju valovitost. Stoga se ove komponente prvo filtriraju pa uspoređuju sa zadanim referencama. Prema autorima [22],

predstavljena je metoda otkrivanja kvara koja se temelji na praćenju pozitivne komponente osnovnog napona. Korištenjem ove metode, i simetrični i nesimetrični kvarovi na distribuiranim izvorima energije mogu biti otkriveni. Pri implementaciji ove zaštite, potrebno je obratiti pozornost na nekoliko problema. Učinkovitost ove zaštite može biti smanjena zbog vremenskih kašnjenja i procesa filtriranja. Štoviše, vrijeme detekcije se mijenja ovisno o vrsti kvara i magnitudi propada napona koji nastaje tijekom kvara. Naposljetku, ova zaštita uvelike ovisi o načinu rada distribuiranog izvora energije. Neadekvatno podešenje zaštite može aktivirati zaštitu varijacijama napona uzrokovani događajima bez kvara pri otočnom pogonu, ova vrsta zaštite je znatno robusnija u paralelnom načinu rada s mrežom.

**-Poboljšana nadstrujna zaštita** – za zaštitu uređaja energetske elektronike pomoću kojih su spojeni distribuirani izvori na mrežu, nadstrujna zaštita bi trebala uzeti u obzir maksimalnu snagu izmjenjivača odnosno invertera. Bilo koji kvar na distribuiranim izvorima bi se morao otkloniti bez oslanjanja na visoku struju kvara. Korištenjem simetričnih komponenti struje, otočni pogon distribuiranog izvora se može štititi od jednofaznog zemljospoja i međufaznih kratkih spojeva [23]. Simetrični pristup zaštiti je predložen u [24]. Zaštita koristi nultu komponentu struje kako bi otkrila jednofazni spoj sa zemljom, inverzna komponenta struje se koristi za otkrivanje međufaznih kratkih spojeva. Nadalje, postavke nadstrujne zaštite mogu imati značajne koristi od komunikacijskih sučelja unutar distribuiranih izvora energije. Prema [25], predložena je simetrična shema temeljena na simetričnim komponentama struje koja se oslanja na komunikaciju te može locirati simetrične i nesimetrične kvarove na vrijeme. Komunikacija se uspostavlja samo radi razmjene informacija o statusu, a ne zbog mjerenja električkih veličina i samim time se smanjuje potrebna komunikacijska pojasna širina što čini izvedbu jeftinijom. Razvijena je još jedna shema nadstrujne zaštite gdje je korišten Ethernet kabel za komunikaciju [26]. Ova shema nudi trenutnu zaštitu za lokalne vodove i udaljene sabirnice koristeći dva izvršna člana, bez obzira gdje se nalazili distribuirani izvori energije. Glavni problemi s ovim shemama zaštite su povezani visokom ovisnošću o komunikacijskim sustavima. Očito, problemi s pouzdanošću komunikacijskih sučelja mogu utjecati na pouzdanost i učinkovitost cjelokupne zaštite odnosno, u slučaju kvara u komunikacijskom sustavu, cijela shema zaštite može biti nefunkcionalna.

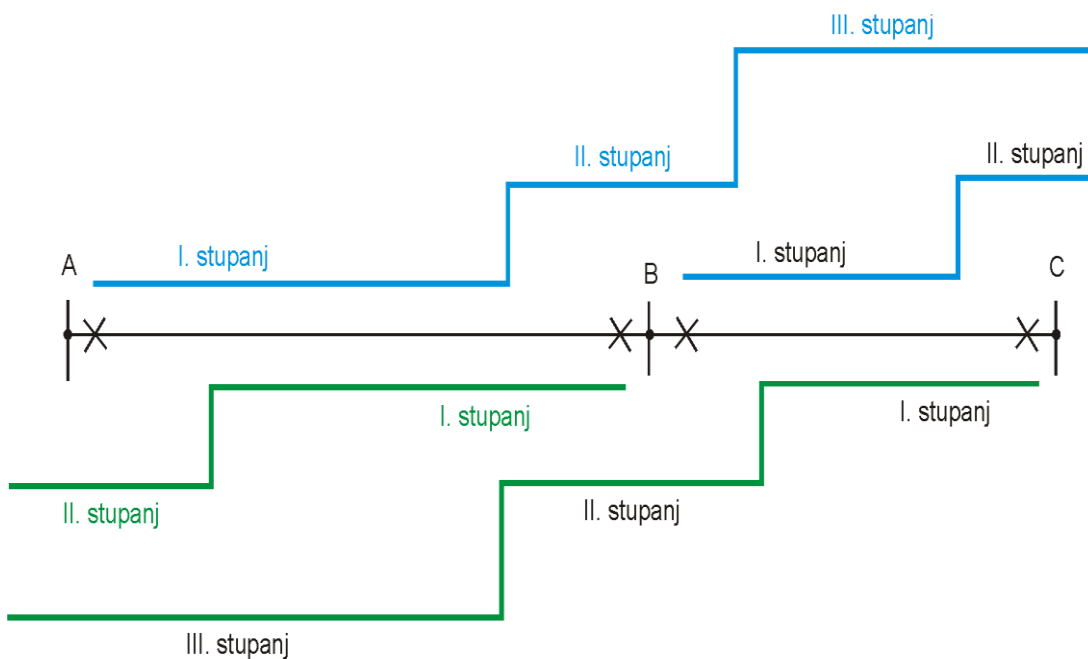


Sl. 3.9. Princip rada diferencijalne zaštite

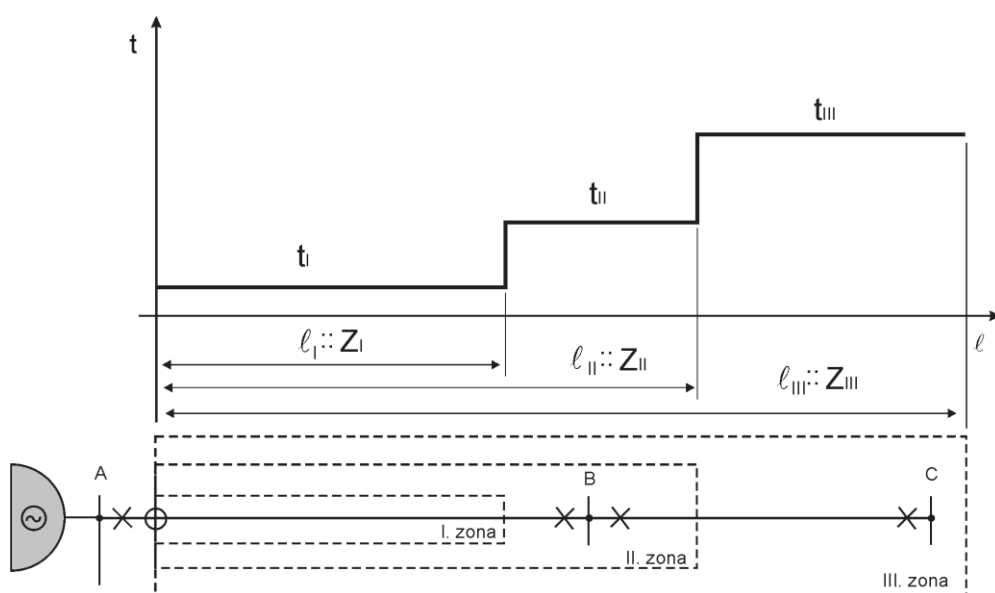
**Diferencijalna zaštita** – diferencijalna se zaštita temelji na usporedbi struja koje ulaze i izlaze iz zone šticeanja. Sve dok razlika između ovih struja premašuje unaprijed definiranu vrijednost kvara, releji šalju signal distribuiranom izvori koji je u zoni kvara te tada dolazi do prorade zaštite.

Diferencijalna zaštita ima najbrže vrijeme odziva, približno oko 5 milisekundi te se vrijednost kvara diferencijalne zaštite lako može mijenjati. Štoviše, može se prilagoditi oba načina rada, otočni i paralelni pogon s mrežom što ju čini pogodnom zaštitom za distribuirane izvore [27]. Prema [28] korištena je diferencijalna zaštita zajedno sa simetričnim komponentama struje za otkrivanje kvarova i vrste kvarova. Prema autoru [29] diferencijalni releji su korišteni za zaštitu distribuiranih izvora u paralelnom radu s mrežom kao i u otočnom pogonu. Korištenjem digitalnih diferencijalnih releja s ugrađenim komunikacijskim sučeljem rješava problem kvarova visoke impedancije i prikladni su za distribuirane izvore u radijalnim i zamkastim mrežama [30]. Kako bi se smanjili troškovi uređaja za diferencijalnu zaštitu, optimalan raspored zona zaštite i zaštitnih uređaja za pojedinu zonu su predstavljeni u [31]. Značajna prednost korištenja diferencijalne zaštite u distribuiranim izvorima energije je u tome što može riješiti probleme vezane za niske razine struje kvara kao i za povratne (obrnute) tokove snaga. Međutim, zaštitni uređaji diferencijalne zaštite moraju biti ugrađeni na svakom vodu te se ti uređaji oslanjaju na komunikacijsku infrastrukturu za primanje izmjenjenih vrijednosti električkih veličina. To stvara dodatne troškove i dovodi do problema s pouzdanošću komunikacijskih sučelja. Štoviše, potrebna su sinkronizirana mjerenja, a nesimetrična opterećenja i prijelazne pojave mogu narušiti pouzdanost i ispravno okidanje zaštitnih uređaja.

**Distantna zaštita** – Princip rada zaštite se zasniva na kontinuiranom mjerenju impedancije dijela elektroenergetske mreže putem strujnih i naponskih mjernih transformatora te isključenju prekidača ukoliko impedancija značajno smanji svoju vrijednost odnosno ako dođe do kratkog spoja. Prednost distantne zaštite nad nadstrujnom je što može simultano nadzirati strujne i naponske prilike u mreži i na temelju njih doći do kvalitetnije informacije o prirodi i lokaciji kvara nego što je to slučaj kod usmjerene ili neusmjerene nadstrujne zaštite. Distantna zaštita se u pravilu podešava tako da ima između dvije i pet zona. Na slici 3.10. vidimo podešenje distantne zaštite u četiri zone.



Sl. 3.10. Distantna zaštita, [32]



Sl. 3.11. Vremensko stupnjevanje distantne zaštite,[32]

Autor [33] je razvio shemu zaštite za otočni i paralelni pogon distribuiranih izvora s mrežom šticećenih distantnom zaštitom. U ovoj se shemi kvarovi otkrivaju korištenjem novog tipa admitantnog releja sa inverznom vremenskom karakteristikom. Glavna prednost distantne zaštite je da na nju ne utječe promjena vrijednosti struje kvara jer se oni baziraju na mjerenjima impedancije. Nova shema sa dva postupka prorade zaštite je razvijena za primarnu i rezervnu zaštitu korištenjem „izdvojene“ impedancije. Prvi postupak je potreban za utvrđivanje mjesta kvara te za pružanje vremenske reference za razmijenjene komunikacijske podatke. Drugi postupak radi na automatski koordinirani način sa inverznom vremenskom karakteristikom kako bi osigurao rezervnu zaštitu [34]. U usporedbi s već poznatom nadstrujnom zaštitom, značajke distantne zaštite se vrlo malo mijenjaju, čak i u različitim načinima rada. Distantna zaštita također ima svoje nedostatke. Tijekom kvara, distribuirani generatori smješteni između točke kvara i mjerne točke djeluju kao da isprekidano napajaju mjesto kvara što utječe na točnost mjerenja i stoga na učinkovitost zaštite. Nadalje, otpor mjesta kvara (električnog luka) može utjecati na mjerenje impedancije. Zaključno, tranzijenti struje, harmonici i opadajuća istosmjerna komponenta struje imaju značajan učinak na točnost mjerenja.

**Adaptivna zaštita** – kako bi potpuno iskoristili potencijal distribuiranih izvora za poboljšavanje otpornosti mreže, distribuirani izvor mora raditi pouzdano i u paralelnom načinu rada s mrežom i otočnom pogonu. Dakle, prijelaz odnosno način rada distribuiranog izvora ima značajan utjecaj na shemu i postavke zaštite te je projektiranje postavki zaštite vrlo zahtjevan zadatak. U novije vrijeme, adaptivne sheme zaštite predstavljaju obećavajuće rješenje za zaštitu distribuiranih izvora u slučaju visoke razine integracije u mreži. Takve sheme omogućuju u stvarnom vremenu podešavanje releja i njihovih karakteristika korištenjem vanjskih signala [35]. Prema autoru [36] razvijen je adaptivni algoritam zaštite od struje kvara analizom ponašanja kvara pretvarača energetske elektronike na koji je spojen distribuirani izvor. U ovoj metodi, postavke odnosno podešenja trenutne nadstrujne zaštite se automatski prilagođavaju novoj situaciji uspoređivanjem impedancije sustava s impedancijom distribuiranog izvora. Druga adaptivna shema zaštite je razvijena korištenjem pohrane energije i izolacijskog transformatora [37]. Shema zaštite se adaptivno prebacuje između nadstrujne zaštite u mrežnom načinu rada i naponske zaštite u otočnom pogonu. Način rada se osigurava usporedbom kutova nulte komponente impedancije. Autor [38] predstavlja algoritam baziran na numeričkim relejima koji koordinira rad releja u specifičnoj mikromreži. Postavke nadstrujnog releja se izračunavaju izvanmrežno te se zatim ta vrijednost pohranjuje u releje. Ova shema ima sposobnost za otkrivanje kvarova s daleko manjim razinama struje kratkog spoja u distribuiranim izvorima energije. Isto tako, predložena je i



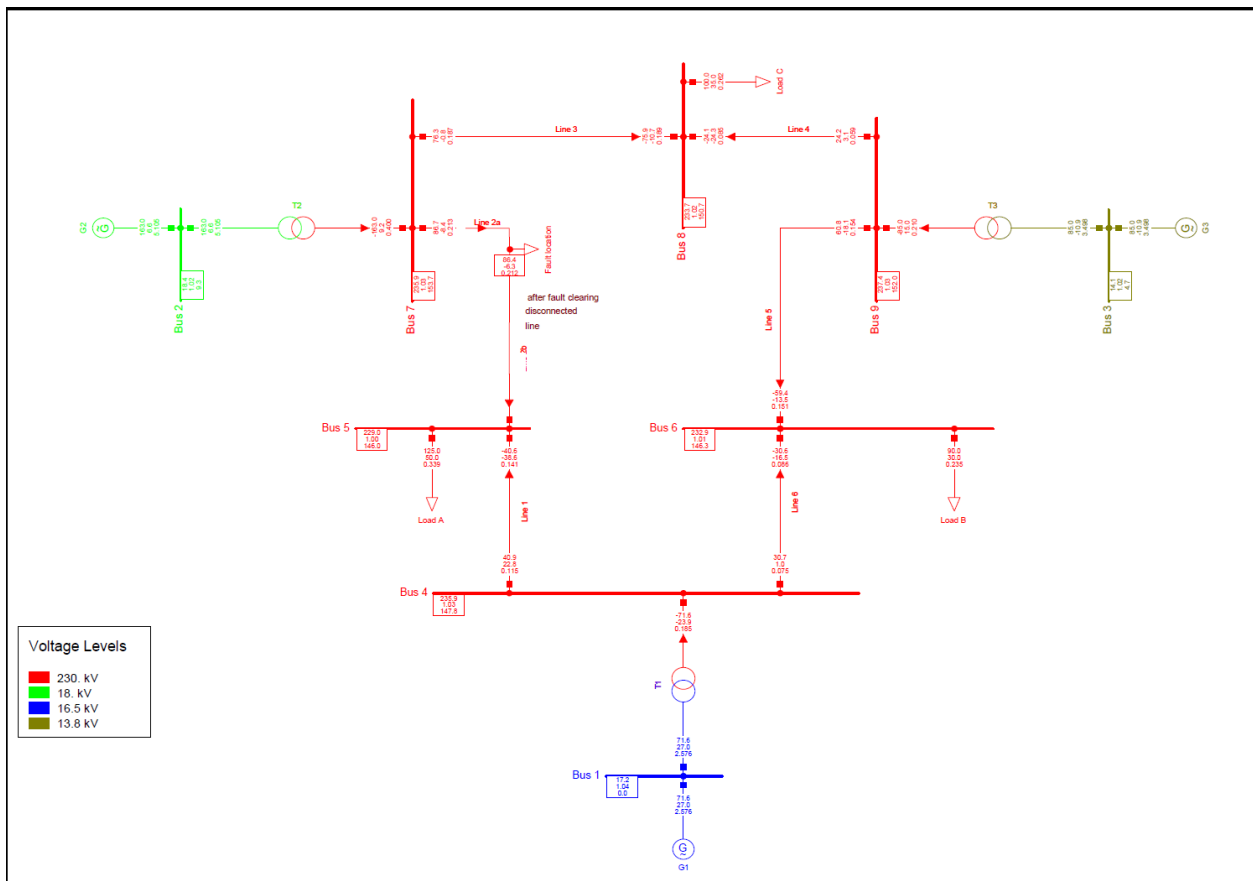
adaptivna shema zaštite temeljena na centraliziranoj arhitekturi [39]. Izvanmrežno izračunava proračune kvara za određivanje usmjerenih i neusmjerenih postavki nadstrujnih releja, koje se zatim ažuriraju periodički. Iako adaptivni releji pružaju fleksibilnost, ipak imaju svoje nedostatke. Zamjena svih postojećih releja adaptivnim je vrlo skupa te zahtijeva nadogradnju postojećih zaštitnih shema koje se trenutno koriste u distribucijskim sustavima. Dodatno, adaptivni releji obično trebaju komunikacijsku infrastrukturu za pouzdan i brz rad. Štoviše, prethodno znanje o svim mogućim konfiguracijama distribuiranih izvora energije bi se trebalo prilagoditi pravilima adaptivnog podešavanja releja, što adaptivne releje čini vrlo teškim za implementaciju u slučaju velikih distribuiranih izvora energije.

**Kompenzacija struje kvara** – Budući da se vrijednosti struje kvara distribuiranih izvora razlikuju između distribuiranih izvora u paralelnom pogonu na mrežu i otočnog rada, posebno u distribuiranim izvorima spojenim na mrežu preko inverterskog sučelja, vrlo je zahtjevno projektirati shemu zaštite koja radi i učinkovita je i pouzdana u oba načina rada. Stoga se dodatni izvor struje kvara ( engl. FCS – *fault current source*) može koristiti za kompenzaciju vrijednosti struje kvara različitih načina rada na sličnu razinu (vrijednost) što dopušta da konvencionalna nadstrujna zaštita funkcionira dobro u oba načina rada distribuiranog izvora [40]. Sinkroni kompenzatori ili uređaji za pohranu kao što su zamašnjaci, baterije i superkondenzatori se mogu koristiti kao dodatni izvori struje kvara za injektiranje velikih struja tijekom kvara. FCS koji se temelji na uređaju za pohranu energije obično sadrži uređaj za pohranu, energetske elektroničke pretvarač, krug za okidanje te modul za punjenje. Čim se kvar otkrije, FCS se koristi za vraćanje napona u sustavu, ubrizgavajući koliko god struje je potrebno. Nakon što se kvar ukloni, FCS se isključuje. Glavni problem sa kompenzacijom struje kvara u distribuiranim izvorima je da zahtijeva značajna ulaganja.

## 4. ANALIZA I PRIJEDLOG PODEŠENJA ZAŠTITE ZA OBNOVLJIVE IZVORE ENERGIJE SPOJENE PREKO INVERTERSKIH SUČELJA

U ovom će se dijelu izvršiti analiza i prijedlog podešenja zaštite za vjetroagregate i općenito obnovljive izvore energije spojene preko inverterskog sučelja te dati primjere analizirane mreže u programskom paketu DigSILENT te navesti načine parametriranja zaštite pri proizvodnji energije iz sinkronih generatora odnosno konvencionalnih izvora i parametriranja zaštite kod vjetroagregata spojenih preko inverterskog sučelja. Parametriranje zaštite je specifično i jedinstveno za svaku mrežu te se zaštita uvijek mora prilagoditi i parametrirati prema trenutnim uvjetima u mreži, iznosu struje kratkog spoja, dopuštenom odstupanju frekvencije u mreži od nazivne te dopuštenom odstupanju napona od nazivnog definiranih prema mrežnim pravilima.

Mreža koja se sastoji od 9 sabirnica predstavlja jednostavan model mreže korišten za parametriranje i prijedlog podešenja zaštite. Predstavlja mali prijenosni sustav koji se sastoji od devet sabirnica, tri sinkrona generatora, tri opterećenja sustava raspodijeljenih po sabirnicama, šest vodova te tri transformatora prikazanih na slici 4.1. Mreža je simulirana u programskom paketu DIgSILENT PowerFactory. Nazivni napon mreže iznosi 230 kV, te nazivna frekvencija iznosi 60 Hz. Opterećenja sustava su modelirana kao konstantna opterećenja aktivne i reaktivne snage te su neovisna o naponu. Generator G1 je predstavljen kao referentni (engl. *slack*) generator s iznosom napona 1.04 p.u. i kutom napona od 0 stupnjeva. Generatori G2 i G3 su konfigurirani na način da reguliraju injekciju radne snage te održavaju naponsku razinu u rasponu od 0.95-1.05 p.u. (engl. *per unit-a*) na spojenim sabirnicama. Vodovi su parametrirani prema baznoj kompleksnoj snazi sustava koja iznosi 100 MVA te je duljina svih vodova jedan kilometar i nazivna struja 1 kA. Sustav sadrži tri uzlazna transformatora koji podižu napon svakog generatora u mreži na 230 kV te su izabrani prema snazi generatora koji je spojen na istu sabirnicu. Vektorska grupa spoja sva tri transformatora je YNd5 što predstavlja uzemljeni zvijezda spoj na primaru te neuzemljeni trokut spoj na sekundaru sa zakretom faznog napona za 150 stupnjeva. Jednopolna shema mreže te parametri mreže su prikazani na slici 4.1. i u tablicama 4.1. i 4.2. te su korišteni za potrebe simulacije.



Sl. 4.1. Jednopolna shema mreže s legendom naponskih razina

Tablica 4.1. Opterećenja sustava i njihova lokacija u mreži

Opterećenje	Sabirnica	P [MW]	Q [MVAR]
Opterećenje A	5	125	50
Opterećenje B	6	90	30
Opterećenje C	8	100	35

Tablica 4.2. Parametri vodova i njihova lokacija u mreži

Vod	Od sabirnice:	Do sabirnice:	Radni otpor R[Ω]	Reaktancija X[Ω]	Susceptancija B[μS]
Vod 4-5	4	5	5,2900	44,9650	332,70
Vod 4-6	4	6	8,9930	48,6680	298,69
Vod 5-7	5	7	16,928	85,1690	578,45
Vod 6-9	6	9	20,631	89,9300	676,75
Vod 7-8	7	8	4,4965	38,0880	281,66
Vod 8-9	8	9	6,2951	53,3232	395,08

Tablica 4.3. Parametri generatora s obzirom na nazivnu snagu korišteni pri simulaciji u paketu PowerFactory

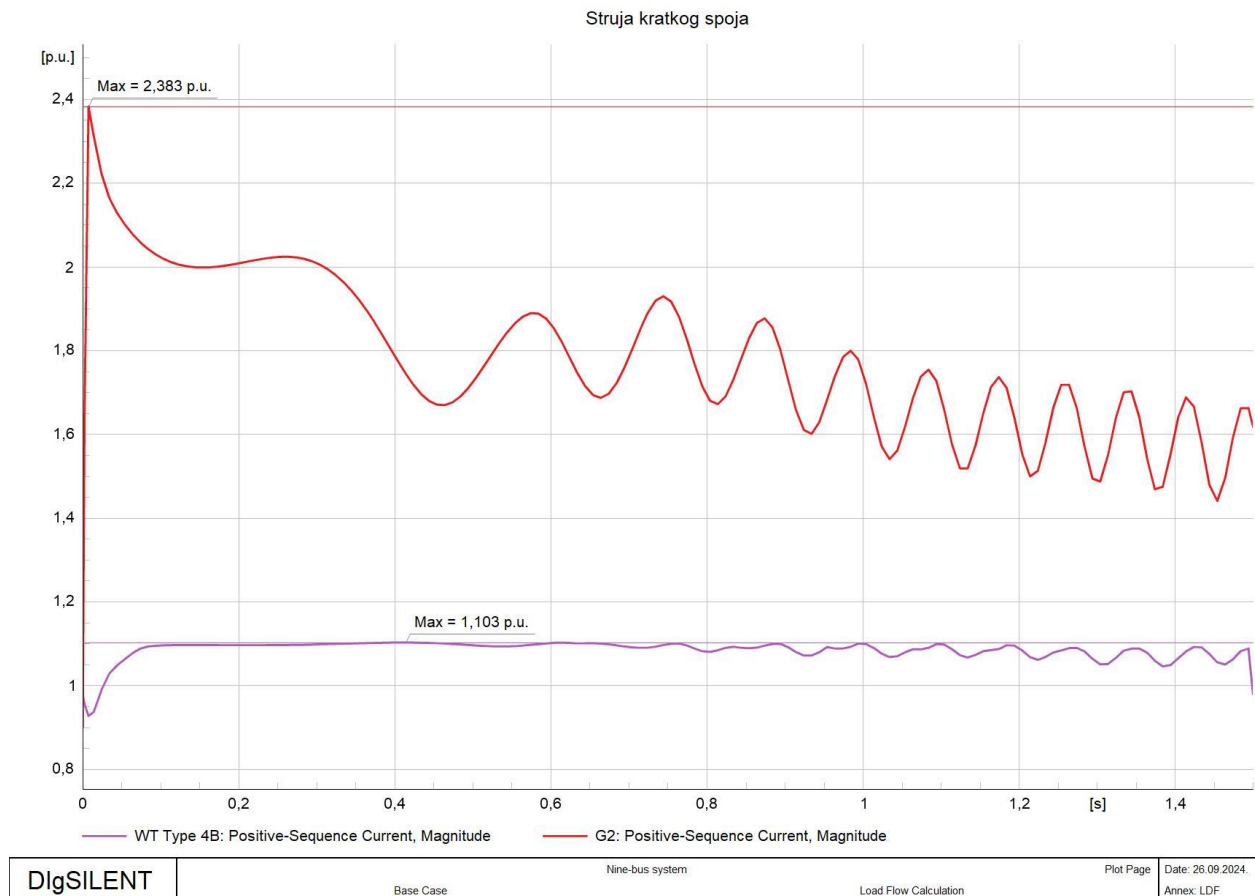
Vrijednost	Generator -G1	Generator - G2	Generator - G3
Nazivna prividna snaga [MVA]	247,5	192,0	128,0
Nazivni napon [kV]	16,5	18,0	13,8
Faktor snage	1,00	0,85	0,85
Nazivna brzina [rpm]	180	3600	3600
Sinkrona reaktancija $x_d$ [p.u.]	0,3614	1,7199	1,6800
Tranzijentna reaktancija $x'_d$ [p.u.]	0,1505	0,2300	0,2321
$x_q$ [p.u.]	0,2328	1,6598	1,6100
$x'_q$ [p.u.]	-	0,3780	0,3200
Rasipna reaktancija – $x_1$ [p.u.]	0,0832	0,1000	0,0950
Inercijska konstanta – H [s]	9,5515	3,9216	2,7655

Tablica 4.4. Parametri transformatora i njihova lokacija u mreži

Transformator	Od sabirnice:	Do sabirnice:	Nazivna snaga [MVA]	Prijenosni omjer [kV]	Napon kratkog spoja $u_k$ [%]
T1	1	4	250	230/16,5	14,4
T2	2	7	200	230/18,0	12,5
T3	3	9	150	230/13,8	8,79

#### 4.1. Razlike između parametiranja nadstrujne zaštite između konvencionalnih sinkronih generatora i vjetroagregata spojenih preko inverterskog sučelja

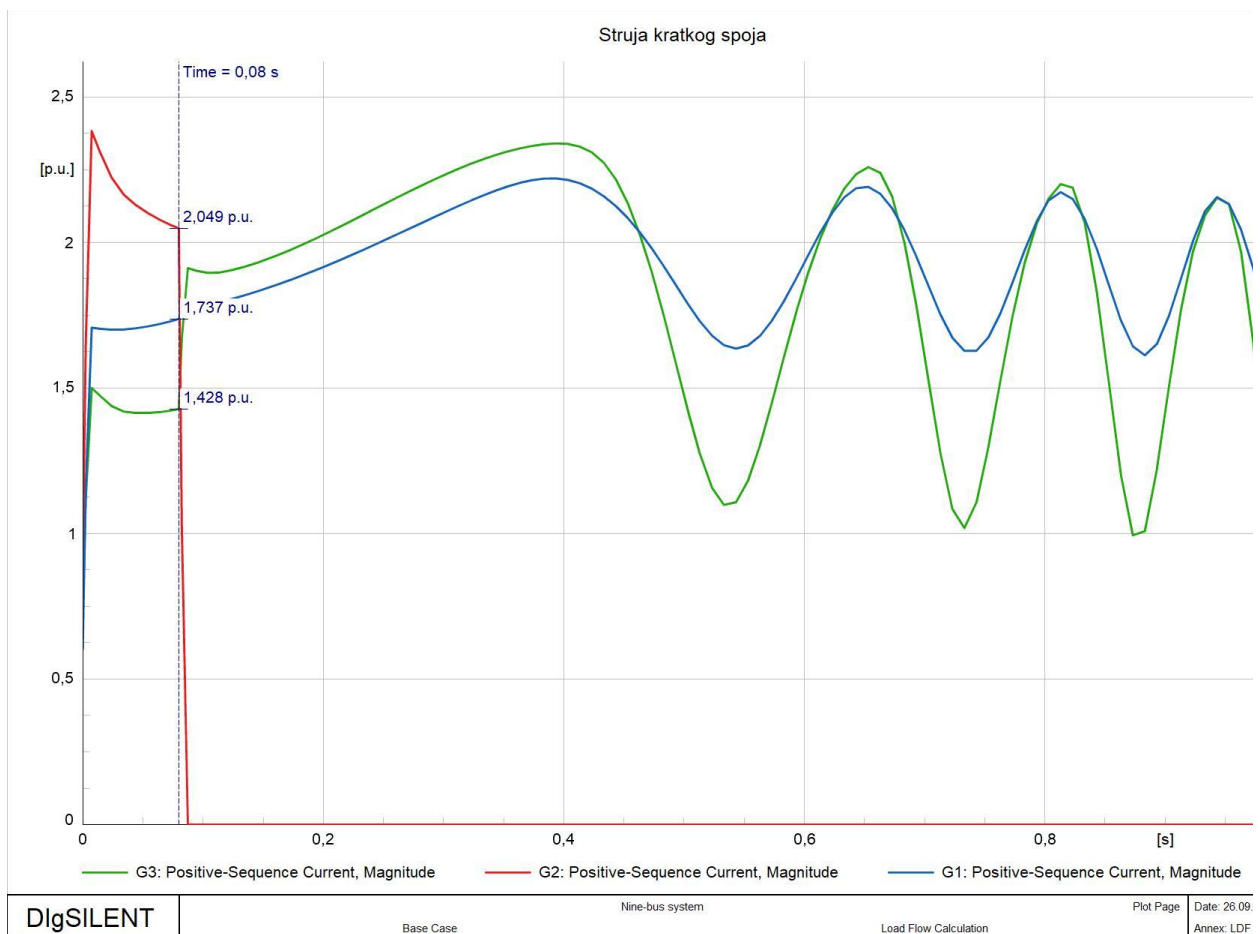
Velika mana obnovljivih izvora energije spojenih preko inverterskih sučelja je ta da ne mogu dati struju kratkog spoja većeg raspona od  $1,1-1,3xI_n$  nazivne struje invertera. Nadstrujna zaštita se u slučaju obnovljivih izvora energije spojenih preko inverterskog sučelja najčešće koristi za zaštitu opreme, kabela i povezivanja između invertera i mreže.



Sl. 4.2. Doprinos struji kratkog spoja od strane sinkronog generatora i vjetroagregata spojenim preko inverterskog sučelja

U simulacijskom slučaju na temelju IEEE 9-BUS mreže će se prikazati korištenje trofazne neusmjerene nadstrujne zaštite ANSI 50/51 te će se prikazati na koji način i kako djeluje zaštita za sinkroni generator, a kako za inverter u ovom slučaju. Simuliran je trofazni simetrični kratki spoj na sredini voda 2. S obzirom na rezultate simulacije i oscilogram iznad može se primijetiti kako inverter u mrežu daje maksimalan iznos struji kratkog spoja 1,103 p.u. nazivne struje invertera dok sinkroni generator daje 2,383 p.u. nazivne struje. To utječe na podešenje nadstrujne zaštite odnosno brzi nadstrujni član zaštitnog uređaja ne može biti primijenjen u zaštiti od kratkog spoja kao kod konvencionalnih izvora. Brzi nadstrujni releji mogu reagirati na velike vrijednosti strujnih udara odnosno u slučaju kratkog spoja, ali zbog ograničenja struje invertera neće moći detektirati kratak spoj kao u mreži s konvencionalnim izvorima energije.

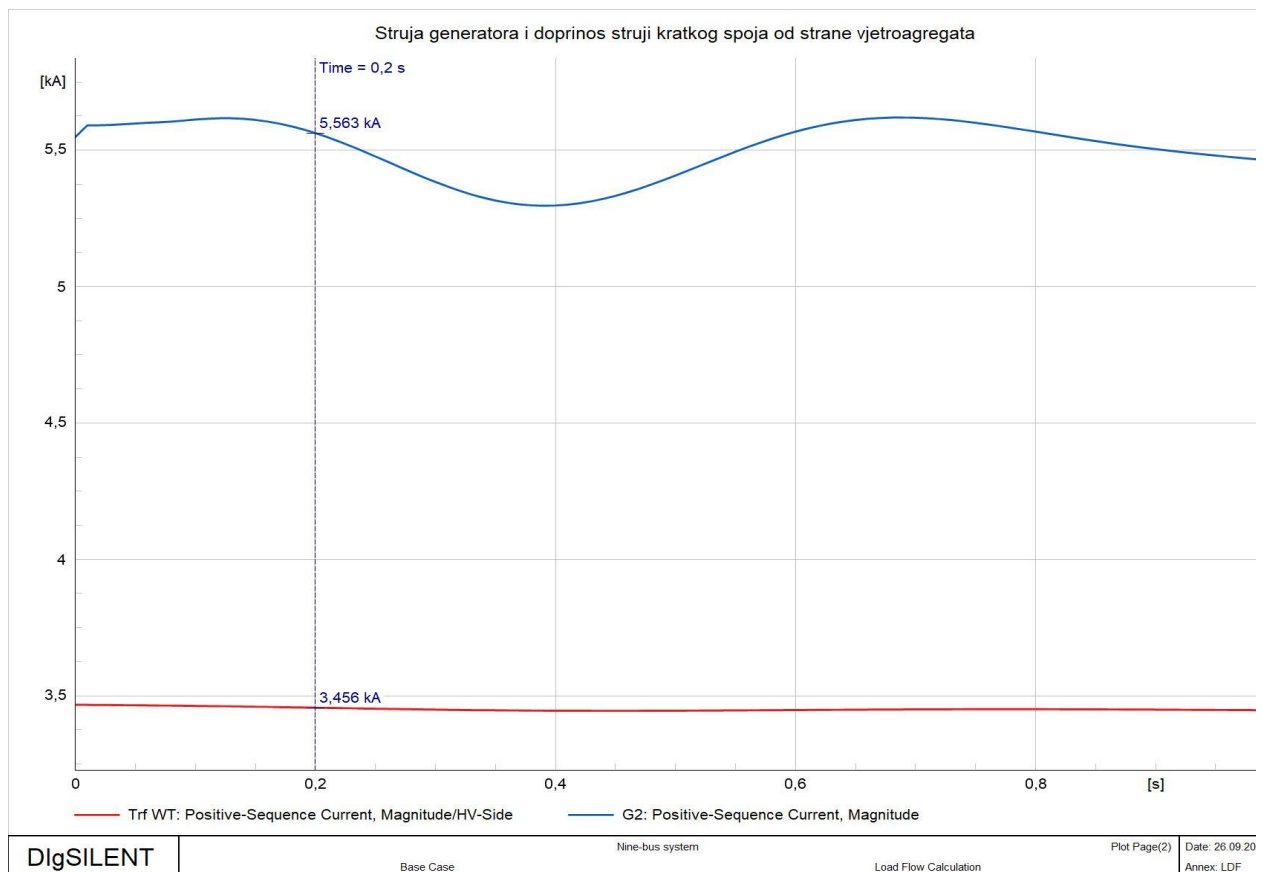
Na slici 4.3. će se prikazati funkcioniranje nadstrujnog releja ANSI 50/ 51 za potrebe isključenja sinkronog generatora. Struja prorade je podešena na 200% nazivne struje odnosno na 2 p.u. za vrijeme prorade koje iznosi 80 ms. Prema oscilogramu dolje može se primijetiti kako je zaštita uspješno isključila sinkroni generator G2 iz mreže te on više ne napaja mjesto kratkog spoja. Zaštita za generatore G1 i G3 nije parametirana, no vidi se da bi njih nadstrujni relej isključio iz mreže nešto kasnije s obzirom da postižu iznos od 200% nazivne struje nešto kasnije od promatranog generatora G2.



#### SI. 4.3. Isključenje sinkronog generatora G2 korištenjem nadstrujnog releja ANSI 50/51

Tablica 4.5. Podešenje nadstrujne zaštite sinkronog generatora

Funkcija	PODEŠENJE
Struja prorade	200%
Vrijeme prorade	80 ms



Sl. 4.4. Struja generatora za vrijeme normalnog pogona te doprinos struji kratkog spoja od strane invertera

Isto tako, jedan od problema korištenja nadstrujne zaštite za zaštitu invertera je slučaj kada je struja u mreži za vrijeme normalnog pogona veća nego struja koju inverter daje u mrežu za vrijeme kratkog spoja, te ovisno o selektivnosti zaštite to također može predstavljati znatan problem. U ovom slučaju kao što se može vidjeti na slici 4.4. generator G2 koji je spojen na istu sabirnicu kao i vjetroagregat spojen preko inverterskog sučelja prije uzlaznog transformatora odnosno pri svom nazivnom naponu od 18 kV daje za vrijeme normalnog pogona struju iznosa 5,46 kA. S obzirom da inverter u ovom slučaju daje maksimalan doprinos struji kratkog spoja od 3,5 kA, treba paziti na parametrisiranje nadstrujne zaštite te ne isključiti generator G2 te sabirnicu 2 nazivnog napona 18 kV iz pogona za vrijeme normalnog pogonskog stanja u mreži.

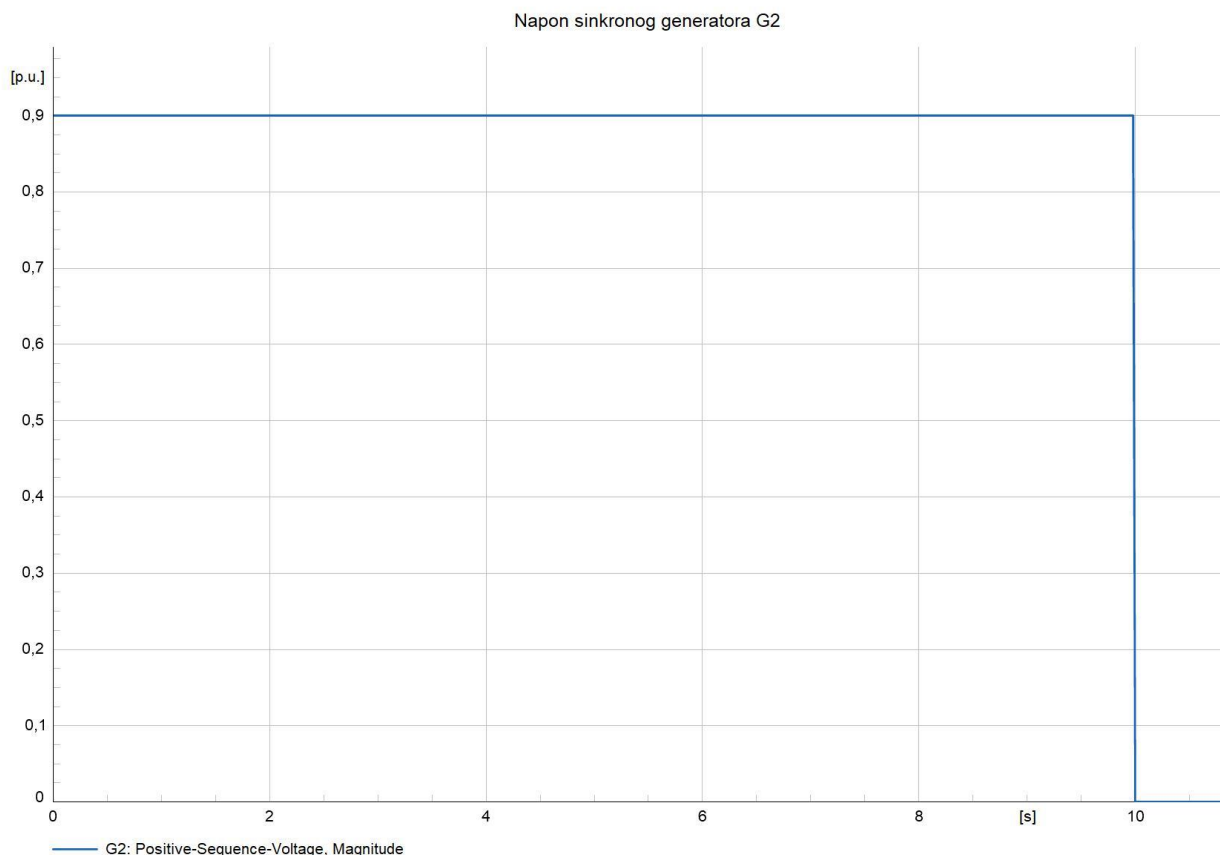
Planirano rješenje ovog problema je parametrisiranje nadstrujne zaštite na takav način da uzima u obzir maksimalnu snagu izmjenjivača odnosno invertera. Isto tako, važno je napomenuti koji releji će se koristiti za šticeenje dijela mreže. Brzi nadstrujni releji neće reagirati na kratke spojeve u slučaju inverterskih sučelja jer je struja kvara znatno ograničena samim inverterom dok bi se mogli koristiti nadstrujni releji kojima je moguće podešavanje vremena i struje prorade za prepoznavanje sporijih, dugotrajnijih struja kratkih spojeva, ali se njihovo vrijeme aktivacije mora uskladiti sa maksimalno dozvoljenom strujom invertera.

## 4.2. Razlike između parametriranja podnaponske zaštite između konvencionalnih sinkronih generatora i vjetroagregata spojenih preko inverterskog sučelja

U slučaju podnaponske zaštite kod sinkronih generatora dolazi do prorade kada napon padne ispod dozvoljene granice, obično 0,85 p.u. Podnaponska zaštita je obično parametrirana na način da dolazi do prorade ako napon mreže ostane ispod dozvoljene vrijednosti određeni period, većinom do nekoliko sekundi, ovisno o inerciji i konstanti inercije sinkronog generatora kako bi se izbjeglo oštećenje generatora. U ovom primjeru, koristit će se parametri prikazane u tablici 4.6. za parametriranje spore podnaponske zaštite ANSI 27, niži stupanj prorade  $U_{<}$ .

Tablica 4.6. Podešenje spore podnaponske zaštite, niži stupanj prorade  $U_{<}$  sinkronog generatora

Funkcija	PODEŠENJE
Napon prorade	90%
Vrijeme prorade	10 s



DigSILENT	Base Case	Nine-bus system	Load Flow Calculation	podnaponska zaštita	Date: 27.09.21 Annex: LDF
-----------	-----------	-----------------	-----------------------	---------------------	------------------------------

Sl. 4.5. Isključenje generatora G2 iz mreže korištenjem spore podnaponske zaštite  $U_{<}$

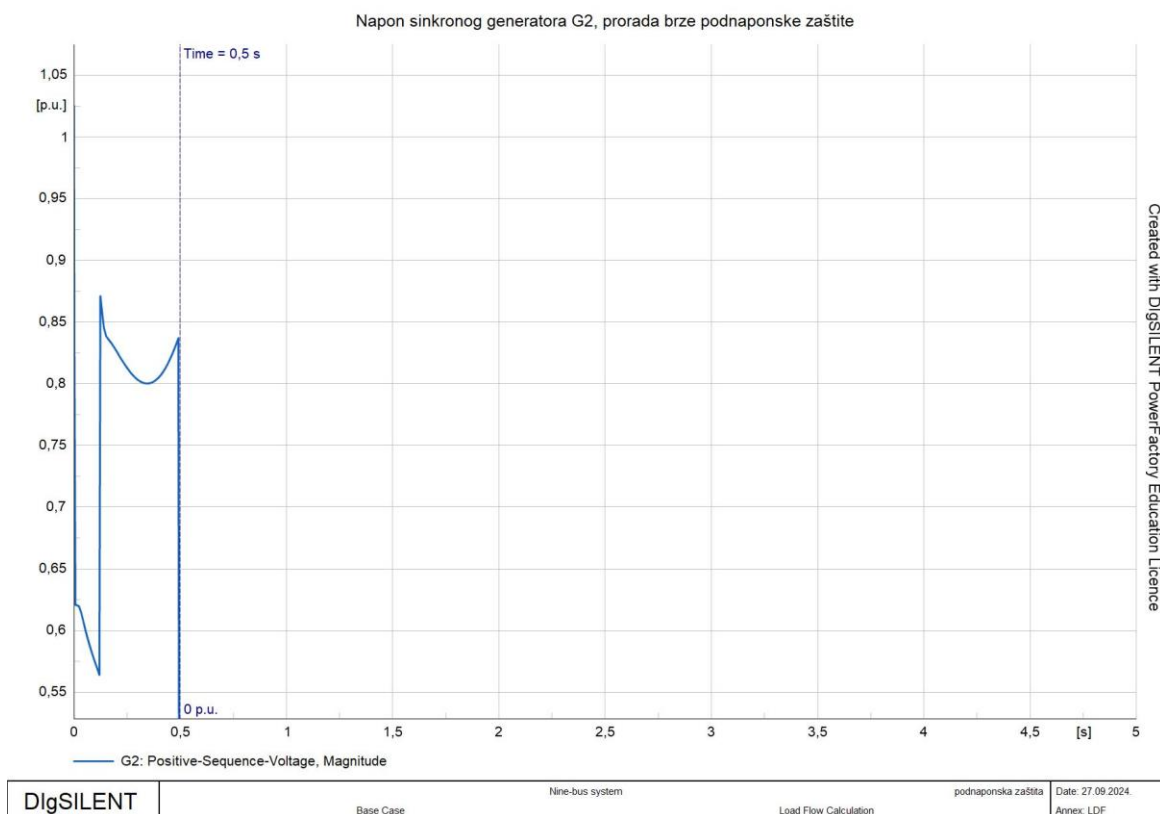


Prorada spore podnaponske zaštite je simulirana u mreži dodavanjem dodatnog opterećenja u mreži gdje dolazi do pada napona na generatoru te do prorade spore podnaponske zaštite.

Isto tako, za zaštitu sinkronog generatora se koristi i brza podnaponska zaštita koja reagira znatno brže, ali je napon prorade podešen na nižu vrijednost prikazanim u tablici 4.7. U mreži je simuliran trofazni simetrični kratki spoj u trajanju od 100 ms na vodu 2 te s obzirom na oscilogram 4.6. može se primijetiti kako početni pad napona u trenutku kratkog spoja pada do vrijednosti od čak 0,5 p.u., ali to za sinkroni generator ne predstavlja problem s obzirom da ima znatnu inerciju pohranjenu kao kinetička energija vrtnje stroja koja u nekoliko milisekundi podiže napon do vrijednosti od 0.9 p.u. Nakon toga dolazi do ponovnog blažeg pada napona s obzirom da dolazi do čišćenja kratkog spoja te uključenja trošila na mrežu gdje dolazi do prorade brze podnaponske zaštite i samog isključenja generatora G2 s mreže.

Tablica 4.7. Podešenje brze podnaponske zaštite, viši stupanj prorade  $U \ll$  sinkronog generatora

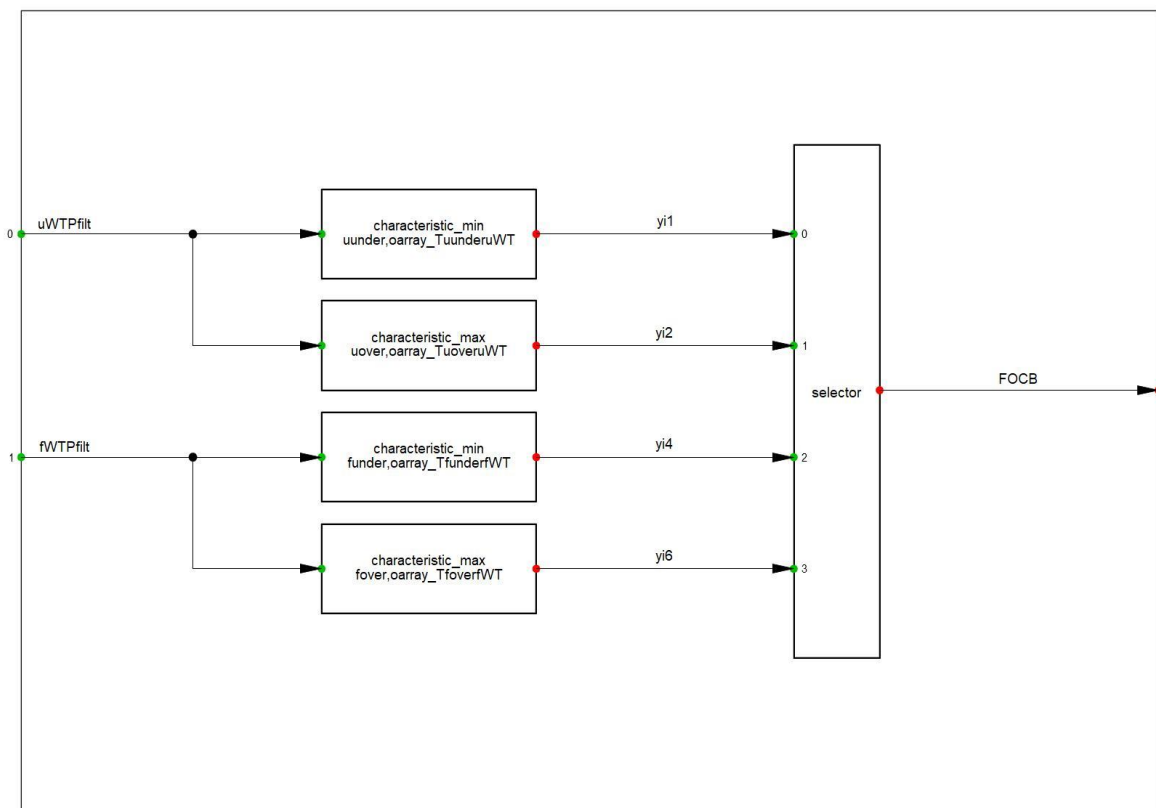
Funkcija	PODEŠENJE
Napon prorade	85%
Vrijeme prorade	0,5 s



Sl. 4.6. Isključenje sinkronog generatora G2 iz mreže korištenjem brze podnaponske zaštite  $U \ll$

U pogledu inverterskih sučelja, podnaponska zaštita se parametrira na način da reagira znatno brže jer su inverteri znatno osjetljiviji na promjene napona te se isključuju kompletno iz mreže kako bi se spriječilo oštećenje invertera te kako ne bi došlo do nestabilnog stanja u mreži. U slučaju niskog napona, inverteri mogu u vrlo kratkom vremenskom periodu smanjiti proizvodnju ili se potpuno isključiti jer nemaju mogućnost održavanja stabilne proizvodnje pri niskim naponima odnosno nemaju nikakvih rotacijskih masa tj. inercije kao što to imaju sinkroni generatori. Zaštita invertera od strane mreže kao što je prikazano na slici 4.7. se projektira prema standardu IEC 61400-27-1 te uključuje parametriranje nadnaponske te podnaponske zaštite, kao i nadfrekvencijske i podfrekvencijske zaštite invertera prikazanoj na slici 4.8.

Protection: Grid protection model acc. to IEC 61400-27-1 Ed. 2



Sl. 4.7. Parametriranje zaštite invertera od strane mreže, blok shema, DigSILENT

	Parameter
uover WT over voltage protection activation threshold [Ub]	1,15
uunder WT under voltage protection activation threshold...	0,85
fover WT over frequency protection activation threshold ...	1,02
funder WT under frequency protection activation thresh...	0,98

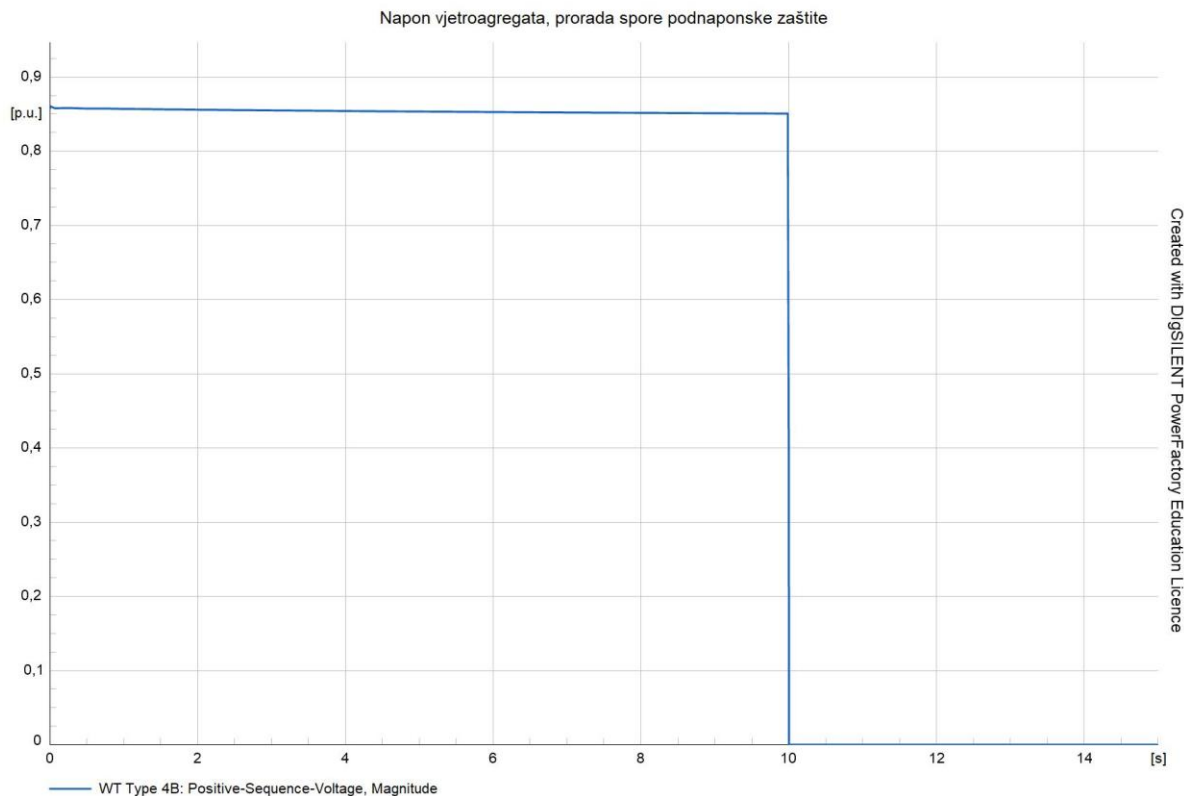
Export to Clipboard    Set to default    Show Graphic

Sl. 4.8. Vrijednosti parametara za zaštitu invertera u programskom paketu DigSILENT

U ovom slučaju dodano je opterećenje na sabirnice 5, 6 i 8 te kao što se može primijetiti na oscilogramu 4.9. napon na sabirnici na kojoj je spojen vjetroagregat je pao ispod dopuštene granice koju inverter može podnijeti bez da dođe do njegovog oštećenja, a to u ovom slučaju iznosi 0,9 p.u. te je došlo do prorade spore podnaponske zaštite. U tablici 4.8. se nalaze parametri spore podnaponske zaštite koja će se prikazati u idućem koraku.

Tablica 4.8. Podešenje spore podnaponske zaštite, niži stupanj prorade  $U <$  invertera

Funkcija	PODEŠENJE
Napon prorade	90%
Vrijeme prorade	10 s



DigSILENT	Base Case	Nine-bus system	Load Flow Calculation	Plot Page(4)	Date: 28.09.2024. Annex: LDF
-----------	-----------	-----------------	-----------------------	--------------	---------------------------------

Sl. 4.9. Spora podnaponska zaštita isključuje vjetroagregat spojen preko invertera iz mreže, modelirano u DigSILENT-u

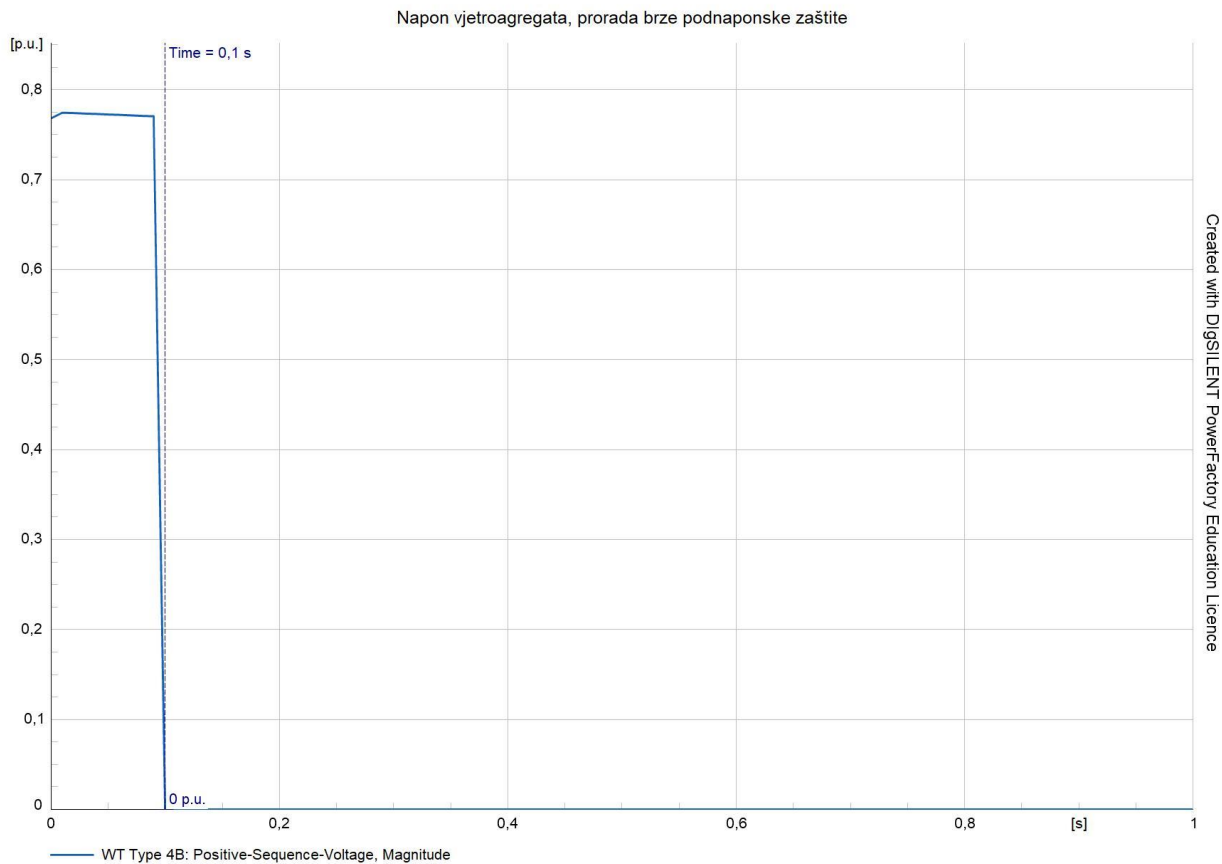
U pogledu spore podnaponske zaštite nema razlike pri parametriranju između sinkronog generatora i invertera s obzirom da neće doći do oštećenja invertera te se inverter tijekom subtranzijentnog perioda odnosno u prvih nekoliko milisekundi nakon kvara u mreži ponaša kao naponski izvor i daje doprinos struji kratkog spoja koja je ograničena uređajima energetske elektronike koji se nalaze u samom inverteru.

U slučaju parametriranja brze podnaponske zaštite, može se primijetiti kako je inverter znatno osjetljiviji na velike padove napona odnosno da zaštita mora biti podešena da brže reagira nego što je to slučaj kod zaštite sinkronog generatora. Razlog tomu je što inverter nema rotirajućih dijelova i nema inerciju kao sinkroni generator te je oprema odnosno poluvodički spojevi koji se nalaze u samom inverteru su znatno osjetljiviji na velike padove napona nego što je to slučaj kod sinkronog generatora.

Tablica 4.9. Podešenje brze podnaponske zaštite, viši stupanj prorade  $U \ll$  invertera

Funkcija	PODEŠENJE
Napon prorade	85%
Vrijeme prorade	0,1 s

Do prorade brze podnaponske zaštite je došlo dodavanjem opterećenja sustavu gdje dolazi do pada napona na inverteru zbog nemogućnosti opskrbljivanja potrošača dostatnom jalovom i radnom snagom.



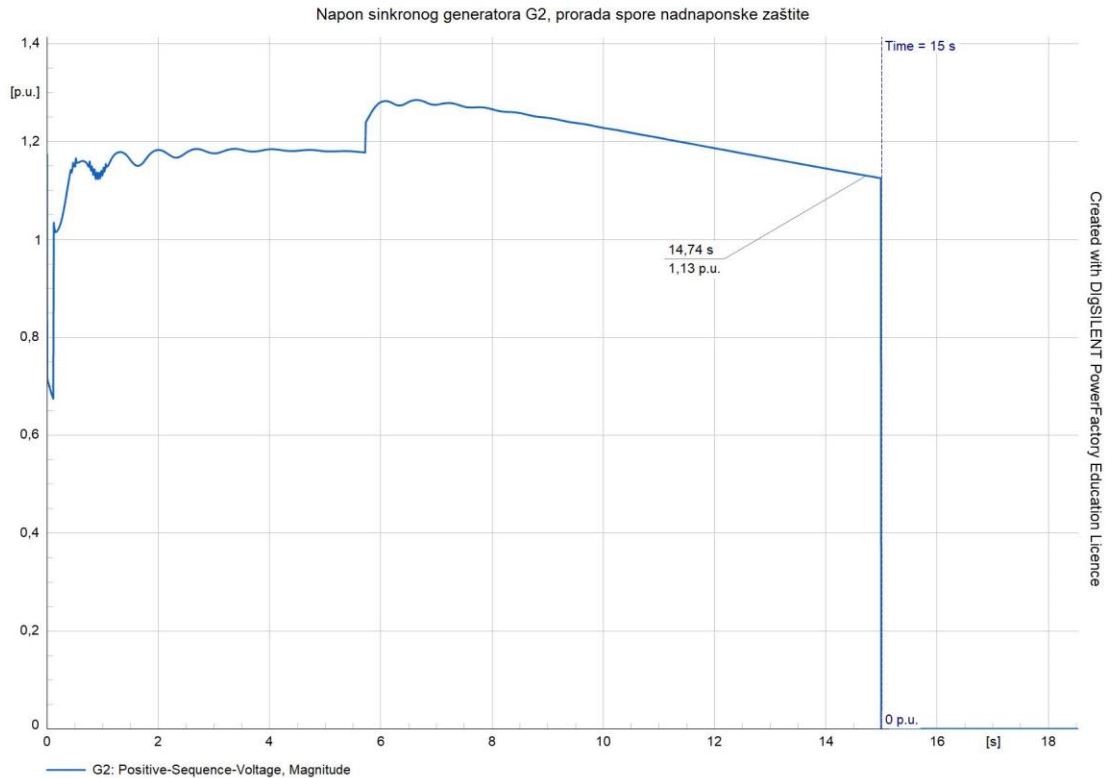
Sl. 4.10. Brza podnaponska zaštita isključuje vjetroagregat spojen preko invertera iz mreže, modelirano u DigSILENT-u

### 4.3. Razlike između parametriranja prenaponske zaštite između konvencionalnih sinkronih generatora i vjetroagregata spojenih preko inverteruskog sučelja

Prenaponska zaštita se u pravilu parametrira po istoj logici kao i podnaponska zaštita. Kod sinkronih generatora se aktivira kada napon u mreži pređe određenu vrijednost i mogu kratkoročno izdržati viši napon jer većina sinkronih generatora danas ima ugrađene sustave za automatsku regulaciju napona (engl. AVR – *automatic voltage regulator*) koji pokušavaju održavati napon u zadanim granicama. Prenaponska zaštita proradi tek kada ni automatska regulacija napona ne može održavati napon u danim granicama. U tablici 4.10. mogu se vidjeti parametri te vrijeme prorade spore prenaponske zaštite u slučaju sinkronog generatora.

Tablica 4.10. Podešenje spore prenaponske zaštite, niži stupanj prorade  $U >$  sinkronog generatora

Funkcija	PODEŠENJE
Napon prorade	110%
Vrijeme prorade	15 s

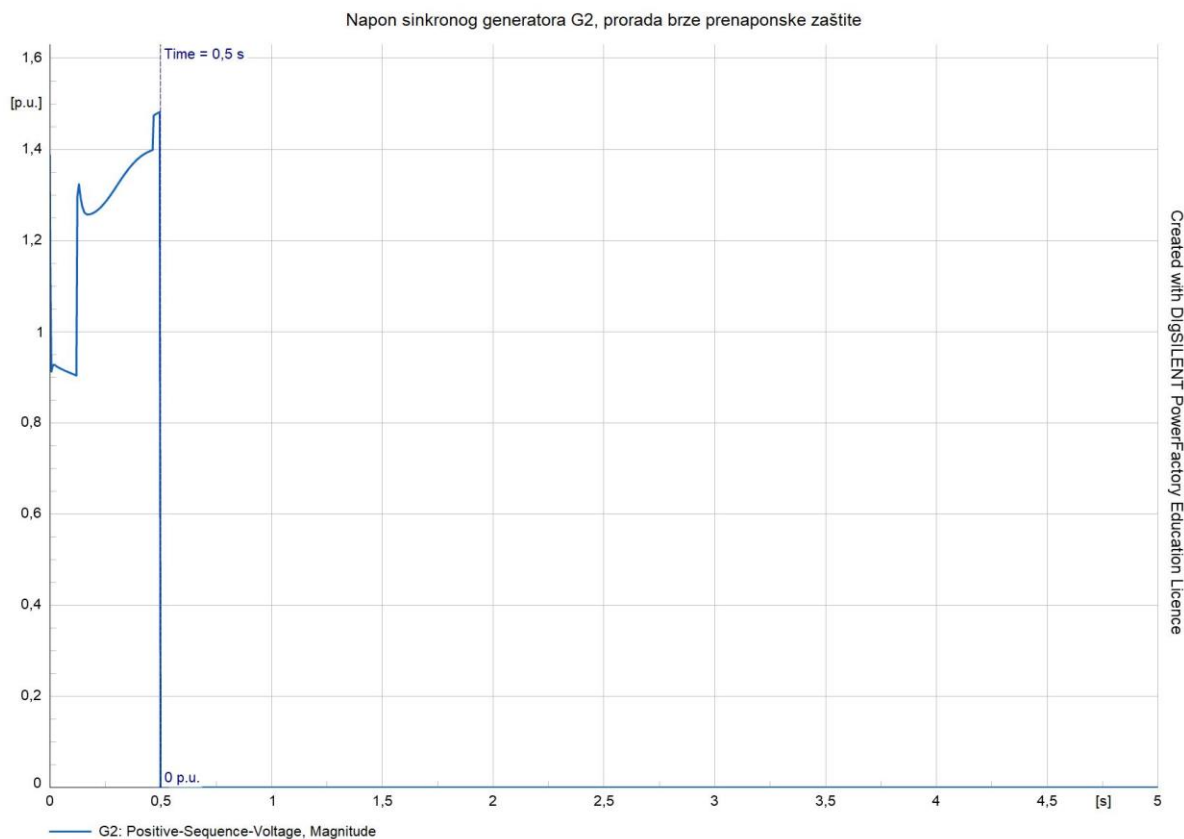


Sl. 4.11. Spora prenaponska zaštita isključuje sinkroni generator iz mreže, modelirano u DigSILENT-u

Do prorade prenaponske zaštite je došlo gašenjem opterećenja u mreži gdje dolazi do neravnoteže proizvodnje i potrošnje odnosno dolazi do porasta napona u mreži s obzirom da proizvodnja ostaje ista, a opterećenje mreže se smanjuje. U slijedećem koraku će se prikazati korištenje brze prenaponske zaštite sinkronog generatora.

Tablica 4.11. Podešenje brze prenaponske zaštite, viši stupanj prorade  $U \gg$  sinkronog generatora

Funkcija	PODEŠENJE
Napon prorade	115%
Vrijeme prorade	0,5 s



Sl. 4.12. Brza prenaponska zaštita isključuje sinkroni generator iz mreže, modelirano u DigSILENT-u

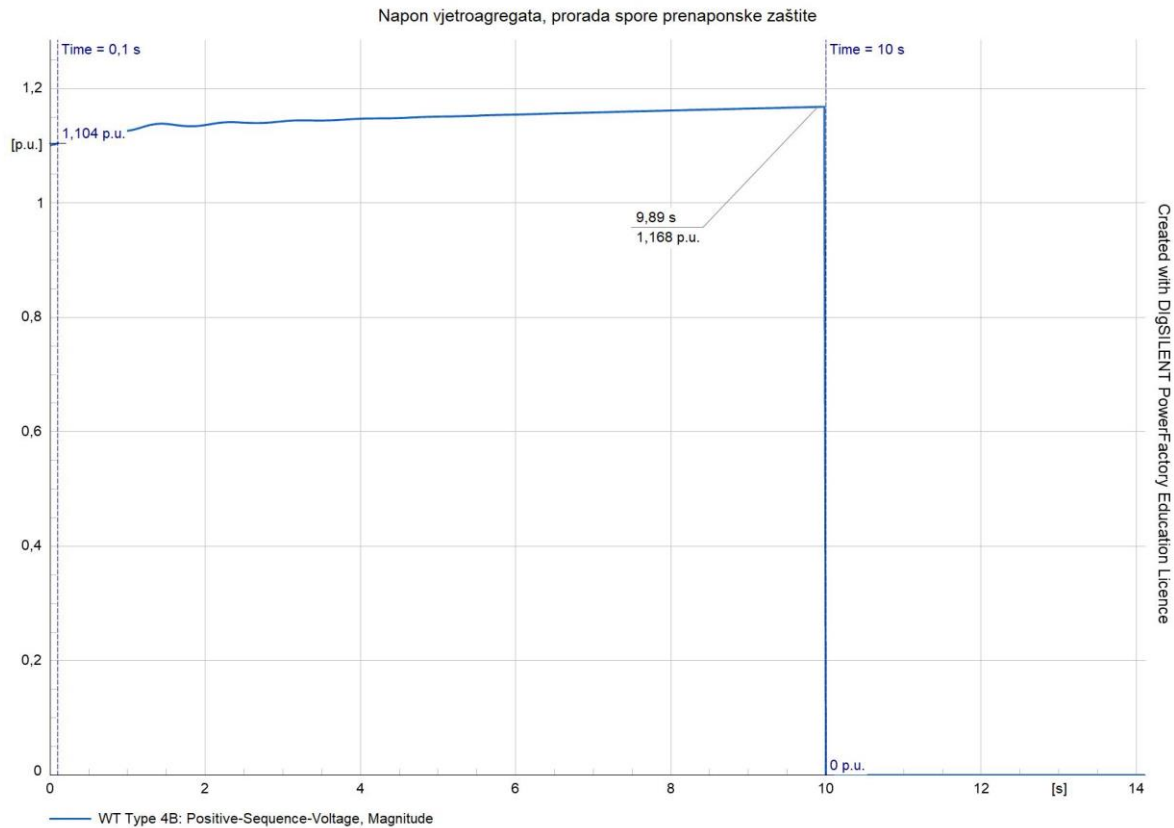
S obzirom na oscilogram iznad može se vidjeti kako dolazi do prorade brze prenaponske zaštite sinkronog generatora odnosno isključivanje sinkronog generatora G2 iz mreže. Napon u trenutku isključivanja je dostigao vrijednost od 1,45 p.u., a razlog tomu je ispad potrošača odnosno sabirnice 5 u mreži zbog simuliranja trofaznog simetričnog kratkog spoja u trajanju od 120 ms na vodu 2.

U slučaju inverterski spojenih obnovljivih izvora oni su znatno osjetljiviji na prenapon i inverteri puno brže reagiraju na prenapon kako bi zaštitili elektroničke komponente unutar samog invertera. Inverteri imaju sposobnost prilagođavanja izlazne snage, ali ako napon pređe određenu vrijednost, nadnaponska zaštita isključuje vjetroagregat kako bi spriječila oštećenje invertera te izvora spojenog na inverter.

U ovom primjeru će se prikazati prorada spore prenaponske zaštite invertera te isključivanje iz mreže. U tablici 4.12. se nalaze parametri korišteni za proradu spore prenaponske zaštite.

Tablica 4.12. Podešenje spore prenaponske zaštite, niži stupanj prorade  $U >$  invertera

Funkcija	PODEŠENJE
Napon prorade	110%
Vrijeme prorade	10 s



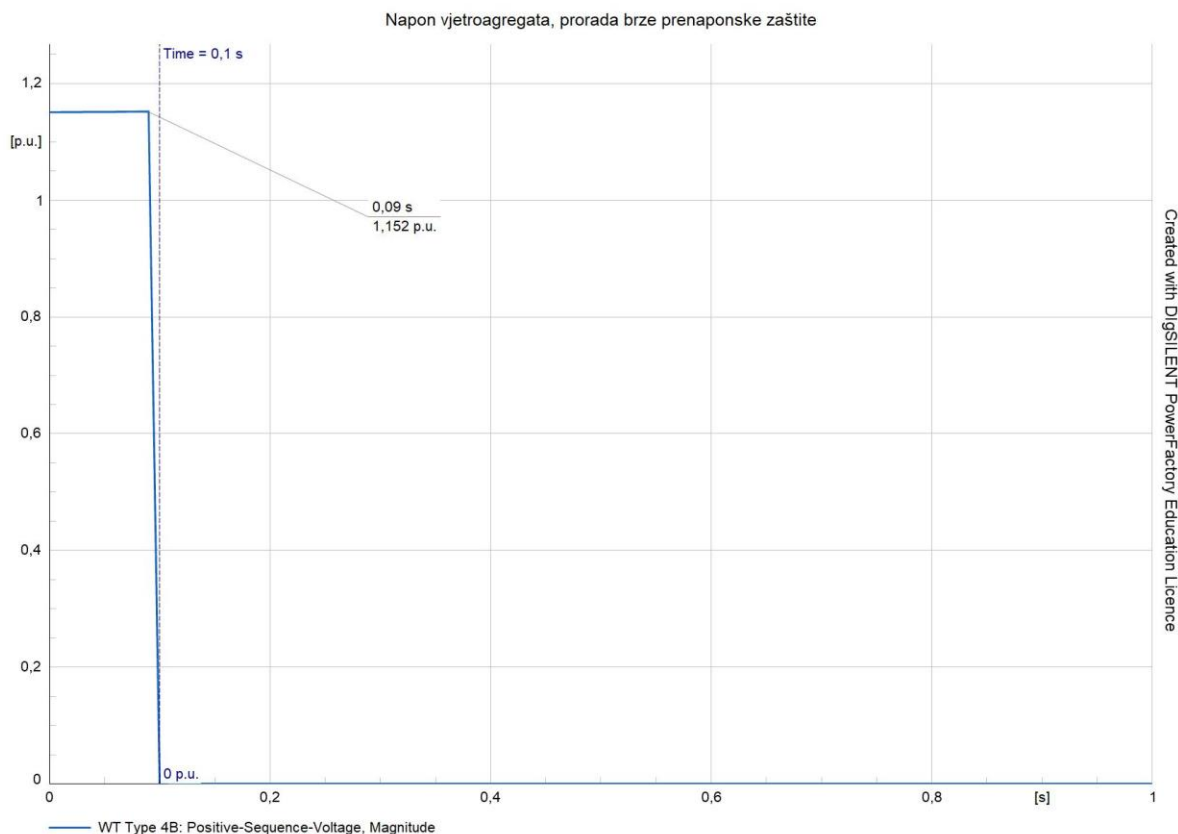
Sl. 4.13. Spora prenaponska zaštita isključuje vjetroagregat iz mreže, modelirano u DigSILENT-u

S obzirom na sinkroni generator, vidi se da je podešenje spore prenaponske zaštite podešeno s 15 sekundi na 10 sekundi odnosno inercija sinkronog generatora i automatska regulacija napona igraju znatnu ulogu pri izravnavanju napona te držanju sinkronog generatora unutar pogona znatno dulje nego što je to slučaj sa inverterom. U idućem koraku će se prikazati parametri te korištenje brze prenaponske zaštite invertera.

Tablica 4.13. Podešenje brze prenaponske zaštite, viši stupanj prorade  $U \gg$  invertera

Funkcija	PODEŠENJE
Napon prorade	115%
Vrijeme prorade	0,1 s





Sl. 4.14. Brza prenaponska zaštita isključuje vjetroagregat iz mreže, modelirano u DigSILENT-u

Na oscilogramu iznad može se primijetiti prorada brze prenaponske zaštite invertera te da je vrijeme prorade brze prenaponske zaštite invertera znatno kraće od brze prenaponske zaštite sinkronog generatora, a razlog tomu je zaštita elektroničke opreme koja se nalazi u samom inverteru te nemogućnost invertera da injektira jalovu odnosno radnu snagu pri znatnom povišenju napona u mreži.

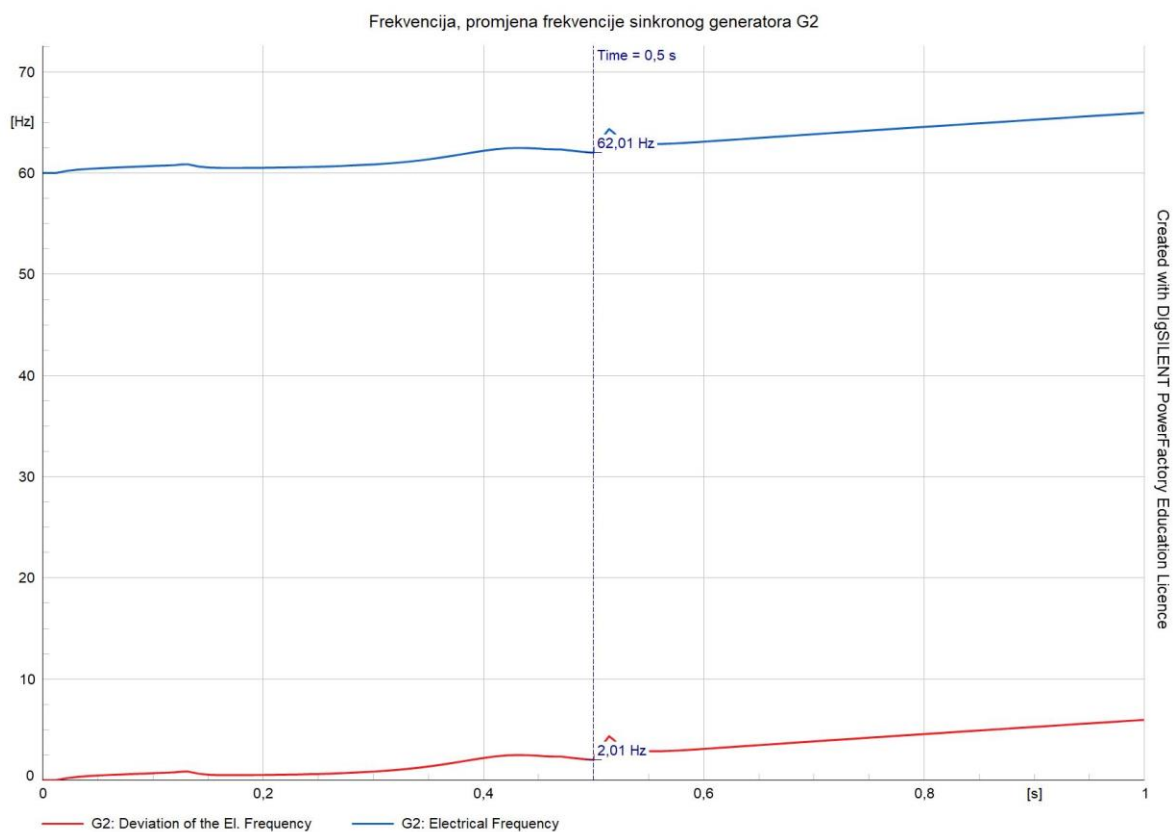
#### 4.4. Razlike između parametriranja nad / pod frekvencijske zaštite između konvencionalnih sinkronih generatora i vjetroagregata spojenih preko inverterskog sučelja

Podfrekvencijska i nadfrekvencijska zaštita služi za zaštitu elektroenergetskih sustava od previsokih ili preniskih iznosa frekvencije. Kod sinkronih generatora i obnovljivih izvora one imaju različit način parametriranja i zahtjeve zbog različitog načina funkcioniranja ovih tehnologija. Sinkroni generatori imaju mehaničku inerciju jer su direktno spojeni s rotirajućom masom što znači da znatno sporije reagiraju na propade ili porast frekvencije. Vrijednosti prorade podfrekvencijske zaštite su obično u intervalu od 47-49 Hz za mrežu s nazivnom frekvencijom od 50 Hz jer mogu tolerirati propad frekvencije bez oštećenja opreme. Nadfrekvencijska vrijednost

je obično postavljena na vrijednosti u rasponu 51-52 Hz. Sukladno tome, zbog mehaničke inercije, frekvencijska zaštita sinkronih generatora može imati veće odstupanje vrijednosti od nazivne frekvencije jer sinkroni generator može stabilizirati frekvenciju i ne zahtijeva isključenje za mali propad ili porast frekvencije. S obzirom na to, i vrijeme prorade zaštite je veće negoli kod inverterskih sučelja te je inače ovisno o veličini i snazi generatora i postavkama same mreže u rasponu od 0,3 – 1 sekunde. Na idućem primjeru će se prikazati parametriranje kao i način funkcioniranja nadfrekvencijske zaštite sinkronog generatora.

Tablica 4.14. Podešenje nadfrekvencijske zaštite, niži stupanj prorade  $f \gg$  sinkronog generatora

Funkcija	PODEŠENJE
Frekvencija prorade	61,5 Hz
Vrijeme prorade	0,3 s



Sl. 4.15. Nadfrekvencijska zaštita isključuje sinkroni generator iz mreže prikazano plavom krivuljom, crvena krivulja predstavlja odstupanje frekvencije od nazivne vrijednosti, modelirano u DigSILENT-u

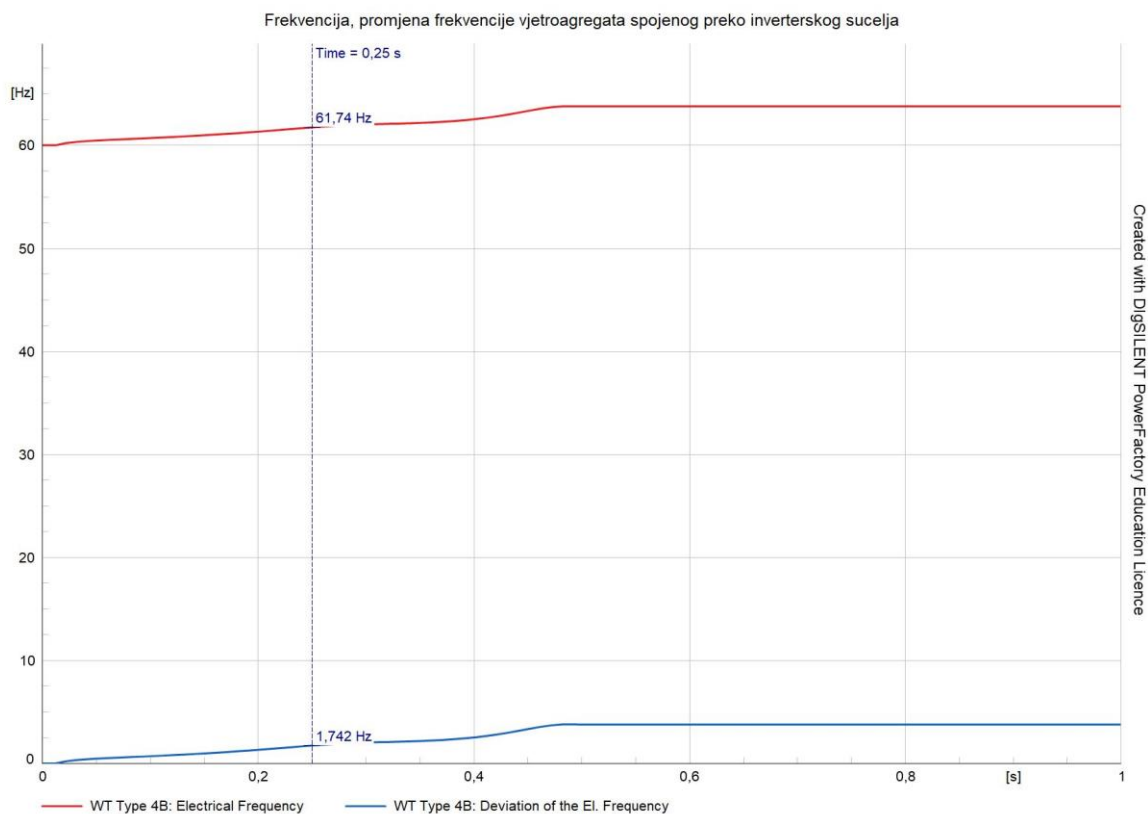
Na grafu iznad može se primijetiti trenutak kada dolazi do prorade nadnaponske zaštite u trenutku  $t = 500 \text{ ms}$  te se može primijetiti kako u trenutku odmah nakon isklopa sinkronog generatora s mrežom dolazi do znatnog porasta frekvencije odnosno to znači da je sinkroni generator uspješno isključen s mreže te da njegova frekvencija raste jer dolazi do potpunog gubitka opterećenja koje je generator imao dok je bio spojen na mrežu. Crvena krivulja predstavlja promjenu frekvencije

od nazivne frekvencije koja iznosi 60 Hz odnosno vidimo da u trenutku prorade nadfrekvencijske zaštite devijacija frekvencije od nazivne iznosi 2,01 Hz.

U slučaju vjetroagregata spojenih preko inverterskog sučelja pragovi za podfrekvencijsku zaštitu su viši, oko 49 – 49,5 Hz, a za nadfrekvencijsku zaštitu oko 50,5 – 51 Hz u mrežama nazivne frekvencije 50 Hz kako bi zaštita brže reagirala na nagli porast frekvencije. Vrijeme djelovanja zaštite je puno kraće nego kod sinkronih generatora i kreće se u rasponu od milisekundi do jedne sekunde. U tablici 4.15. će se prikazati parametre korištene za nadfrekvencijsku zaštitu vjetroagregata spojenog preko inverterskog sučelja kao i samu proradu nadfrekvencijske zaštite.

Tablica 4.15. Podešenje nadfrekvencijske zaštite, niži stupanj prorade  $f >>$  invertera

Funkcija	PODEŠENJE
Frekvencija prorade	61,5 Hz
Vrijeme prorade	0,1 s



Sl. 4.16. Nadfrekvencijska zaštita isključuje vjetroagregat iz mreže prikazano crvenom krivuljom, plava krivulja prikazuje odstupanje frekvencije od nazivne vrijednosti, modelirano u DigSILENT-u

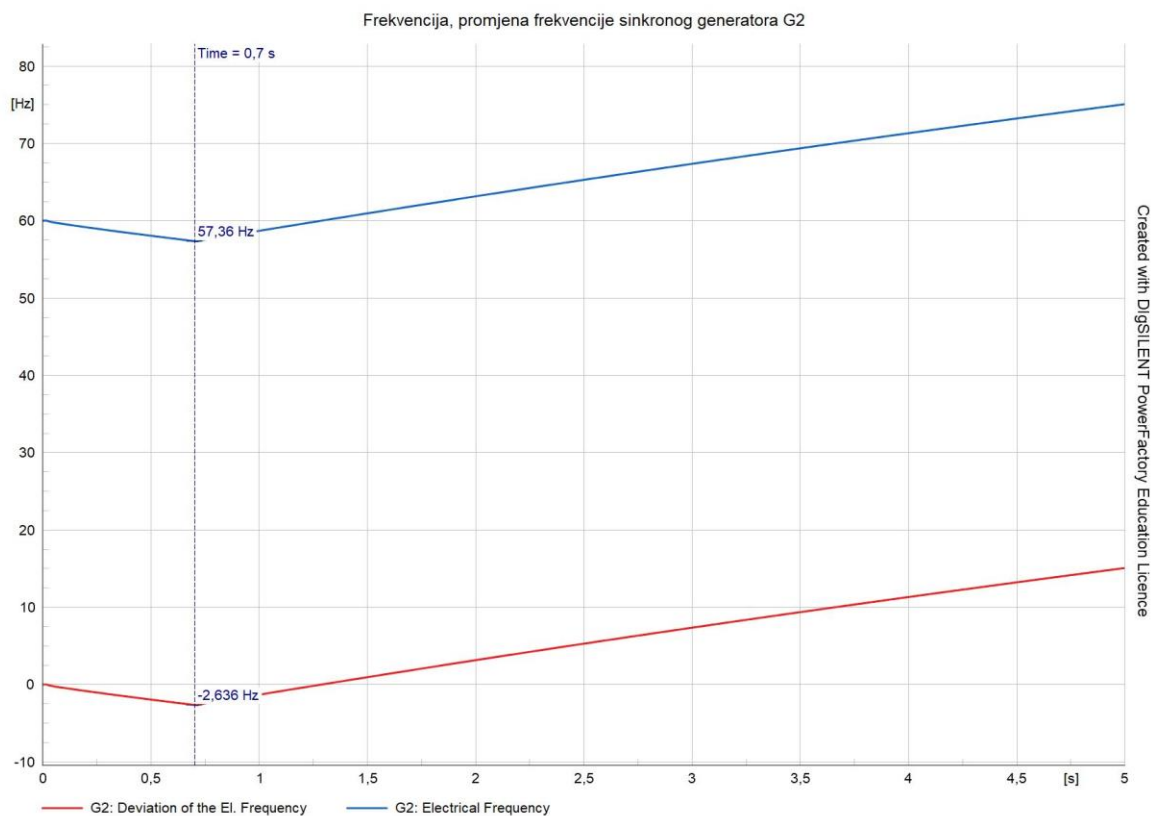
U ovom slučaju kao što se može vidjeti na oscilogramu iznad dolazi do prorade nadfrekvencijske zaštite vjetroagregata spojenog preko inverterskog sučelja gdje nadfrekvencijska zaštita isključuje

vjetroagregat iz mreže u trenutku  $t = 250$  ms milisekundi nakon simuliranja trofaznog kratkog spoja na vodu 2. Razlog tomu je nagli porast frekvencije jer je ispao potrošač velike snage odnosno napaja se od strane generatora G1 i G3.

Podfrekvencijska zaštita ANSI 81U se parametrira na sličan način kao i nadfrekvencijska te se u pravilu uzimaju veća odstupanja od nazivne frekvencije u slučaju propada frekvencije jer sinkroni generator posjeduje mehaničku inerciju i uvijek može nadoknaditi dio proizvodnje svojom inercijom.

Tablica 4.16. Podešenje podfrekvencijske zaštite, viši stupanj prorade  $f \ll$  sinkronog generatora

Funkcija	PODEŠENJE
Frekvencija prorade	57,5 Hz
Vrijeme prorade	0,3 s



Sl. 4.17. Podfrekvencijska zaštita isključuje sinkroni generator iz mreže prikazano plavom krivuljom, crvena krivulja prikazuje odstupanje frekvencije od nazivne vrijednosti, modelirano u DigSILENT-u

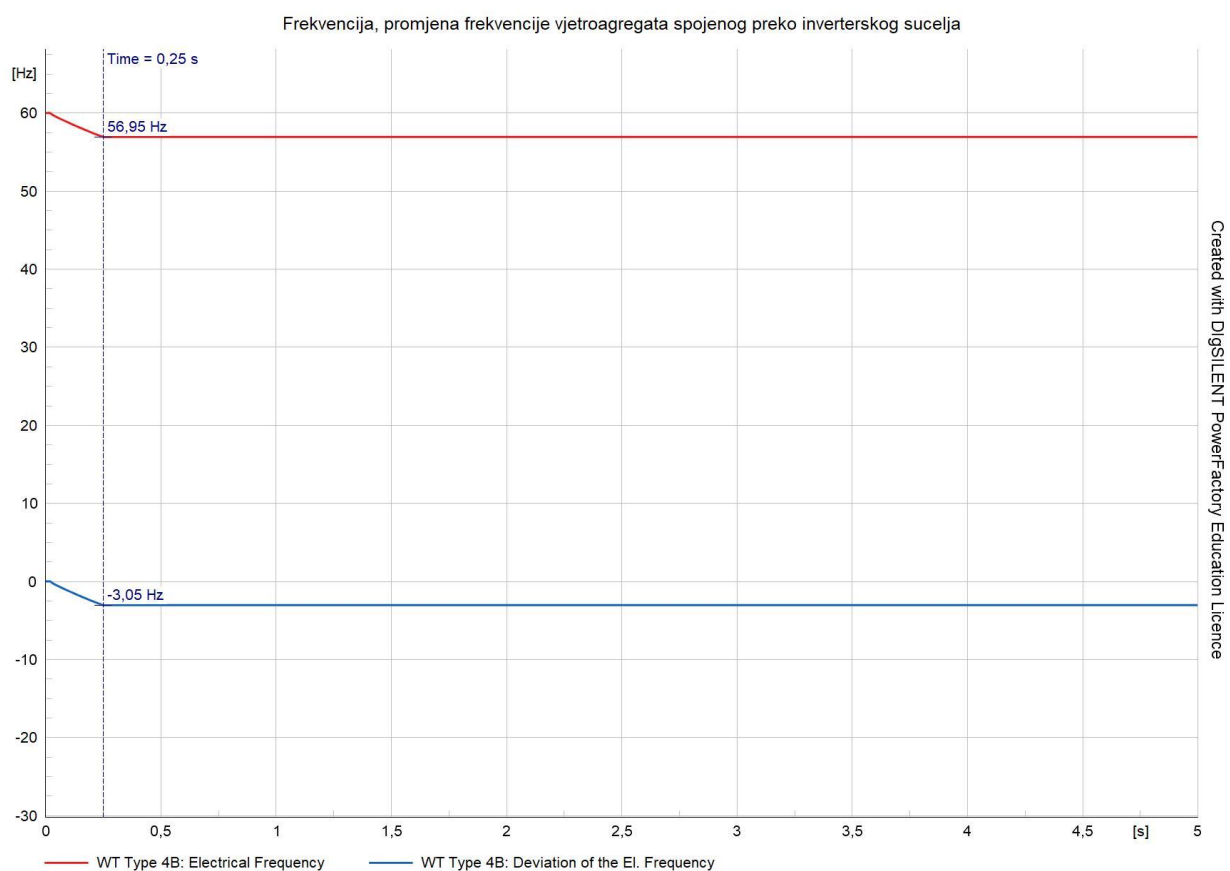
Na oscilogramu iznad može se primijetiti da zaštita isključuje sinkroni generator iz mreže u  $t = 700$  ms i da dolazi do linearnog povećavanja frekvencije nakon tog trenutka što znači da je sinkroni generator uspješno odspojen s mreže te da dolazi do povećanja frekvencije generatora s obzirom da se nalazi u praznom hodu. Crvena krivulja prikazuje odstupanje frekvencije od nazivne

vrijednosti odnosno u trenutku  $t = 700$  ms i može se očitati da odstupanje od nazivne frekvencije iznosi 2,636 Hz.

Za slučaj vjetroagregata spojenog preko inverterskog sučelja, prorada podfrekvencijske zaštite se parametrira da reagira puno brže na propad frekvencije nego što je slučaj kod sinkronog generatora. U primjeru ispod vide se parametri kao i vrijeme prorade podfrekvencijske zaštite.

Tablica 4.17. Podešenje podfrekvencijske zaštite, viši stupanj prorade  $f \ll$  invertera

Funkcija	PODEŠENJE
Frekvencija prorade	57,5 Hz
Vrijeme prorade	0,1 s



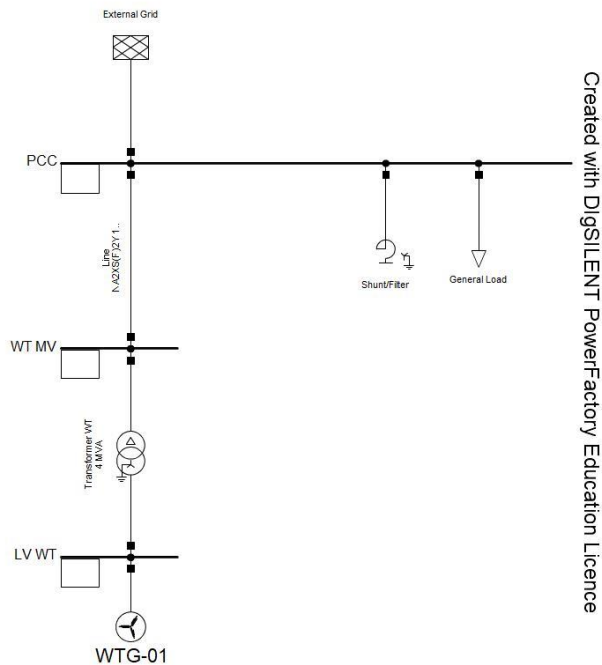
Sl. 4.18. Podfrekvencijska zaštita isključuje vjetroagregat iz mreže prikazano crvenom krivuljom, plava krivulja prikazuje odstupanje frekvencije od nazivne vrijednosti, modelirano u DigSILENT-u

Do prorade podfrekvencijske zaštite dolazi zbog smanjenja proizvodnje u mreži isključivanjem sinkronog generatora G3 iz mreže te samim time dolazi do neravnoteže proizvodnje i potrošnje što za posljedicu ima smanjenje frekvencije u mreži i prorade podfrekventne zaštite vjetroagregata spojenog preko inverterskog sučelja na mrežu. Plava krivulja prikazuje odstupanje frekvencije od

nazivne vrijednosti i može se primijetiti kako propad frekvencije u trenutku isključenja invertera s mreže iznosi preko 3 Hz.

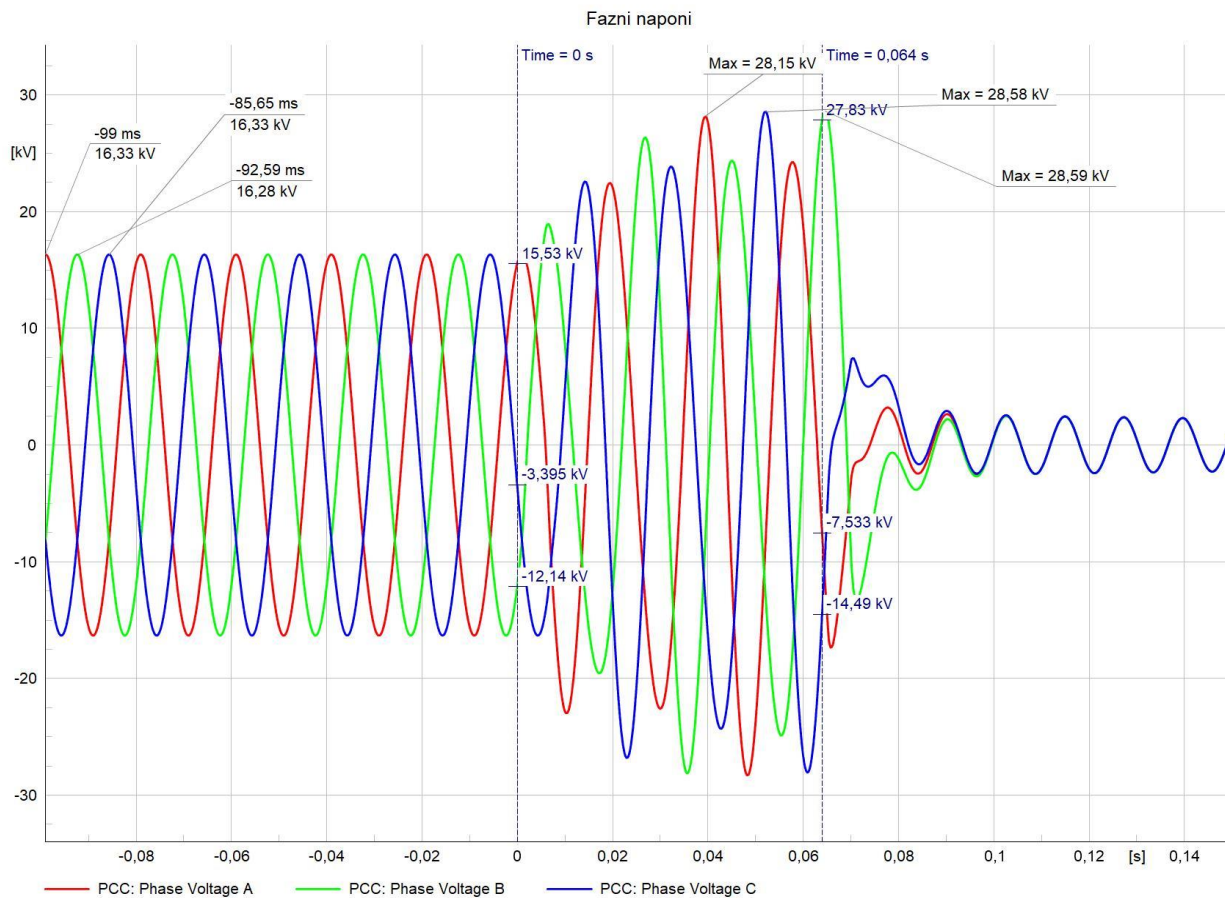
#### **4.5. ROCOF (engl. *Rate of change of frequency*) zaštita obnovljivih izvora energije te prijedlog parametriranja zaštite od otočnog pogona**

Još jedna od bitnijih zaštita kod obnovljivih izvora energije je ROCOF zaštita koja reagira na promjenu frekvencije odnosno mjeri promjenu frekvencije u vrlo kratkim vremenskim intervalima. Kada se dogodi velika promjena u ravnoteži odnosno neravnoteža između proizvodnje i potrošnje električne energije, frekvencija sustava ovisno o tome raste li potražnja ili potrošnja opada ili raste. Sinkroni generatori imaju znatno veću inerciju koja im omogućuje da stabiliziraju frekvenciju mreže u slučaju poremećaja u mreži pa se ROCOF zaštita koristi samo kao dodatna sigurnosna mjera, dok vjetroagregati spojeni preko invertera nemaju inerciju te se ROCOF zaštita primarno koristi za brzu detekciju promjene frekvencije i gašenje izvora kako ne bi došlo do ozbiljnih posljedica po opremu i nestabilnosti cijelog sustava. Isto tako, ROCOF zaštita se koristi i pri detekciji otočnog pogona na način da se velika promjena frekvencije u jako kratkom vremenu može gledati i kao otočni pogon jednog dijela mreže s ostatkom mreže. U ovom primjeru će se demonstrirati ponašanje obnovljivog izvora energije spojenog preko inverterskog sučelja u slučaju kada dođe do otočnog pogona. Model prikazan na slici 4.19. sadrži samo pasivnu zaštitu od otočnog pogona te je u pravilu pasivna zaštita dovoljna za prepoznavanje otočnog pogona gdje neravnoteža između proizvodnje i potrošnje utemeljena na pojavi otočnog pogona rezultira brzim povećanjem napona na sabirnici. U slučaju otočnog pogona kod obnovljivih izvora spojenih preko invertera integriranih u distribucijskoj mreži neravnoteža između proizvodnje i potrošnje može biti znatno manja zbog vrlo velike vjerojatnosti da postoje znatni potrošači unutar mreže koja se nalazi u otočnom pogonu.



Sl. 4.19. Mreža simulirana u programskom paketu DigSILENT za potrebe prikazivanja zaštita od otočnog pogona OIE spojenog preko inverterskog sučelja,[41]

Mreža se sastoji od vjetroagregata nazivne snage 3,6 MVA koji je preko transformatora snage 4 MVA, prijenosnog omjera 0,69 / 20 kV spojen s potrošačem snage 2 MW, R-L filtera nazivne reaktivne snage 1 MVA<sub>r</sub>. U idućem koraku će se prikazati simulacija tokova snaga te pojave otočnog pogona kao i kako se može prepoznati pojava otočnog pogona i kako štititi mrežu u tom slučaju.



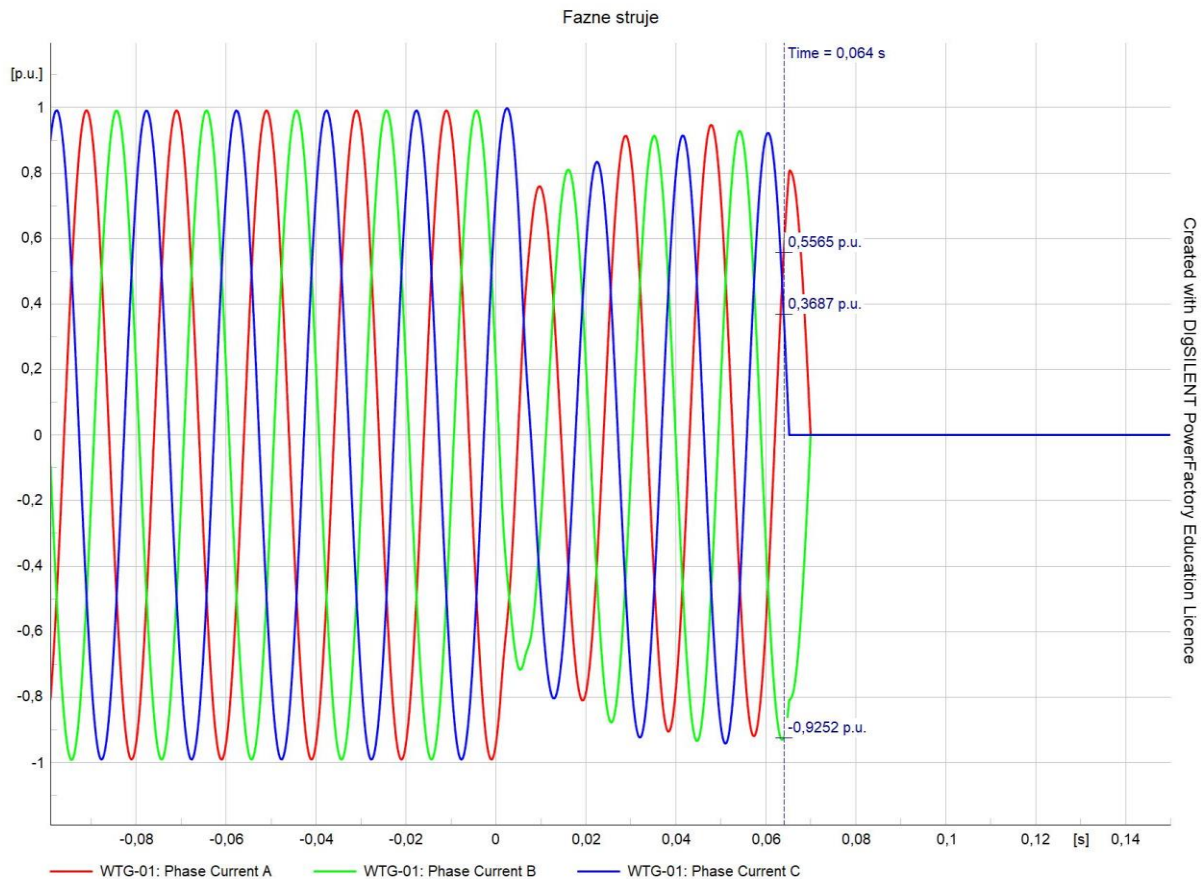
Sl. 4.20. Fazni naponi vjetroagregata prije i nakon odvajanja od mreže odnosno nastanka otočnog pogona

S obzirom na oscilogram iznad može se primijetiti da je otočni pogon simuliran u  $t = 0$  sekundi odnosno tada je došlo do odvajanja vjetroagregata od dijela mreže gdje je vjetroagregat radio u otočnom pogonu. Isto tako, može se primijetiti da je maksimalni iznos napona po fazama prije otočnog pogona bio 16,33 kV, a da je nakon nastanka otočnog pogona maksimalni iznos faznih napona narastao na vrijednost od 28 kV. S obzirom na porast vrijednosti faznog napona može se zaključiti da se može štititi dio mreže od otočnog pogona parametriranjem nadnaponske zaštite na takav način da ako se dogodi znatan porast faznih napona u vrlo kratkom vremenu da je vrlo moguće da je došlo do otočnog pogona odnosno da je došlo do ispadanja proizvodnje obnovljivog izvora kao i da porast napona znači gubitak opterećenja ostatka mreže. Dobar prijedlog parametara nadnaponske zaštite u ovom slučaju je prikazan u tablici 4.18.



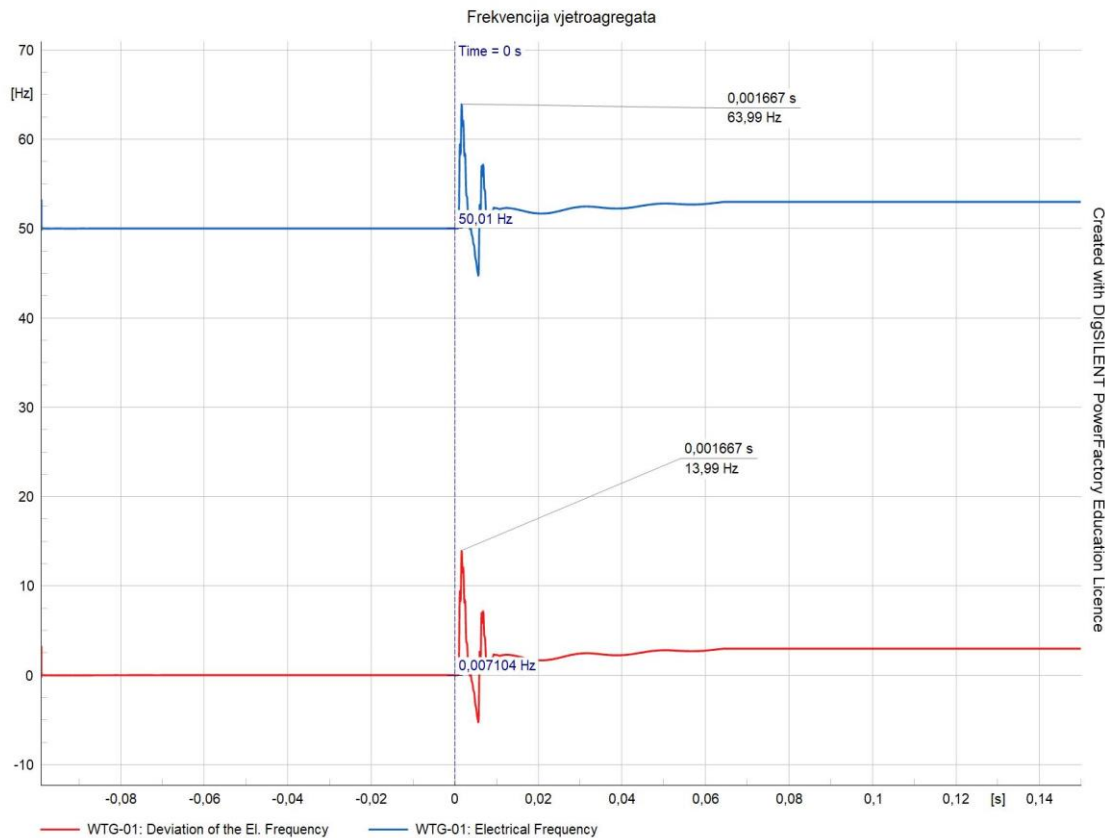
Tablica 4.18. Podešenje nadnaponske zaštite invertera

Funkcija	PODEŠENJE
Napon prorade	120 %
Vrijeme prorade	0,1 s



Sl. 4.21. Fazne struje vjetroagregata prije i nakon odvajanja od mreže tj. nastanka otočnog pogona

S obzirom na graf iznad koji prikazuje struje po fazama prije i nakon nastanka otočnog pogona može se primijetiti zašto se ovakav tip zaštite ne koristi pri šticeњу invertera. Struje su prikazane u p.u. (engl. *per unit*) te se može primijetiti kako struja invertera od 1 p.u. u normalnom pogonu nakon nastanka otočnog pogona pada do 0,7 p.u. međutim isto tako se može primijetiti kako dolazi do vrlo brzog povećanja struje te u samo 20ms ta vrijednost opet dostiže 0,9 p.u., a isto tako vrlo je teško odrediti kada se radi o normalnom pogonu odnosno kada vjetroagregat ne daje puni iznos snage, a kada je slučaj otočnog pogona.



Sl. 4.22. Frekvencija vjetroagregata prije i nakon odvajanja od mreže odnosno nastanka otočnog pogona  
 Oscilogram iznad prikazuje frekvenciju u normalnom pogonu vjetroagregata, u trenutku nastanka otočnog pogona te što se događa s frekvencijom nakon otočnog pogona dijela mreže. S obzirom na graf može se zaključiti kako dolazi do skoka frekvencije od čak 14 Hz u vrlo kratkom vremenu na što bi najbolje i najbrže reagirala ROCOF zaštita koja se inače podešava na znatno manje vrijednosti promjene iznosa frekvencije u sekundi. Isto tako, nadfrekvencijska zaštita bi također registrirala te isključila vjetroagregat s obzirom da se obično podešava na znatno nižu vrijednost prorade, ali bi reagirala nešto sporije od ROCOF zaštite. U tablicama 4.19. i 4.20. su predloženi parametri ROCOF te nadfrekvencijske zaštite u ovom slučaju.

Tablica 4.19. Podešenje nadfrekvencijske zaštite invertera

Funkcija	PODEŠENJE
Frekvencija prorade	51,5 Hz
Vrijeme prorade	0,3 s

Tablica 4.20. Podešenje ROCOF zaštite df/dt invertera

Funkcija	PODEŠENJE
df/dt	0,2 Hz /s
Vrijeme prorade	0,2 s

## 5. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je bio u programskom paketu DigSILENT pomoću IEE 9-bus ispitnog sustava analizirati i dati prijedlog postavki zaštita obnovljivih izvora energije, točnije vjetroagregata spojenih preko inverterskog sučelja te ih usporediti s postavkama zaštite konvencionalnih izvora energije. U četvrtom poglavlju objašnjene su i analizirane razlike između parametriranja zaštita između konvencionalnih sinkronih generatora i vjetroagregata spojenih preko inverterskog sučelja. Prvo su navedene razlike s obzirom na parametriranje nadstrujne zaštite odnosno releji koji se koriste za nadstrujnu zaštitu konvencionalnog izvora energije i invertera s obzirom na ograničenje struje odnosno doprinos struje kratkog spoja od strane invertera koja je znatno manja nego u slučaju sinkronog generatora. U drugom potpoglavlju se opisuje i analizira rad podnaponske zaštite odnosno objašnjava se logika parametriranja s obzirom na tehnologiju priključka. Sinkroni generatori posjeduju znatno veću inerciju te mogu podnijeti niži napon i do nekoliko sekundi dok kod obnovljivih izvora energije spojenih preko inverterskog sučelja zaštita se parametrira da reagira znatno brže te da reagira na puno manje vrijednosti propada napona i prenapona. U trećem potpoglavlju se opisuje način prorade i parametriranje prenaponske zaštite s obzirom na inerciju koju posjeduju sinkroni generatori, te način gašenja invertera i vremena prorade s obzirom na podešenja invertera. U četvrtom potpoglavlju se opisuje neravnoteža između proizvodnje i potrošnje odnosno način prorade i parametriranje nadfrekvencijske i podfrekvencijske zaštite te koje su razlike u podešenju vremena prorade s obzirom na sinkroni generator i inverter. U petom potpoglavlju se opisuje ROCOF zaštita obnovljivih izvora energije koja je značajna pri detekciji otočnog pogona te isključenju elektrane iz mreže ukoliko dođe do otočnog pogona. Temelji se na promjeni frekvencije u vrlo kratkim vremenskim intervalima što sugerira neravnotežu između proizvodnje i potrošnje ili otočni pogon te se daje primjer parametriranja zaštite invertera u slučaju otočnog pogona pomoću porasta napona na sabirnicama obnovljivog izvora te znatne promjene frekvencije u trenutku nastanka otočnog pogona.

Zaključno, parametriranje zaštite između konvencionalnih izvora i obnovljivih izvora spojenih preko inverterskog sučelja ima znatne razlike zbog razlika u načinu proizvodnje i isporuke električne energije. Neke od glavnih razlika su karakteristika struje kvara odnosno sinkroni generatori direktno spojeni na mrežu mogu proizvesti velike struje kvara dok inverteri imaju ograničenu sposobnost isporučivanja struje kvara jer su projektirani na način da ograniče izlaznu struju. U pogledu vremenskih odziva na kvarove odnosno vremena parametriranja zaštite, sinkroni generatori brzo reagiraju na promjene opterećenja te mogu odmah generirati visoke vrijednosti struja kratkog spoja te se u pravilu za zaštitu koriste brzi nadstrujni i vremenski nadstrujni releji

za učinkovito i brzo prepoznavanje i isključivanje kvara dok vjetroagregati spojeni preko invertera samim inverterima ograničavaju izlaznu struju te time smanjuju iznos struje kvara te se zato češće koriste nad / pod frekvencijska zaštita te nad / pod naponska zaštita umjesto klasične nadstrujne zaštite. Sinkroni generatori imaju veliku inerciju i konstantu inercije te su znatno manje osjetljivi na promjene napona i frekvencije u mreži te se podnaponska i prenaponska zaštita uglavnom koriste u ekstremnim situacijama dok su vjetroagregati spojeni preko inverterskog sučelja znatno osjetljiviji jer nemaju inerciju kao sinkroni generatori.

## LITERATURA

- [1] H. Mokhlis, N. M. Sapari, J. A. Laghari, M. R. M. Dahalan, and A. H. A. Bakar, "Application of load shedding schemes for distribution network connected with distributed generation: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no.1., siječanj 2016.
- [2] M. K. Gunasegaran, C. Tan, A. H. A. Bakar, and J. Y. R. Wong, "Large Scale Static Generator Integration Impact on Protection Relay Operation at 132 kV Malaysia Transmission System," in *International Conference on Intelligent and Advanced System, ICIAS 2018*, 2018, Kuala Lumpur, Malaysia
- [3] R. Yan, N. Al-Masood, T. Kumar Saha, F. Bai, and H. Gu, "The anatomy of the 2016 South Australia blackout: A catastrophic event in a high renewable network," *IEEE Trans. Power System*, vol.33, no.5., 2018.
- [4] N. I. A. Wahab and A. Mohamed, "Area-based COI-referred rotor angle index for transient stability assessment and control of power systems," *Abstr. Appl. Anal.*, 2012.
- [5] Lin, Yashen, Joseph H. Eto, Brian B. Johnson, Jack D. Flicker, Robert H. Lasseter, Hugo N. Villegas Pico, Gab-Su Seo, Brian J. Pierre, and Abraham Ellis. 2020. *Research Roadmap on Grid-Forming Inverters*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5D00-73476. Dostupno na: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/73476.pdf>
- [6] B. Kroposki, C. Pink, R. Deblasio, H. Thomas, M. Simões, i P. K. Sen, „Benefits of power electronic interfaces for distributed energy systems“, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, sv. 25, izd. 3, 2010, doi: 10.1109/TEC.2010.2053975.
- [7] J.D. Taft and A. Becker-Dippman, *Grid Architecture*, PNNL, January 2015, dostupno na: <https://gridarchitecture.pnnl.gov/media/whitepapers/Grid%20Architecture%20%20-%20DOE%20QER.pdf> [27.07.2024.]
- [8] J.D. Taft, *Grid Architecture 2*, PNNL, January 2016, dostupno na: <https://gridarchitecture.pnnl.gov/media/whitepapers/GridArchitecture2final.pdf> [27.07.2024.]
- [9] J.D. Ainsworth, "Harmonic instability between controlled static convertors and a.c. networks," *Proceedings of the Institution of*, vol. 114, srpanj 1967.

- [10] Y. Xue et al., "Towards next generation photovoltaic inverters," In Proc. Of IEEE ECCE, Phoenix, AZ, 2011.
- [11] Y. Xue and J. M. Guerrero, "Smart Inverters for Utility and Industry Applications," In Proc. PCIM Europe 2015, Nuremberg, Njemačka, 2015.
- [12] R. Hesse, D. Turschner, and H.-P. Beck, "Microgrid stabilization using the virtual synchronous machine (VISMA)," in Proc. 2009 International Conf. on Renewable Energies and Power Quality (ICREPO), Valencia, Spain, travanj. 15-17, 2009.
- [13] Q. C. Zhong, P. L. Nguyen, Z. Ma and W. Sheng, "Self-Synchronized Synchronverters: Inverters Without a Dedicated Synchronization Unit," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29.no.2, veljača. 2014.
- [14] A. Chandra, G. K. Singh, i V. Pant, „Protection of AC microgrid integrated with renewable energy sources – A research review and future trends“, Electric Power Systems Research, travanj 2021, doi: 10.1016/J.EPSR.2021.107036.
- [15] Nikolovski, S. "Zaštita u elektroenergetskom sustavu", Elektrotehnički fakultet u Osijeku, prezentacije uz predavanja, 2022.
- [16] New Protection Co-ordination Methods in the Presence of Distributed Generation, J. Jager, T. Keil, L. Shang, R. Krebs, Siemens, 2004.
- [17] Obnovljivi izvori električne energije / Topić, Danijel (ur.). Osijek: Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 2018.
- [18] Impact of Distributed Resources on Distribution Relay Protection, IEEE Power Engineering Society Working Group D3, August 2004.
- [19] Nikolovski, Srete ; Marić, Predrag "Elaborat podešenja zaštite elektrane na biomasu „SAVA“ na mrežu HEP-a“, FERIT, 2016.
- [20] Walling, R.A. & Miller, Nicholas. (2002). Distributed generation islanding - Implications on power system dynamic performance. Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference. vol.1. 10.1109/PESS.2002.1043183.
- [21] Protection of Power Systems with Distributed Generation: State of the Art, M. Geidl, Swiss Federal Institute of Technology, lipanj 2005, dostupno na: <https://www.research->

[collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/48047/Geidl\\_Martin.pdf?sequence=42&isAllowed=y](https://collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/48047/Geidl_Martin.pdf?sequence=42&isAllowed=y) [27.07.2024.]

[22] L. K. Kumpulainen and K. T. Kauhaniemi, "Analysis of the impact of distributed generation on automatic reclosing," *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 2004.*, New York, NY, USA, 2004, doi: 10.1109/PSCE.2004.1397623.

[23] Al Nasser, Hilal & Redfern, Miles & Li, Furong. (2006). A voltage based protection for micro-grids containing power electronic converters. IEEE Power Engineering Society General Meeting. 7 pp.. 10.1109/PES.2006.1709423.

[24] C. Hou and X. Hu, "A study of voltage detection based fault judgement method in micro-grid with inverter interfaced power source," in Proc. Int. Conf. Electr. Eng., 2009.

[25] A. R. Bergen, Power System Analysis. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1986.

[26] H. Nikkhajoei and R. H. Lasseter (prosinac. 2006). Microgrid Fault Protection Based on Symmetrical and Differential Current Components.

Dostupno na: <http://www.energy.ca.gov/2009publications/CEC-500-2009-004/CEC-500-2009-004-APP.PDF> [27.07.2024.]

[27] S. M. Mirsaeidi, D. W. Said, M. H. Mustafa, M. Habibuddin, and K. Ghaffari, "Review and analysis of existing protection strategies for micro-grids," *J. Electr. Syst.*, vol. 10, no. 1, 2014.

[28] Bin Li, Yongli Li, Zhiqian Bo and A. Klimek, "Design of protection and control scheme for microgrid systems," 2009 44th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Glasgow, 2009.

[29] H. Lin, C. Liu, J. M. Guerrero, and J. C. V. Quintero, "Distance protection for microgrids in distribution system," in Proc. IECON, 2015.

[30] H. H. Zeineldin, E. F. El-Saadany, and M. M. A. Salama, "Distributed generation micro-grid operation: Control and protection," in Proc. PSC, 2006.

[31] E. Sortomme, S. S. Venkata, and J. Mitra, "Microgrid protection using communication assisted digital relays," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 25, no. 4, listopad. 2010.

[32] Sarajčev, Petar; Kosor, Robert, Zaštita u elektroenergetskom sustavu,

Dostupno na:

[https://www.oss.unist.hr/sites/default/files/file\\_attach/Za%C5%A1tita%20u%20elektroenergetskom%20sustavu%20-%20Robert%20Kosor.pdf](https://www.oss.unist.hr/sites/default/files/file_attach/Za%C5%A1tita%20u%20elektroenergetskom%20sustavu%20-%20Robert%20Kosor.pdf) [27.07.2024.]

[33] E. Sortomme, J. Ren, and S. S. Venkata, "A differential zone protection scheme for microgrids," in Proc. IEEE PES General Meeting, srpanj. 2013.

[34] M. Dewadasa, "Protection for distributed generation interfaced networks, Electrical Engineering," Ph.D. dissertation, Faculty Built Environ. Eng., Queensland Univ. Technol., Brisbane, QL, Australia, 2010

[35] W. Huang, N. Tai, X. Zheng, C. Fan, X. Yang, and B. J. Kirby, "An impedance protection scheme for feeders of active distribution networks," IEEE Trans. Power Del., kolovoz. 2014.

[36] M. R. Miveh, M. Gandomkar, S. Mirsaedi, and M. R. Gharibdoost, "A review on protection challenges in microgrids," in Proc. EPDC, 2012.

[37] Y. Han, X. Hu, and D. Zhang, "Study of adaptive fault current algorithm for microgrid dominated by inverter based distributed generators," in Proc. PEDG, 2010.

[38] K. Dang, X. He, D. Bi, and C. Feng, "An adaptive protection method for the inverter dominated microgrid," in Proc. ICEMS, 2011.

[39] M. Khederzadeh, "Adaptive setting of protective relays in microgrids in gridconnected and autonomous operation," in Proc. IET DPSP, 2012.

[40] A. Oudalov and A. Fidigatti, "Adaptive network protection in microgrids," Int. J. Distrib. Energy Resour., vol. 5, no. 3, 2009.

[41] DigSILENT, Dynamic Simulation

Dostupno na: <https://www.digsilent.de/en/faq-powerfactory.html> [27.07.2024.]



## SAŽETAK

Početak diplomskog rada se odnosi na utjecaj distribuiranih izvora na stabilnost elektroenergetskog sustava. Opisuje se inercija te značaj rotacijskih strojeva i motora za stabilnost elektroenergetskog sustava. Kasnije se dotiče zaštite elektroenergetskog sustava odnosno utjecaj distribuirane proizvodnje na podešenja zaštite u mreži s obzirom na ograničenje i promjenu vrijednosti struje kratkog spoja te se objašnjavaju vrste zaštite korištene za distribuirane obnovljive izvore energije. Naposljetku rada su opisani parametri i shema IEEE 9 Bus system mreže simulirane u programskom paketu DigSILENT te se u četvrtom poglavlju analizira i daje prijedlog parametriranja zaštite obnovljivih izvora energije spojenih preko inverterskog sučelja te se daju razlike u parametriranju konvencionalnih izvora nasuprot obnovljivim izvorima energije spojenih preko inverterskog sučelja. Opisuje se način korištenja nadstrujne, nad / pod naponske, nad / pod frekvencijske zaštite te na koji način se izražava nedostatak inercije invertera na podešenja i parametriranje zaštite i zaštitnih uređaja.

## ABSTRACT

The beginning of the thesis discusses the influence of distributed energy sources on the stability of the electric power system. The importance of inertia and rotary machines and motors for power system stability is described. Later, the paper addresses the protection of the power system, specifically the impact of distributed generation on network protection settings, considering the limitations and changes in short-circuit current values. The types of protection used for distributed renewable energy sources are also explained.

At the end of the paper, the parameters and scheme of the IEEE 9 Bus system network, simulated using the DigSILENT software package, are described. In the fourth chapter, the parameterization of protection for renewable energy sources connected via inverter interfaces is analyzed, and a proposal is provided. Additionally, the differences in the parameterization of conventional sources versus renewable energy sources connected via inverter interfaces are discussed.

The methods of using overcurrent, over/undervoltage, and over/underfrequency protection are described, along with how the lack of inertia in inverters affects the settings and parameterization of protection and protective devices.

## **ŽIVOTOPIS**

Fran Nedić rođen je 3. travnja 2000. godine u Slavonskom Brodu. Pohađao je Osnovnu školu Josip Kozarac Slavonski Šamac u Slavonskom Šamcu. Po završetku osnovne škole upisuje Isusovačku klasičnu gimnaziju s pravom javnosti u Osijeku. Nakon uspješno položene državne mature nastavlja obrazovanje na Fakultetu, elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Nakon završenog preddiplomskog studija, 2023. godine upisuje diplomski studij na istom fakultetu, smjer Elektroenergetika. Tijekom druge godine diplomskog studija odrađuje praksu u tvrtki H&MV Engineering u Osijeku.