Detekcija i zaštita od otočnog pogona elektrane

Rakarić, Mario

Master's thesis / Diplomski rad

2016

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:054406

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-23**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni studij

DETEKCIJA I ZAŠTITA OD OTOČNOG POGONA ELEKTRANE

Diplomski rad

Mario Rakarić

Osijek, 2016.

ETFOS
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET OSIJEK
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Osijek, 07.07.2016.

Odboru za završne i diplomske ispite

Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Ime i prezime studenta:	Mario Rakarić
Studij, smjer:	Sveučilišni diplomski studij elektrotehnike (elektroenergetika)
Mat. br. studenta, godina upisa:	D-641, 2012.
Mentor:	Doc. dr. sc. Predrag Marić
Sumentor:	
Predsjednik Povjerenstva:	Prof.dr.sc. Srete Nikolovski
Član Povjerenstva:	Doc.dr.sc. Goran Knežević
Naslov diplomskog rada:	Detekcija i zaštita od otočnog pogona elektrane
Primarna znanstvena grana rada:	**Elektroenergetika**
Sekundarna znanstvena grana (ili polje) rada:	
Zadatak diplomskog rada:	Analizirati otočni pogon elektrane spojene na mrežu krutog napona preko glavnog ili pomoćnog izvoda za različita opterećenja izvoda i različite isporuke djelatne snage generatora, te balansa proizvodnje i potrošnje. Simulacije otočnog pogona izvršiti s pomoću adekvatnog simulacijskog softvera.
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):	
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	

Potpis sumentora:	Potpis mentora:

Dostaviti:

1. Studentska služba

U Osijeku, godine Potpis predsjednika Odbora:

ETFOS
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET OSIJEK
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek, 07.07.2016.

Ime i prezime studenta:	Mario Rakarić
Studij :	Sveučilišni diplomski studij elektrotehnike (elektroenergetika)
Mat. br. studenta, godina upisa:	D-641, 2012.

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom**:**

Detekcija i zaštita od otočnog pogona elektrane

izrađen pod vodstvom mentora

Doc. dr. sc. Predrag Marić

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

SADRŽAJ

1. UVOD 1

1.1. Zadatak diplomskog rada 1

2. DISTRIBUIRANI IZVORI 2

2.1. Paralelni pogon 4

2.2. Otočni pogon 6

2.2.1. Uvjeti za pojavu otočnog pogona 7

2.2.2. Zona neprepoznavanja otočnog pogona 9

2.2.3. Zaštita od otočnog pogona 11

3. ZAŠTITA OD OTOČNOG POGONA TEMELJENA NA ROCOF I VS ZAŠTITI 13

3.1. Releji sa ROCOF I VS algoritmima 14

3.1.1 Metoda detekcije promjene brzine frekvencije generatora (ROCOF) 15

3.1.2 Metoda detekcije promjene kuta napona generatora (VS) 18

4. ANALIZA DETEKCIJE I ZAŠTITE OD OTOČNOG POGONA ELEKTRANE 21

4.1. Podaci o mreži 21

4.2. Analiza i simulacija ispitivanja detekcije i zaštite od otočnog pogona na glavnom izvodu 25

4.2.1. Analiza i simulacija na glavnom izvoda s najvećom proizvodnjom generatora i najmanjim opterećenjem izvoda 26

4.2.2. Analiza i simulacija na glavnom izvodu s najmanjom proizvodnjom generatora i najvećim opterećenjem izvoda 30

4.3. Simulacija ispitivanja detekcije i zaštite od otočnog pogona na pomoćnom izvodu 34

4.3.1.Analiza i simulacija na pomoćnom izvodu s najvećom proizvodnjom generatora i najmanjim opterećenjem izvoda 34

4.3.2. Analiza i simulacija na pomoćnom izvodu s najmanjom proizvodnjom generatora i najvećim opterećenjem izvoda 38

4.4. Analiza i simulacija ispitivanja detekcije i zaštite od otočnog pogona na glavnom izvodu promjenom opterećenja svih priključenih lateralnih izvoda 42

4.4.1. Analiza i simulacija na glavnom izvodu s najvećom proizvodnjom generatora i najmanjim opterećenjem izvoda 42

4.4.2. Analiza i simulacija na glavnom izvodu s balansom proizvodnje generatora i potrošnje izvoda 46

4.4.3. Analiza i simulacija na glavnom izvodu s najmanjom proizvodnjom generatora i najvećim opterećenjem izvoda 49

4.4.4. Analiza i simulacija na glavnom izvodu s balansom proizvodnje generatora i potrošnje izvoda 52

4.5. Analiza i simulacija ispitivanja detekcije i zaštite od otočnog pogona na pomoćnom izvodu promjenom opterećenja svih priključenih lateralnih izvoda 55

4.5.1. Analiza i simulacija na pomoćnom izvodu s najvećom proizvodnjom generatora i najmanjim opterećenjem izvoda 56

4.5.2. Analiza i simulacija na pomoćnom izvodu s balansom proizvodnje generatora i potrošnje izvoda 59

4.5.3. Analiza i simulacija na pomoćnom izvodu s najmanjom proizvodnjom generatora i najvećim opterećenjem izvoda 62

4.5.4. Analiza i simulacija na pomoćnom izvodu s balansom proizvodnje generatora i potrošnje izvoda 65

5. ZAKLJUČAK 69

LITERATURA 70

SAŽETAK 71

ŽIVOTOPIS 72

PRILOG 75

1. UVOD

Od samih početaka elektroenergetskog sustava (EES) razvoj sustava svodio se na ideju velikih elektrana koje su preko transformatora penetrirale električnu energiju u visoko naponsku (prijenosnu) mrežu. Visoko naponske prijenosne mreže bile su jedini opskrbljivač električnom energijom koje su električnu snagu dalje preko distribucijskih transformatora prenosile u srednje naponsku i nisko naponsku distribucijsku mrežu prema potrošačima.

Početna ideja i razvoj EES preokrenula se činjenicom da su velike elektrane obično bile pogonjene fosilnim gorivima (kao upitnim daljnjim opskrbljivačem) koje su kao posljedicu imale ispuštanje CO_2, kao i posljedicu povećanja cijene energenata (ugljen, nafta, plin). Utjecaj na okoliš bio je bitan pokretač promjene taktike razvoja EES. Kako bi smanjile utjecaj na klimatske promjene, mnoge zemlje obvezale su se smanjivati emisiju CO_2 temeljem Kyoto protokola (međunarodni sporazum o klimatskim promjenama). Jedini mogući razvoj bio je stvaranje novih elektrana pogonjenih „prirodnim gorivima“.

Stvaranje obnovljivih izvora, kao vjetroelektrane, male hidroelektrane, fotonaponske elektrane, te elektrane na biomasu, bili su glavni čimbenik smanjenje CO_2. Uvođenjem sve većeg broja malih elektrana dovodi se u pitanje održivost EES te tako dolazimo do daljnje diskusije između održivosti EES i smanjenju CO_2.

1.1. Zadatak diplomskog rada

Zadatak ovog diplomskog rada je, kako i sam naslov kaže, detekcija i zaštita od otočnog pogona elektrane. Pomoću simulacije i analize u programskom paketu DIgSILENT PowerFactory, prikazani su na elektroenergetskoj mreži načini utjecaja elektrana kada prilikom isključenja iz krute mreže ostanu u otočnom pogonu. Zadatak je prikazati utjecaje prilikom nastanak otočnog pogona u trenucima najveće proizvodnje generatora i najmanje potrošnje izvoda te najmanje proizvodnje generatora i najveće potrošnje izvoda. Kako bi proširili simulaciju, dodatno je stvoren balans između proizvodnje i potrošnje.

2. DISTRIBUIRANI IZVORI

Priključenjem malih elektrana na distribucijsku mrežu stvara se novi pojam distribuirani izvori (DI). Priključenjem DI došlo je do promjene tokova snaga unutar EES te se promijenila početna percepcija jednosmjernih tokova snaga. S obzirom na proizvodnju te potrošnju DI distribucijska mreža postaje aktivna [1].

Po geografskom sastavu DI su se široko rasprostranili te se javljaju problemi prilikom priključenja DI na elektroenergetsku mrežu zbog neupravljivosti i nemogućnosti regulacije takvih izvora. Sve većim brojem DI stvara se sve veća složenost i održivost EES koja dovodi u pitanje održivost cijelog sustava, ako uzmemo činjenicu da će se broj velikih elektrana na fosilna goriva smanjivati. Uzimajući u obzir drugu stranu, ako dođe do nestašice fosilnih goriva, govorimo o povećanju održivosti EES-a [1].

Gledajući s ekonomske strane izgradnja takvih elektrana nije isplativa pa su stvoreni sustavi poticaja. Tim korakom je povećan interes daljnjim ulagačima za izgradnju. Gledajući vlastiti financijski interes investitori sami odabiru snagu, lokaciju te tip elektrane. Veliku uštedu imaju investitori jer ne plaćaju pružanje dodatnih usluga EES-a kao što su prijenos, distribucija, troškovi priključenja na sustav te investitori nisu odgovorni za sigurnost opskrbe potrošača [1].

Zbog smanjenja gubitka energije (bitnog čimbenika) radi prijenosa, DI se grade što bliže lokalnoj proizvodnji. Priključenjem na mrežu sve većeg broja DI potrebna je detaljnija analiza svakog priključenog izvora zasebno. Posebno bi se trebalo razmatrati da se proizvedena energija potroši na lokalnoj razini. Posebno se promatra utjecaj na kvalitetu električne energije, naponske prilike i gubitke. Najznačajniji je utjecaj na tokove snaga u mreži promatran na dnevnoj bazi prema vršnoj vrijednosti. Pravilnim dimenzioniranjem mogu se popraviti električne prilike u mreži. S dodatnim izvorima povećava se broj utjecaja te je potrebno daljnje razmatranje. DI-e možemo razmatrati kao elektrane u slučajevima: elektrane za cjelokupnu prodaju električne energije, elektrane za podmirenje vlastite potrošnje te elektrane za podmirenje vlastite potrošnje i prodaje viška električne energije [1].

Znatan utjecaj DI pojavljuje se kod preopterećenja te regulacije niskog napona na kraju mreže. Kako bi DI prenijeli snagu u mrežu, napon mora biti veći od napona mreže u točki priključenja. S tim postupkom opterećenje će pasti te će se povećati napon na kraju mreže koji može uzrokovati nagle propade napona te prorade zaštite i odvajanje elektrana iz mreže. Kako bi se to izbjeglo uvodi se pojam *Naprednih mreža* koje reguliraju napon redukcijom radne i

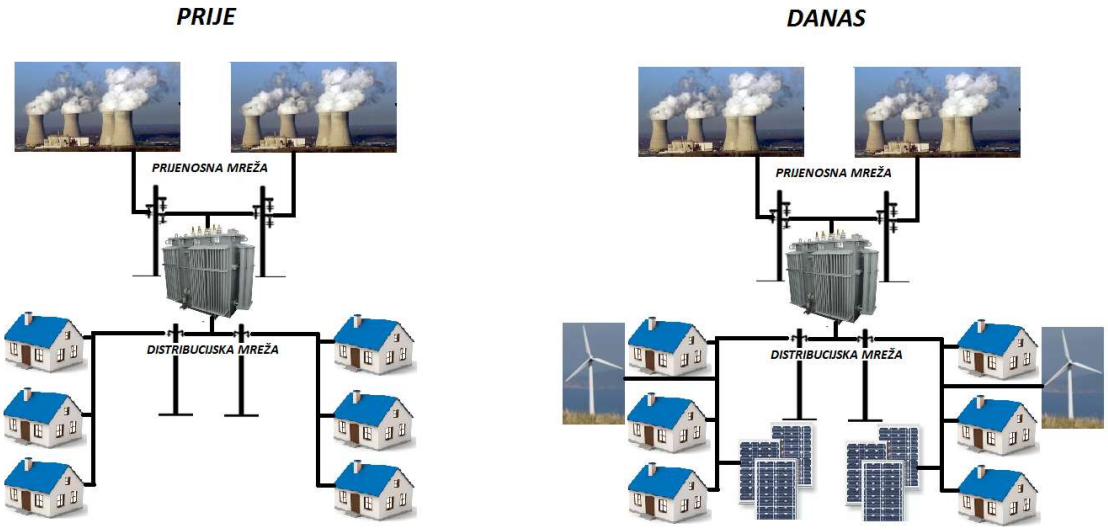
jalove snage. U svrhu regulacije napona, u čvorištima se primjenjuju sredstva za kompenzaciju jalove snage te distribucijski transformatori s regulacijom pod opterećenjem [1].

Izgradnja DI utječe na gotovo sve dijelove sustava opskrbe električne energije te može povećati potrebu za mrežnom moći i stvoriti dodatne troškove pri planiranju. Ponekad je potrebna dodatna izgradnja snažnih i prilagodljivih mreža u blizini DI sve u zavisnosti o priključnim kapacitetima [1].

Kako bi se provjerila kvaliteta električne energije uzrokovane nakon priključenja DI, mora se izvršiti mjerenje prije i nakon priključenja, dok se gubitci i naponske prilike mogu odrediti na temelju proračuna. Prema normi EN 50160 koja definira kvalitetu električne energije mjere se: harmonično izobličenje, flikeri, naponska nesimetrija i faktor snage [1].

Prilikom kratkog spoja distribuirani izvori s asinkronim i sinkronim generatorima doprinose povećanjem snage kratkog spoja što se također odnosi na sposobnost dimenzionirane mrežne opreme.

Jedan od najvažnijih događaja DI je mogućnost otočnog rada. Događaj nenamjernog odvajanja distributivnog generatora iz mreže poznat je kao otočni pogon.



Sl.2.1. Prikaz razvoja distribuiranih izvora

2.1. Paralelni pogon

Paralelni pogon elektroenergetskog sustava je udruživanje distribuiranih izvora i distribucijske mreže u distribucijski sustav. Zbog održivosti stabilnosti mreže paralelni pogon, radi statičke i dinamičke potpore, ima aktivnu ulogu zbog održivosti pogona elektrane na prolazna stanja kvara u mreži te preuzimanja opskrbe potrošača kroz otočni pogon [2].

Donedavno je jedino rješenje zbog svih pogonskih problema, koje su uzrokovali DI, bilo bezuvjetno odvajanje iz elektroenergetske mreže. Danas se logika opstojnosti DI prilikom kvara ili nekog pogonskog stanja promijenila te se teži opstojnosti paralelnog pogona s mrežom [2].

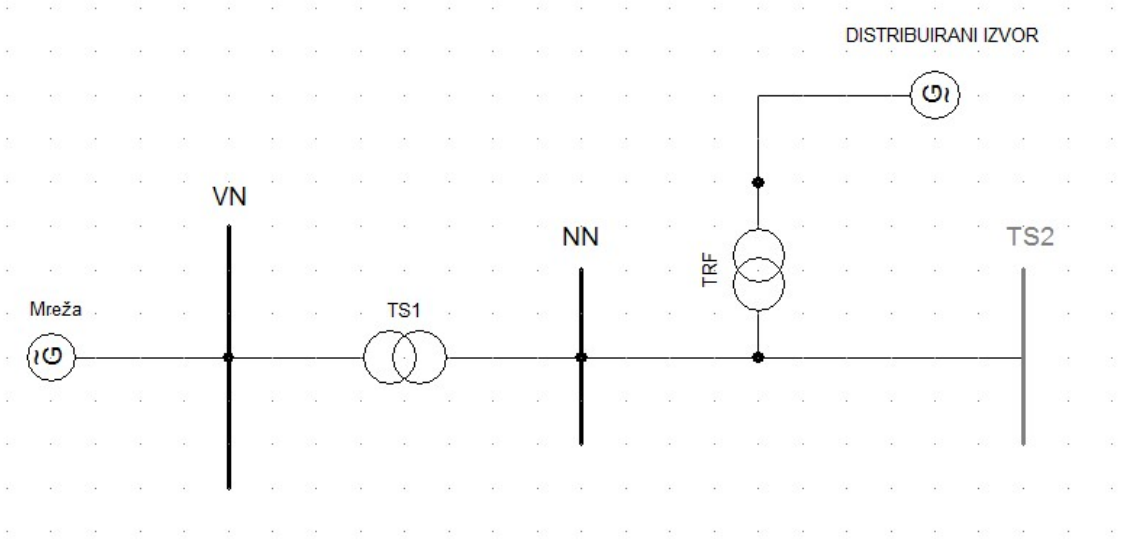
U paralelnom pogonu elektrana ne smije imati nedopuštena povratna djelovanja na distribucijsku mrežu. Elektrana i distribucijska mreža međusobnim usklađivanjem zaštitnih uređaja stvaraju uvjete za paralelni pogon, te se prilikom njihovih odstupanja tj. prilikom prorade zaštite elektrana odvaja iz paralelnog pogona. Prilikom prorade zaštite te odvajanja elektrane od distribucijske mreže ako je predviđena za otočni pogon, sustav mora ostati stabilan [2].

Prilikom priključenja distribuiranih izvora na distribucijsku mrežu potrebno je izvršiti ispitivanje mreže u pokusnom radu vodeći se mrežnim pravilima elektroenergetskog sustava [3]. Ispitivanje je bitno radi mogućih negativnih odziva na elektranu, mrežu, korisnike mreže u okruženju, pogonske događaje, smetnje i kvarove. Prilikom kvara ili nastankom smetnji posebni se problem javlja prilikom njihovih širenja u ostatak elektroenergetski sustav radi nemogućnosti daljinskog vođenja zbog toga što su distribuirani izvori priključeni na niže naponske razine distribucijske mreže (niskonaponsku) s nemogućnošću regulacije.

Kako bi se izbjegli negativni utjecaji prilikom priključenja elektrane u paralelni pogon, potrebno je izvršiti testiranja preko pokusnog rada, kako bi interakcija elektrane i mreže bila što primjerenija. Testiranja se izvode u što kraćem vremenskom periodu kako bi elektrana što prije dobila uporabnu dozvolu i sve beneficije koje su njome uvjetovane. U kontroliranim uvjetima, stvaranjem različitih ekstremnih pogonskih stanja, testira se odziv elektrane na mrežu te odziv mreže na elektranu. Provedbom svih ekstremnih pogonskih stanja može se dovesti zaključak o stabilnosti i utjecaju elektrane u svim pogonskim stanjima i elektrane i mreže. Ako se testiranje ne izvede pravilno prilikom trajnog pogona elektrane, moguća je havarija na elektrani kao i na ostalim dijelovima mreže. Kako bi se ispitivanje u pokusnom radu pravilno izvelo ono se izvodi po planu i programu ispitivanja (PPI) primjerenog paralelnog pogona elektrane s mrežom. PPI sadrži sva podešenja te podatke o elektrani, selektivnost zaštite kao i

njene povratne utjecaje na mrežu. Prilikom dobrih rezultata ispitivanja HEP-Operator distribucijskog sustava (ODS) daje dozvolu za trajni pogon elektrane s mrežom [2].

Uključivanje elektrane sa sinkronim generatorima u paralelni pogon s distribucijskom mrežom prikazanoj na slici 2.2. zahtijeva uporabu uređaja za sinkronizaciju uz poštovanje uvjeta razlike napona od ±10 % nazivne vrijednosti, razlike frekvencije od ±0,5 Hz i razliku faznog kuta od ±10 stupnjeva. Za vjetroelektrane uvjet razlike frekvencije iznosi ±0,1 Hz [3]. Pošto postoji mogućnost da je elektrana u nadležnosti operatora distribucijskog sustava između elektrane i distribucijske mreže ugrađuje se prekidač za odvajanje elektrane iz paralelnog pogona s mrežom.



Sl.2.2. Prikaz distribuiranog izvora u paralelnom pogonu

2.2. Otočni pogon

Djelomični ili potpuni raspad elektroenergetskog sustava uzrokovan je oštećenjem ili kvarom koji prati domino efekt. Napajanje lokalnih potrošača iz DI u izoliranom djelu mreže bez napajanja sa strane vanjske mreže naziva se otočni pogon. Prema *Mrežnim pravilima* otočni pogon je nepoželjan kada je snaga proizvodnje jednaka potrošnji izvoda. U ovom režimu rada promjena kuta napona i frekvencije su zanemarive te kod isklopa prekidača dolazi do otočnog pogona. Otočni pogon je pogodan kada je primarna namjena napajanje vlastite mreže ili nekog lokalnog sustava.

Otočni pogon se prema *Mrežnim pravilima* definira kao stanje proizvodne jedinice u kojem ona može sigurno podnijeti djelomično opterećenje u izdvojenom dijelu elektroenergetskog sustava [3]. Sposobnost otočnog pogona podrazumijeva projektiranje sustava reguliranja brzine vrtnje, djelatne snage i uzbude tako da proizvodna jedinica može sigurno prijeći na bilo koje djelomično opterećenje veće od tehničkog minimuma proizvodne jedinice [3]. Takav sustav mora biti sposoban regulirati udarno opterećenje iznosa 10 % nazivne djelatne snage te mora biti održiv više sati.

U normalnom pogonu takva elektrana predaje višak električne energije u vanjsku mrežu te se nalazi u paralelnom spoju s mrežom.

Kako bi napon i frekvencija bili u propisanim granicama, distributivni izvori imaju mogućnost regulacije osim interminentnih izvora, koji su ovisni o nepredvidivim energijama (vjetar, sunce, plima i oseka itd...), koji nemaju mogućnost regulacije te kod njih nije poželjan otočni pogon. Zbog nemogućnosti regulacije frekvencije može doći do ispada transformatora koji je lociran u pojnoj točki te do otočnog pogona. Kako bi otočni pogon bio održiv temeljni kriterij je da jalova i radna snaga proizvodnje i tereta budu jednake u svakom trenutku [4].

Otočni pogon je nepoželjan kod distribuiranih izvora bez mogućnošću regulacije radi mogućih posljedica prema [4]:

- uporabom APU-a (automatskog ponovnog uklopa) moguća je pojava luka ako je kvar napajan sa strane izvora u otočnom pogonu,

- razlika u sinkronizmu prilikom priključenja izvora na mrežu može dovesti do kvara,

- nezadovoljavajuća kvaliteta napona na priključcima kupaca uzrokovana naponom i frekvencijom koji nisu u propisanim granicama,

- prilikom kvara te ispitivanjem ili zamjenom mrežne opreme moguće je da dio mreže ostane pod naponom, iako je glavni vod odspojen, te tako postoji opasnost po život samog radnika.

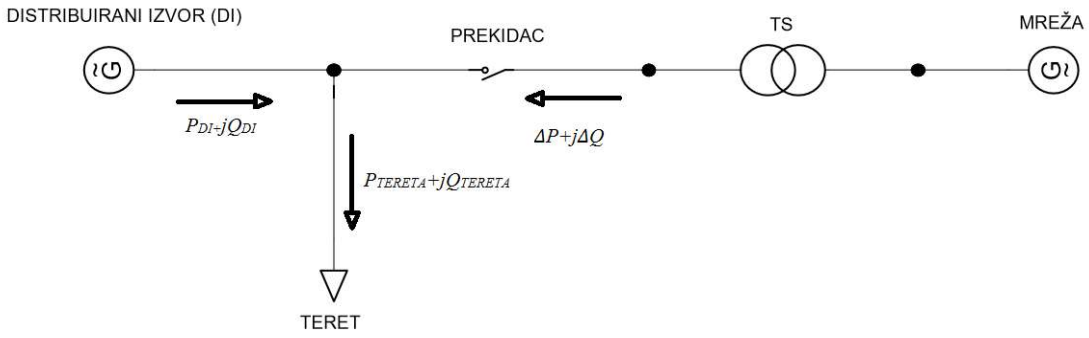
2.2.1. Uvjeti za pojavu otočnog pogona

Nastankom otočnog pogona uzrokovanog isklopom rastavnog uređaja te odvajanjem od mreže elektrana napaja potrošače bez prisutnosti ostatka elektroenergetskog sustava. Kod takvog pogona sustav je nepredvidljiv jer nije moguća regulacija napona i frekvencije kao i razlika između snage proizvodnje i potrošnje [4].

Samim povećanjem broja distribuiranih izvora, samim time i povećanjem snage, povećava se stabilnost otočnog pogona. Stabilnost ovisi o odzivu mreže, ravnoteži proizvodnje i tereta, mogućnosti regulacije te o samoj metodi zaštite. Najveća diskusija kod otočnog pogona javlja se kod razlike (potrošnje) same varijable proizvodnje i tereta koje su nezavisne i nisu konstantne. [4].

Kako bi nadnaponska/podnaponska i/ili nadfrekvencijska/podfrekvencijska zaštita proradila, potrebno je dovoljno velika promjena amplitude ili frekvencije napona na priključku distribuiranog izvora. Zaštita neće proraditi ako su na odspojenom odvodu snaga proizvodnje i tereta jednake [4].

Prilikom normalnog pogona sa priključenim distribuiranim izvorom na mrežu radna i jalova komponenta snage ($P_{DI}+jQ_{DI}$) teku od izvora preko mjesta priključaka, a snaga $P_{TERETA}+jQ_{TERETA}$ od mjesta priključka prema teretu. Prikaz tokova snaga između mreže tereta i distribuiranog izvora vidljiv je na slici 2.3.



Sl. 2.3. Prikaz nadomjesne sheme tokova snaga između distribuiranog izvora s mrežom u uvjetima otočnog pogona

Od strane mreže prema trošilu teku jalova i radna snaga, a prikazane su formulama:

$$\Delta P = P_{TERETA} - P_{DI} \tag{2-1}$$

$$\Delta Q = Q_{TERETA} - Q_{DI} \tag{2-2}$$

Formiranje otoka te ponašanje sustava nakon isklopa prekidača ovisi o neuravnoteženosti radne i jalove snage ΔP i ΔQ. Značajnim odstupanjem radne i jalove snage (ΔP i ΔQ) proradit će naponska ili frekventna zaštita. Problem ne prorade zaštite se javlja kada su snage proizvodnje i tereta jednake te samim time nema gubitaka koje bi detektirali releji [4].

Ako su u trenutku prije i nakon isklopa prekidača radan i jalova snaga jednake, tada vrijede sljedeće jednadžbe. Napon mreže u otočnom pogonu izražava se primjenom jednadžbe (2-1).

$$\frac{\Delta P}{P_{DI}} = \frac{U^2_{MREŽE}}{U^2_{OTOKA}} - 1 \tag{2-2}$$

$$U_{OTOKA} = \sqrt{\frac{P_{DI}}{P_{DI} + \Delta P}} \times U_{MREŽE} = \sqrt{\frac{P_{DI}}{P_{TERETA}}} \times U_{MREŽE} \tag{2-3}$$

Za izračun frekvencije preko jednadžbe (2-2) koristi se izvod [4]:

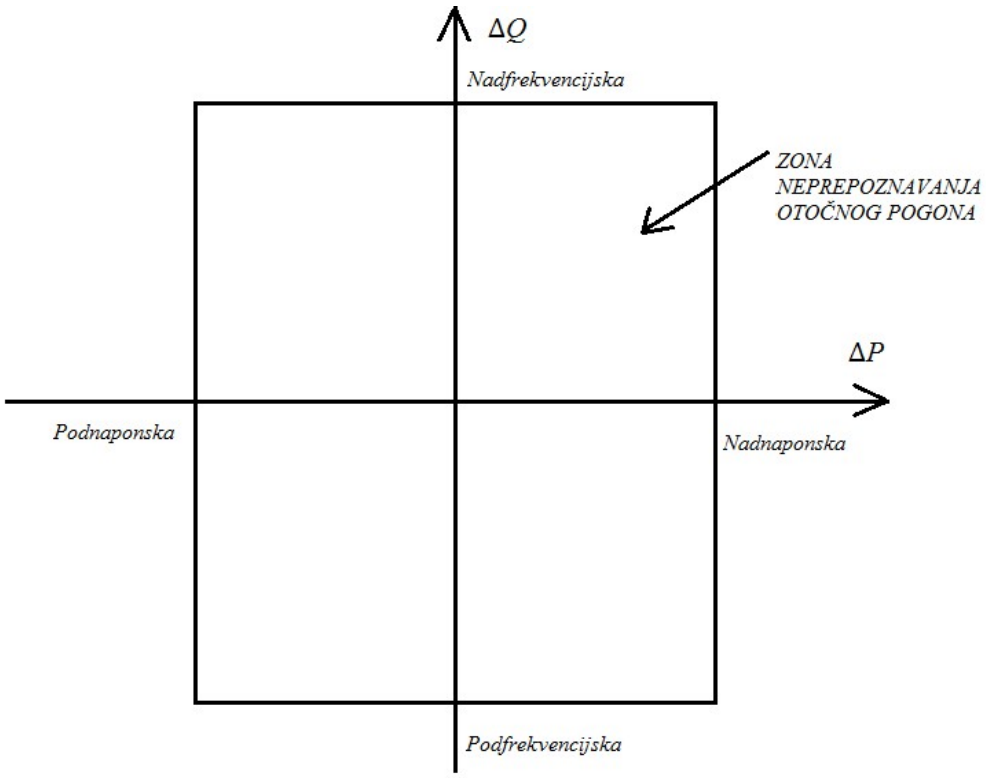
$$\frac{\omega_{OTOKA}}{\omega_{MREŽE}} \times (\frac{\Delta Q}{Q_{DI}} + 1) = \frac{1 + \omega^2_{MREŽE} LC}{1 + \omega^2_{OTOKA} LC} \times (\frac{\Delta P}{P_{DI}} + 1) \tag{2-4}$$

$$f_{OTOKA} = \frac{1}{4\pi} \times \left(\frac{1 + f^{2}_{MREŽE} \times 4\pi^{2} LC}{f_{MREŽE} \times 2\pi LC} \times \frac{\frac{\Delta Q}{Q_{DI}} + 1}{\frac{\Delta P}{P_{DI}} + 1} - \sqrt{\left(- \frac{1 + f^{2}_{MREŽE} \times 4\pi^{2} LC}{f_{MREŽE} \times 2\pi LC} \times \frac{\frac{\Delta Q}{Q_{DI}} + 1}{\frac{\Delta P}{P_{DI}} + 1} \right)^{2} - \frac{4}{LC}} \right) \quad (2\text{-}5)$$

Kako bi nadnaponska/podnaponska zaštita reagirala, potrebna je značajna promjena radne snage ΔP koja će prouzročiti promjene na amplitudi napona. Promjenu faznog pomaka prouzrokovanu promjenom jalove snage ΔQ detektirat će nadfrekvencijska/podfrekvencijska zaštita [4].

2.2.2. Zona neprepoznavanja otočnog pogona

S obzirom na mogućnost krivih i neželjenih prorada zaštite prilikom otočnog pogona uvodi se zona neprepoznavanja kojom se može odrediti pouzdanost detekcije otočnog pogona. Zona neprepoznavanja otočnog pogona definira se kao neusklađenost razlike jalove i radne snage (ΔP i ΔQ) [4].



Sl 2.4. Prikaz zone neprepoznavanja otočnog pogona

Slika 2.4. prikazuje neusklađenost snaga (ΔP i ΔQ) kod otočnog rada prikazane vrijednostima naponskih (nadnaponska, podnaponska) i frekvencijskih (nadfrekvencijska, podfrekvencijska) funkcija [4].

Kako bi zaštita ispravno odradila, potrebno je da ne detektira smetnje u mreži kao primjerice harmonike, prenapone, propade napona, promjene frekvencije. Prikaz graničnih vrijednosti napona i frekvencija dan je tablicom 2.1. prema normi EN 50160.

Tab. 2.1. *Maksimalni rasponi napona i frekvencije mreže prema EN 50160 normi*

Vrijednost	Minimalna	Maksimalna
Frekvencija	f_{min}= 49 Hz	f_{max}= 51 Hz
Napon	V_{min}= 0,9 p.u.	V_{max}= 1,1 p.u.

Kako bi točno odredili zonu neprepoznavanja standardne zaštite nadnaponske/podnaponske i nadfrekvencijske/podfrekvencijske, koristimo sljedeće funkcije prema [5]:

- za nadnaponsku/podnaponsku zaštitu u zoni neprepoznavanja:

$$\left(\frac{V}{V_{MAX}}\right)^2 - 1 \le \frac{\Delta P}{P_{DI}} \le \left(\frac{V}{V_{MIN}}\right)^2 - 1 \tag{2-6}$$

- za nadfrekvencijsku/podfrekvencijsku zaštitu u zoni neprepoznavanja:

$$q\left(1 - \left(\frac{f}{f_{MIN}}\right)^2\right) \le \frac{\Delta Q}{P_{DI}} \le q\left(1 - \left(\frac{f}{f_{MAX}}\right)^2\right) \tag{2-7}$$

Najnepovoljniji slučaj detekcije otočnog pogona je nepostojanje ΔP i ΔQ, tj. kada su radan i jalova snaga proizvodnje i tereta jednake.

2.2.3. Zaštita od otočnog pogona

U zadnje vrijeme osim opisanih nad/pod naponskih i frekvencijskih zaštita postoje i ostale metode.

Metode detekcije otočnog pogona možemo podijeliti na: pasivne, aktivne, mrežne metode i lokalno bazirane metode. Kako bi detekcija bila što uspješnija, kombiniraju se neke od navedenih metoda prema [4]:

a) Pasivna metoda

Ove metode mjere promjenu izlazne snage temeljene na mjerenju veličina kao što su napon, frekvencija i harmonična izobličenja. Prednost ove metode je brzina injektiranja smetnji u mrežu prilikom mjerenja. Nedostatak je postojanost zone neprepoznavanja opisane u prethodnom poglavlju. Podešavanje parametara zaštite moraju biti takva da prilikom raznih događaja u normalnom pogonu ne prorade, tj. ne uzrokuju krive detekcije. Ove metode baziraju se na nad/pod naponskim i frekvencijskim veličinama. Navedene metode opisane su detaljno u sljedećem poglavlju te se na njima temelji ovaj diplomski rad. Moguća je i primjena mjerenja faktora harmonijskog izobličenja, ali ona se koristi vrlo rijetko.

b) Aktivna metoda

Primjenom aktivne metode precizno se prepoznaje otočni pogon. Ovom metodom se u potpunosti eliminira zona neprepoznavanja. Temelji se na injektiranju malih poremećaja u sustav. Prilikom nastanka otočnog pogona mali poremećaj postaje značajan. Tehnikom povratne veze prepoznaje se otočni rad koji detektira promjene u naponu i frekvenciji. Dodatni krugovi za injektiranje i generiranje poremećaja povećavaju trošak te se dovodi u pitanje njihova isplativost. Negativan utjecaj injektiranja poremećaja odnosi se i na kvalitetu napona te samu stabilnost sustava.

c) Hibridne metode

Ova metoda temelji se na kombinaciji pasivne i aktivne metode. Ovom kombinacijom nastoje se izbjeći loše strane aktivnih i pasivnih metoda, tj. koristiti se samo najbolje od njih. Pasivna zaštita koristi se kao primarna koja aktivira aktivnu u slučaju promjene pogonskog stanja.

d) Komunikacijske metode

Komunikacijske metode temelje se na PLC (Power Line Communications) tehnologiji. Ova metoda ima veliku pouzdanost u otkrivanju otočnog pogona; jedini problem koji se javlja kod ove metode su troškovi komunikacijskog sustava za nadzor i detekciju tako da se ova metoda svrstava u rad neekonomičnih metoda. Radi na principu praćenja signala od strane odašiljača koji je smješten u mreži i prijemnika smještenog u distribuiranom izvoru. U slučaju isklopa, tj. pojave otočnog pogona, prijamnik ne dobiva signal i zaštita reagira.

3. ZAŠTITA OD OTOČNOG POGONA TEMELJENA NA ROCOF I VS ZAŠTITI

Prilikom kratkog spoja, koji je najveći u čvorištima VN/SN transformatorima, distribuirani izvori sa asinkronim i sinkronim generatorima doprinose povećanjem snage kratkog spoja što se također odnosi na sposobnost dimenzionirane mrežne opreme. Kako bi se to izbjeglo, potrebno je provjeriti snagu kratkog spoja za svaki pojedinačni slučaj priključenja DI. Kako bi se korigirala snaga kratkog spoja (KS), unutar elektrane uvode se odgovarajuće mjere (konvertersko odvajanje i ograničivaći struje KS) [6].

Zaštita distribuiranih izvora ne predstavlja poteškoće jer se izvodi pomoću standardne relejne opreme koja se pretežno zasniva na radijalnosti pogona. U slučaju kvara te zaštite, koriste se nadstrujni releji s vremenskim zatezanjem (selektivnost prorade) koji isključuju samo relevantnu granu, a ostali dio mreže ostaje u normalnom pogonu. Ako postoji više distribuiranih izvori koje napajaju mjesto kvara prilikom zaštite, moguće je da prorada ne uspije izolirati DI od mreže dovoljno brzo te zaštita isključi grane koje nisu pogođene kvarom. Kako bi se postigla pravilna selektivnost, moguće je povećati vremensko zatezanje nadstrujnih releja ili povećavanje zone nedjelovanja, ali se u pitanje dovodi oštećenje opreme i sigurnost osoblja. Zbog velikog broja čvorova te mogućnosti nastanka malih strujnih kvarova, potrebno je dodatno instaliranje jednosmjernih nezavisnih nadstrujnih releja s vremenskim zatezanje [6].

Ukoliko proizvodnja DI premašuje iznos opterećenja, povećavaju se gubitci u mreži. Promjena gubitaka uzrokuje i promjenu tokova snaga u mreži, ali ona nije predmet pogonskog ograničenja te ju je zbog ekonomičnosti potrebno svesti na minimum [6].

U posljednjih nekoliko godina razvijene su brojne metode za detekciju otočnog pogona. Najčešće i najtočnije metode za detekciju otočnog pogona koje se trenutno koriste su metoda detekcije promjene brzine frekvencije generatora ROCOF (Rate of Change of Frequency) i metoda detekcije promjene kuta napona generatora VS (Voltage Vector Shift) [7]. Spomenuti algoritmi implementirani su u numeričke releje kao zaštitne releje. Osnovni problem implementiranog releja je osjetljivost praćenih veličina koje predstavljaju problem u koordinaciji zaštite i vođenju sustava. Problemi s koordinacijom i detekcijom krivih kvarova može pobuditi zaštitni relej koji kvar krivo interpretira kao otočni pogon i tako isključiti distribuirani generator iz mreže što predstavlja nepoželjnu pojavu. Takav pristup otvara pitanje djelovanja releja na stvarni otočni pogon sustava te stvara potrebu za daljnjim razvojem. Zbog nedostatka poznavanja instaliranog kapaciteta te lokacije distribuiranih izvora prilikom kratkog

spoja, prorada zaštite je upitna te je upitno ponovno uspostavljanje stanja nakon kvara. Kako bi se to spriječilo, potrebna je upotreba komunikacijskih kanala radi lakšeg nadzora i stabilnosti sustava. Problem se javlja i kod neupravljivosti izlazne snage distribuiranih izvora [7].

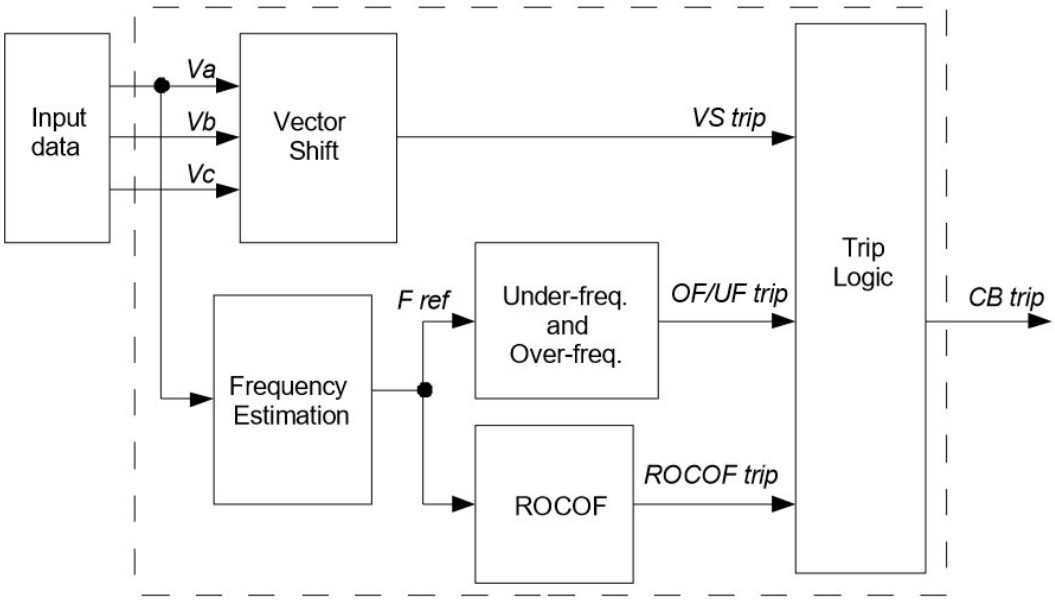
U radu su prikazani dinamički rezultati simulacije modela otočnog pogona s tipičnim događajima u sustavu. Ovim simulacijama će se bolje razumjeti korelacija između osjetljivosti i stabilnosti.

3.1. Releji sa ROCOF I VS algoritmima

Ako postoji balans između snage proizvodnje elektrane i potrošnje izvoda prema *Mrežnim pravilima,* elektrana ne smije ostati u otočnom pogonu. U stanju otočnog pogona prilikom malog debalansa, male promjene kuta i frekvencije moguće je da kod APU-a (Automatskog ponovnog uklopa) prekidač isklopi. To stanje isklopa nije dopustivo pa se pristupilo primjeni zaštite s funkcijama df/dt> i df/dt< (ROCOF) koja korigira krive prorade.

S obzirom da pojedini releji imaju najmanju osjetljivost df/dt člana 0,2 Hz/s preporučena postavka osjetljivosti releja brzine promjene frekvencije generatora prema [8] trebala bi biti df/dt = 0,125 Hz/s. Provedbom testiranja autora [8] najbolja metoda za detekciju otočnog pogona je ROCOF metoda.

ROCOF metoda temelji se na funkciji df/dt koja prilikom trajnog ili prolaznog kvara te odvajanja dijela mreže uslijed disbalansa proizvodnje i potrošnje aktivira zaštitu mjerenjem brzine promjene frekvencije.



Sl.3.1. Blok shema releja sa ROCOF i VS algoritmom [7]

Relej sa ROCOF algoritmom detektira promjene frekvencije uzrokovane oscilacijama rotora generatora nakon gubitka veze s glavnim vodom u slučaju otočnog pogona. Vector Shift (VS) otkriva trenutne promjene trofaznih kutova napona koje algoritam detektira nakon odspajanja od glavnog voda. VS algoritam funkcionira bez odgode te pruža gotovo trenutačno isklapanje [7].

Model koristi sekundarne vrijednosti 110V kako bi izračunao brzinu promjene frekvencije kao i iznenadnu promjenu kuta [7].

3.1.1 Metoda detekcije promjene brzine frekvencije generatora (ROCOF)

Prilikom kvarova te ispada velikog broja generatora previsoko podešeni frekvencijski releji stvaraju problem isključenjem DI te povećavaju nedostatak snage proizvodnje.

Relej sa ROCOF algoritmom detektira promjene frekvencije uzrokovane oscilacijama rotora generatora nakon gubitka veze s glavnim vodom u slučaju otočnog pogona [7].

Promjena frekvencije uzrokovana je neravnotežom između ulazne mehaničke snage generatora i opterećenja. Nakon isključenja iz glavnog voda posljedicom neravnoteže

frekvencija se dramatično mijenja. Primjenom jednadžbe za gibanje rotora J (3-1) i jednadžbom za inercijsku konstantu H (3-2) razvijamo izraz za promjenu frekvencije prema [9]:

$$J\frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_e \tag{3-1}$$

gdje je:

- ω_r - mehanička kutna brzina,
- T_m - mehanički moment,
- T_e – elektromagnetski moment.

Inercijska konstanta [9]:

$$H = \frac{\frac{1}{2}J\omega^2_{r0}}{S_n} \tag{3-2}$$

Uzimajući u obzir formulu za kružnu brzinu (3-3) i početnu promjenu frekvencije (3-4) te njihovim uvrštavanjem dobijemo izraz (3-5).

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_r \tag{3-3}$$

$$f_r = \frac{f}{p} \tag{3-4}$$

$$J = \frac{2 \cdot H \cdot S_n}{\omega_{r0}} \tag{3-5}$$

Daljnjim uvrštavanjem dobijemo prema [9]:

$$\frac{2 \cdot H \cdot S_n}{\omega^2_{r0}} \cdot \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{2 \cdot H \cdot S_n}{\omega^2_{r0}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{df_r}{dt} = \frac{2 \cdot H \cdot S_n}{2 \cdot \pi \cdot \frac{f}{p}\omega_{r0}} \frac{2\pi}{p} \cdot \frac{df}{dt} = \Delta T \tag{3-6}$$

$$\frac{2 \cdot H \cdot S_n}{f}\frac{df}{dt} = \Delta T \omega_{r0} \tag{3-7}$$

$$\Delta P = \Delta T \cdot \omega_{r0} \tag{3-8}$$

Zamjenom te daljnjim uvrštavanjem dobijemo i konačnu formulu za promjenu frekvencije prema [7] (3-10) :

$$\frac{2 \cdot H \cdot S_n}{f} \frac{df}{dt} = \Delta P \tag{3-9}$$

$$\frac{df}{dt} = \frac{\Delta P \cdot f}{2 \cdot S_n \cdot H} \tag{3-10}$$

gdje je:

-ΔP- razlika u djelatnoj snazi generatora između sinkroniziranog i otočnog pogona,

- f - nazivna frekvencija generatora,

- S_n - nazivna prividna snaga generatora,

-H – inercijska konstanta.

Model releja u koji je implementiran ROCOF algoritam prilikom mjerenja temelji se prema formuli [7]:

$$\frac{df}{dt} = \frac{f_n - f_{n-3cycle}}{T_{3cycle}} \tag{3-11}$$

gdje je:

-f_n - trenutna frekvencija mjerenja,

- $f_{n\text{-}3\text{cycle}}$ - frekvencija mjerena tri perioda ranije,

-$T_{3\text{cycle}}$ – trajanje tri prijašnja perioda.

Usporedbom uzastopnih razmatranjima vrijednosti ROCOF mjerenja u periodu od 60ms ocjenjuje se je li promjena trajanja ili ne [7]. Kada mjerena vrijednost prekorači zadanu vrijednost, relej proradi. Dodatno vrijeme kašnjenja možemo mijenjati kako ne bi reagirao na normalna uklapanja i isklapanja te ostale prijelazne promjene u sustavu što je od izuzetne važnosti.

Model za ispitivanje promjene frekvencije:

U ovom radu prikazani će biti analizirani slučajevi rada elektrane gdje su najveće brzine promjene frekvencije preko modela za ispitivanje promjene frekvencije [10]:

-najveće proizvodnje djelatne snage generatora i najmanjeg opterećenja glavnog izvoda,

- najmanje proizvodnje djelatne snage generatora i najvećeg opterećenja glavnog izvoda,

- najveće proizvodnje djelatne snage generatora i najvećeg opterećenja pomoćnog izvoda,

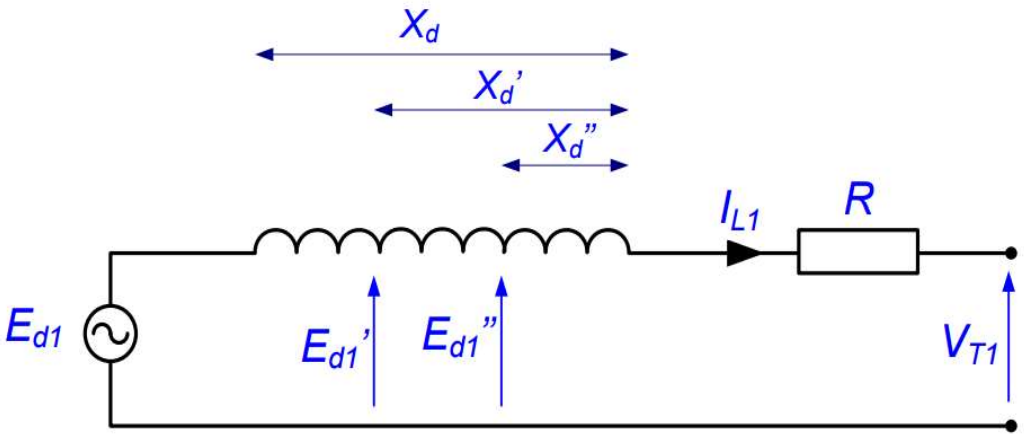
- najveće proizvodnje djelatne snage generatora i najmanjeg opterećenja pomoćnog izvoda,

Detaljan model analiziranog sustava s postupkom zaštite prikazani su u programskom alatu *DIgSILENT Power Factory.*

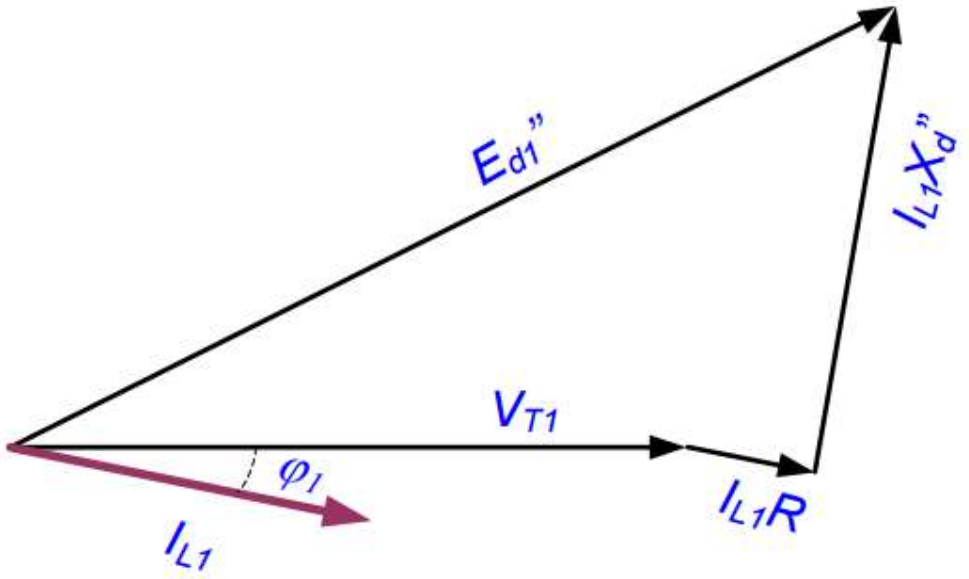
S obzirom na zaštitni relej, promjena brzine frekvencije mora biti manja od 0,2 Hz/s što je relejima ujedno i najmanja osjetljivost.

3.1.2 Metoda detekcije promjene kuta napona generatora (VS)

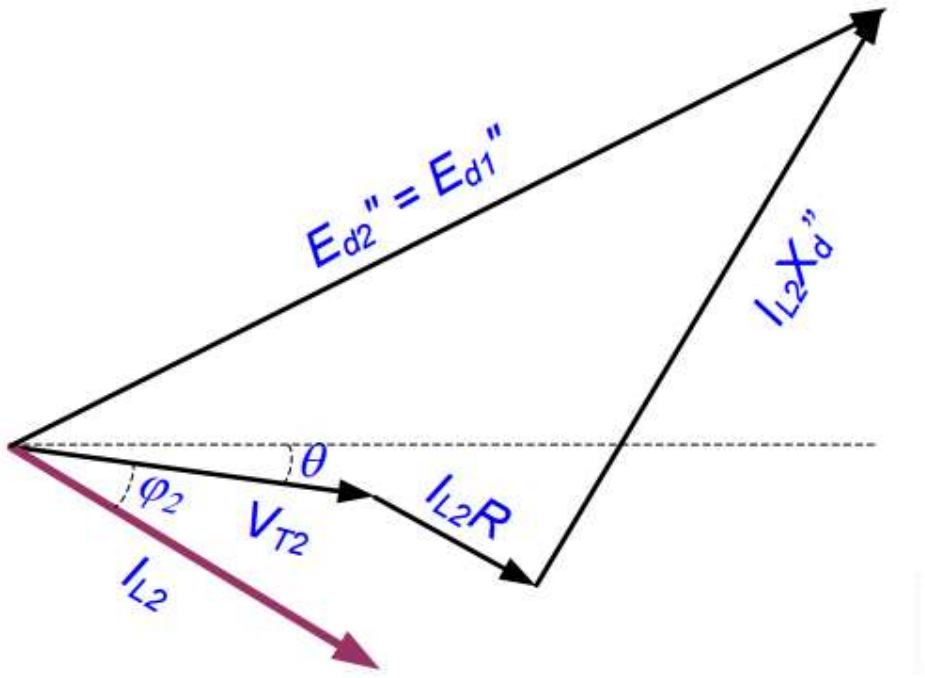
Princip detekcije VS (Voltage Vector Shift) prikazan na slici 3.4. [11]. Ekvivalentna shema generatora [11] prikazuje najvažnije električne veličine kao i pomak kuta vektora napona generatora. Do pomaka dolazi zbog debalansa snage na stezaljkama generatora uslijed kvarova u mreži, najčešće zemljospojeva, drugih prekida te djelovanja APU-a.



Sl.3.2. Shema sinkronog generatora [11]



Sl.3.3. Vektorski dijagram generatora spojenog na krutu mrežu [11]



Sl.3.4. Vektorski dijagram generatora u otočnom radu [11]

Algoritam zaštite promjene kuta napona temelji se na promjeni kuta napona u sve tri faze. Mjerenje se vrši nakon pola periode i nakon cijele periode u sve tri faze. Općenito, VS releji mjere iste vrijednosti kao i podfrekventni i nadfreventni releji, ali na drukčijim principima.

Razlika kuta računa se u istom trenutku između trenutnog i prethodnog perioda. Na kraju dobijemo 6 rezultata od svakog promatranog sustava (2 poluperiode x 3 fazna napona) [7].

Ako bilo koji od 6 rezultata predstavlja veću vrijednost od dopuštene, algoritam detektira promjenu. S obzirom da VS relej uspoređuje samo dva uzastopna rezultata, omogućena je brza detekcija, tj. prorada releja koja se kreće u granicama od 30ms. Kako bi smanjili utjecaj harmoničnih izobličenja, algoritam radi proračune sa sve 3 faze te time uklanja smetnje. Mogućnost pojave lažne prorade uzrokovane nesimetričnim greškama smanjuje se ovim postupkom te se tim povećava stabilnosti i zaštita sustava [7].

4. ANALIZA DETEKCIJE I ZAŠTITE OD OTOČNOG POGONA ELEKTRANE

Analiza zaštite i detekcije odrađena je u inženjerskom programskom paketu DIgSILENT PowerFactory. *DIgSILENT PowerFactory* je program koji služi za analizu industrijskog, distribucijskog i prijenosnog elektroenergetskog sustava.

Točnost samog programa i proračuna potvrđena je brojnim implementacijama organizacija uključenih u rad i planiranje EES-a. Najbitnije funkcije koje program opisuje su proračuni stabilnosti, tokova snaga, kratkih spojeva, harmoničnih analiza i same analize raznih modela.

4.1. Podaci o mreži

Analiza i simulacija detekcije i zaštite od otočnog pogona učinjena je na distribucijskoj mreži koja je dana u prilogu P.4.1. Radi se o mreži u kojoj imamo 3 generatora pojedinačne snage 1,5 MVA u paralelnom pogonu, koji preko sabirnice 10 kV napajaju potrošače. U ovisnosti o proizvodnji snage generatora kruta mreža prima ili daje snagu u sustav. Kruta mreža je i na glavnom i pomoćnom vodu spojena na transformator 110/35 kV te preko dva paralelna transformatora 35/10 kV na sabirnice od 10 kV koje preko 16 transformatora 10/0,4 kV napajaju potrošače.

Podaci s elementima mreže nalaze se u sljedećim tablicama.

Tab. 4.1. Podaci o transformatorima

Naziv pripadajuće TS 10/0,4 kV	Nazivna snaga transformatora (MVA)	Prijenosni omjer	Napon kratkog spoja, uk (%)	Napon kratkog spoja, uk0 (%)	Grupa spoja
2-Winding Transformer(27)	40	110/35	11	3	YNyn0
2-Winding Transformer(29)	4	35/10	6,03	3	Yd0
2-Winding Transformer(28)	4	35/10	5,82	3	Yd0
2-Winding Transformer(7)	0.2	10/0,4	4	4	Dyn5

2-Winding Transformer	0,16	10/0,4	4	4	Yzn5
2-Winding Transformer(21)	0,05	10/0,4	4	4	Dyn5
2-Winding Transformer(23)	0,25	10/0,4	6	6	Dyn5
2-Winding Transformer(24)	0,5	10/0,4	4	4	Dyn5
2-Winding Transformer(20) Stamford 3	0,63	10/0,4	4	4	Dyn5
2-Winding Transformer(18) Stamford	1,6	10/0,4	6	6	Dyn5
2-Winding Transformer(19) Stamford 2	1,6	10/0,4	6	6	Dyn5
2-Winding Transformer(6)	0,05	10/0,4	4	4	Dyn5
2-Winding Transformer(3)	0,16	10/0,4	4	4	Dyn7
2-Winding Transformer(22)	0,25	10/0,4	4	4	Dyn5
2-Winding Transformer(2)	0,4	10/0,4	4	4	Dyn5
2-Winding Transformer(4)	0,4	10/0,4	4	4	Dyn5
2-Winding Transformer(5)	0,4	10/0,4	4	4	Yzn5
2-Winding Transformer(1)	0,16	10/0,4	4	4	Yzn5
2-Winding Transformer(26)	8	35/10	6	3	Dyn0
2-Winding Transformer(25)	8	35/10	6	3	Dyn0
2-Winding Transformer(17)	40	110/35	11	3	YNyn0

Tab. 4.2. Podaci o vodičima

Naziv voda ili dionice voda		Dužina voda (km)	Tip voda (vodiča)	Materijal vodiča	Presjek vodiča (mm²)	Pogonski napon (kV)
line(45)	XHE 49 A 3x185	8,1	Kabel	Al	185	35
line(46)	XHE 49A 3x(1x150)	3,5	Kabel	Al	150	35
line(43)	PP 41-A 3X150	0,115	Kabel	Al	150	10

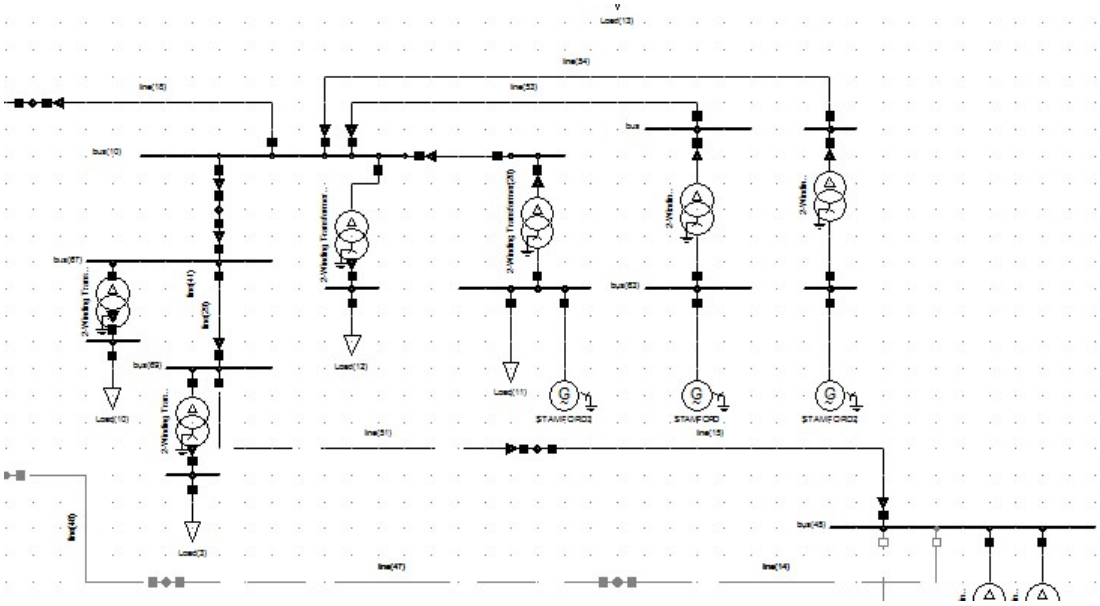
line(44)	XHE 49A 3x(1x150)	0,475	Kabel	Al	150	35
line(31)	PP 41-A 3x(1x150)	0,935	Kabel	Al	150	10
line(32)	XHE 49A 3x(1x150)	0,475	Kabel	Al	150	35
line(26)	AL/CE 3x95	1	Uže	Al	95	10
line(30)	PP 41-A 3X150	0,87	Kabel	Al	150	10
line(36)	PP 41-A 3x120	0,72	Kabel	Al	120	10
line(27)	PP 41-A 3X150	1	Kabel	Al	150	10
line(37)	XHE 49A 3x(1x150)	0,8	Kabel	Al	150	35
line(42)	AL/CE 3x50	1,54	Uže	Al	50	10
line(39)	AL/CE 3x95	1,29	Uže	Al	95	10
line(18)	PP 41-A 3X150	0,15	Kabel	Al	150	10
line(54)	XHE 49A 3x(1x150)	0,575	Kabel	Al	150	35
line(53)	XHE 49A 3x(1x150)	0,575	Kabel	Al	150	35
line(40)	PP 41-A 3X150	0,25	Kabel	Al	150	10
line(41)	AL/CE 3x95	3,59	Uže	Al	95	10
line(29)	AL/CE 3x95	17	Uže	Al	95	10
line(51)	AL/CE 3x95	1,1	Uže	Al	95	10
line(15)	XHP 48-A 3x(1x150)	0,91	Kabel	Al	150	10
line(14)	AL/CE 3x95	1	Uže	Al	95	10
line(47)	AL/CE 3x95	1	Uže	Al	95	10
line(48)	AL/CE 3x95	1	Uže	Al	95	10
line(5)	AL/CE 3x95	1	Uže	Al	95	10
line(3)	AL/CE 3x95	1	Uže	Al	95	10
line	AL/CE 3x95	1	Uže	Al	95	10
line(4)	AL/CE 3x95	1	Uže	Al	95	10
line(8)	AL/CE 3x95	1	Uže	Al	95	10
line(13)	Al Fe 3x120 mm2	16,1	Uže	Al Fe	120	35
line(55)	PP 41-A 3x(1x150)	0,15	Kabel	Al	150	10
line(17)	AL/CE 3x95	0,67	Uže	Al	95	10

Tab. 4.3. Podaci o opterećenjima

Naziv opterećenja	P(MW)	S(MVA)	Q(Mvar)	Faktor snage
Load(11)	0,55			0,95
Load(12)		0,02624881		0,9524242
Load(10)	0,022		0,007	
Load(3)	0,004		0,001	
Load(6)				
Load(7)				
Load(13)	0,025		0,009	
Load(2)	0,08		0,026	
Load(9)	0,199		0,066	
Load(1)		0,08190849		0,9522823
Load(15)	0,031		0,01	
Load(16)	0,125		0,041	
Load(8)	0,199		0,066	
Load(4)	0,199		0,066	
Load(5)	0,199		0,066	
Load	0,078		0,025	
Load(14)	0,08		0,026	

Tab. 4.4. Podaci o generatorima

Naziv generatora	S(MVA)	Napon(kV)	Faktor snage
STAMFORD	1,5	0,4	0,9
STAMFORD2	1,5	0,4	0,9
STAMFORD3	1,5	0,4	0,9



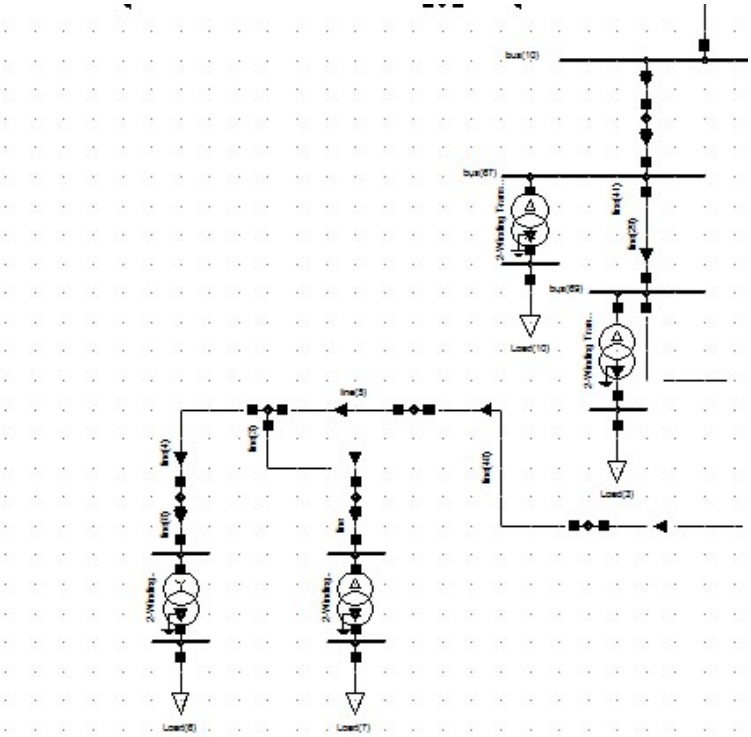
Sl.4.1. Prikaz generatora

4.2. Analiza i simulacija ispitivanja detekcije i zaštite od otočnog pogona na glavnom izvodu

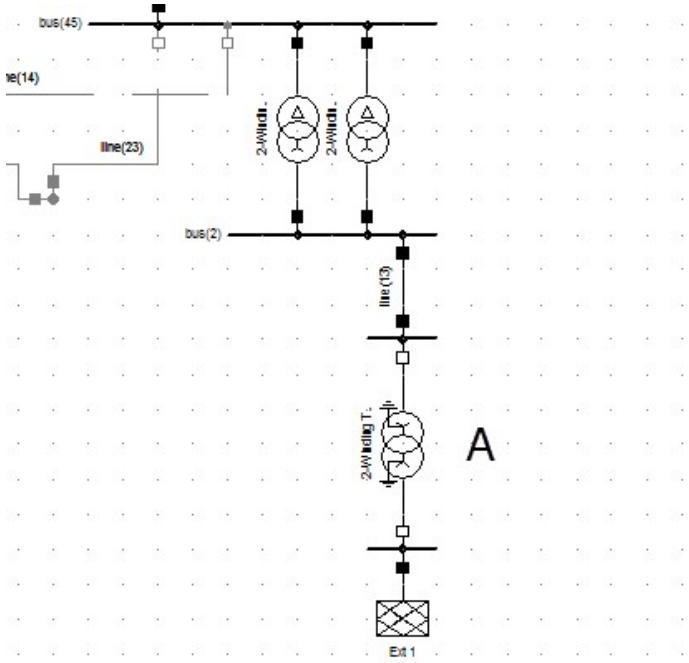
Analiza i simulacija detekcije i zaštite od otočnog pogonima izvršena je za prvi slučaj na glavnom izvodu. Simulacija se izvodi tako da se u određenom trenutku isključi napajanje krute mreže od ostatka sustava. Vrijeme koje je uzeto kao vrijeme isključenja krute mreže na transformatoru preko kojega je spojen s ostatkom sustava je 150 ms. Kako bi se dobili najpovoljniji rezultati, tj, najveću promjenu brzine frekvencije i promjenu kuta rotora, simulacija se radi za obrnute slučajeve potrošnje i proizvodnje djelatne snage. U jednom slučaju se za simulaciju uzima najveća proizvodnja djelatne snage generatora uz najmanje opterećenje pojedinih izvodan na glavnom izvodu, a u drugom slučaju najmanja proizvodnja djelatne snage generatora uz najveće opterećenje pojedinih izvodan na glavnom izvodu. Ovi slučajevi su već spomenuti u radu pa su već poznati. Najnepovoljniji je slučaj, kako je opisano u prijašnjem poglavlju, balans snaga između proizvodnje i potrošnje nakon isključenja glavnog izvoda. U tom slučaju nakon isključenja glavnog izvoda ne postoji injektiranje djelatne snage iz generatora u krutu mrežu niti obratno.

4.2.1. Analiza i simulacija na glavnom izvoda s najvećom proizvodnjom generatora i najmanjim opterećenjem izvoda

Analizu i simulaciju detekcije i zaštite od otočnog pogona u ovom slučaju izvodi se na glavnom izvodu. Kako bi izveli simulaciju, postavljena je najveća djelatna snaga na generatoru te najmanje opterećenje na određenim opterećenjima na glavom izvodu. Sva tri generatora proizvode $\sum P_{Gmax}$ = 2,55 MW djelatne snage, s time da svaki proizvodi P_G = 0,85 MW. Najmanje opterećenje glavnog izvoda podešeno je na $\sum P_L min$ = 0,21 MW na opterećenjima 3,6,7,10 koji su smješteni na glavnom izvodu. Ukupno opterećenja na svim izvodima je $\sum P_L$ = 1,522 MW. Ostala opterećenja sustava su ostala prema zadanim postavkama. Kako bi prikazali promjenu generatorske frekvencije i kuta rotora, glavni vod je isključen u trenutku t = 150 ms na trafostanici 2-Winding Transformer (27) 110/30 kV - A prikazanoj na Sl. 4.3. Simulacija je promatrana do vremena t = 750 ms te su u tom vremenskom periodu dani sljedeći grafovi funkcija.

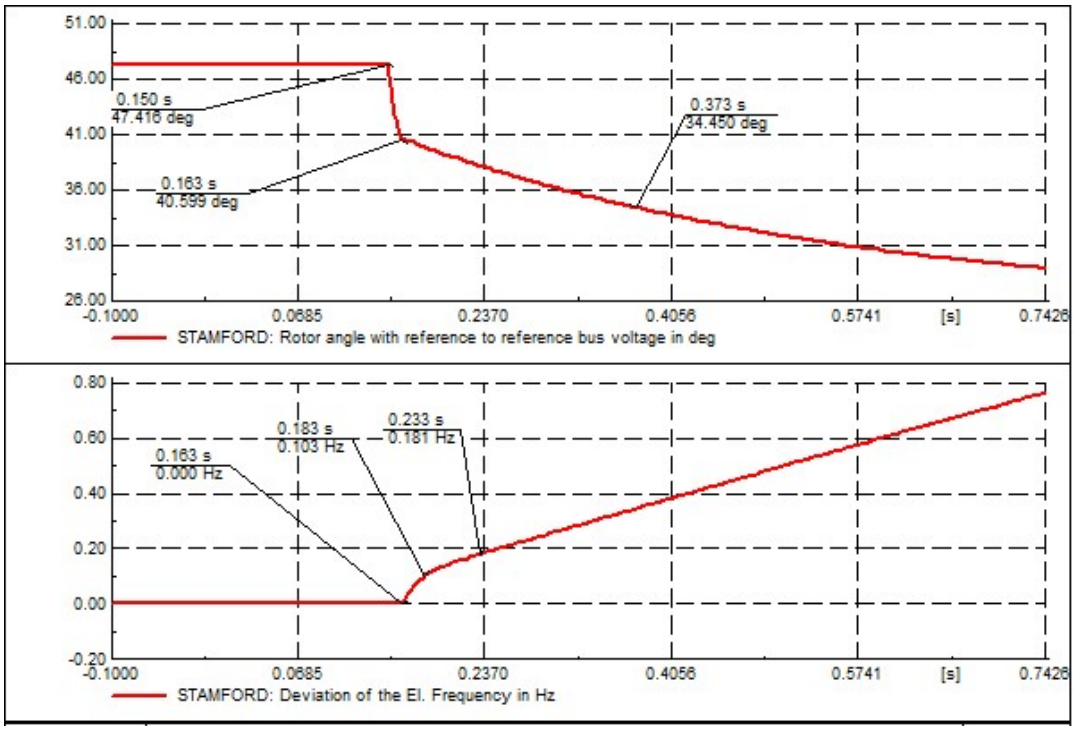


Sl.4.2. Prikaz promijenjenih opterećenja 3,6,7,10



Sl.4.3 Prikaz isključenog transformatora nakon t = 150 ms

Simulacijom su dobiveni sljedeći grafovi za generator 1,2,3.



Sl.4.4. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 1

Izračun se radi se na način da se uzmu dvije točke nakon skokovite promjene funkcije sa grafa koji prikazuje promjenu frekvencije generatora. Za proračun se uzima prvo vrijeme koje nastaje nakon promjene u trenutku t = 0,183 s. Izračunom se oduzima vrijeme u točki 1 s vremenom nastanka poremećaja (150 ms). Nakon toga uzima se frekvencija Δf u točki 1 koja se dijeli s dobivenim rezultatom promjene vremena Δt. Prikaz proračuna dan je sljedećim izračunom:

U točki t_1 = 0,183 s:

t_1=0,183 s

Δt_1= 0,183 s – 0,150 s = 0,033 s

$\Delta f_1 / \Delta t_1$ =0,103/0,033 = 3,12 Hz/s.

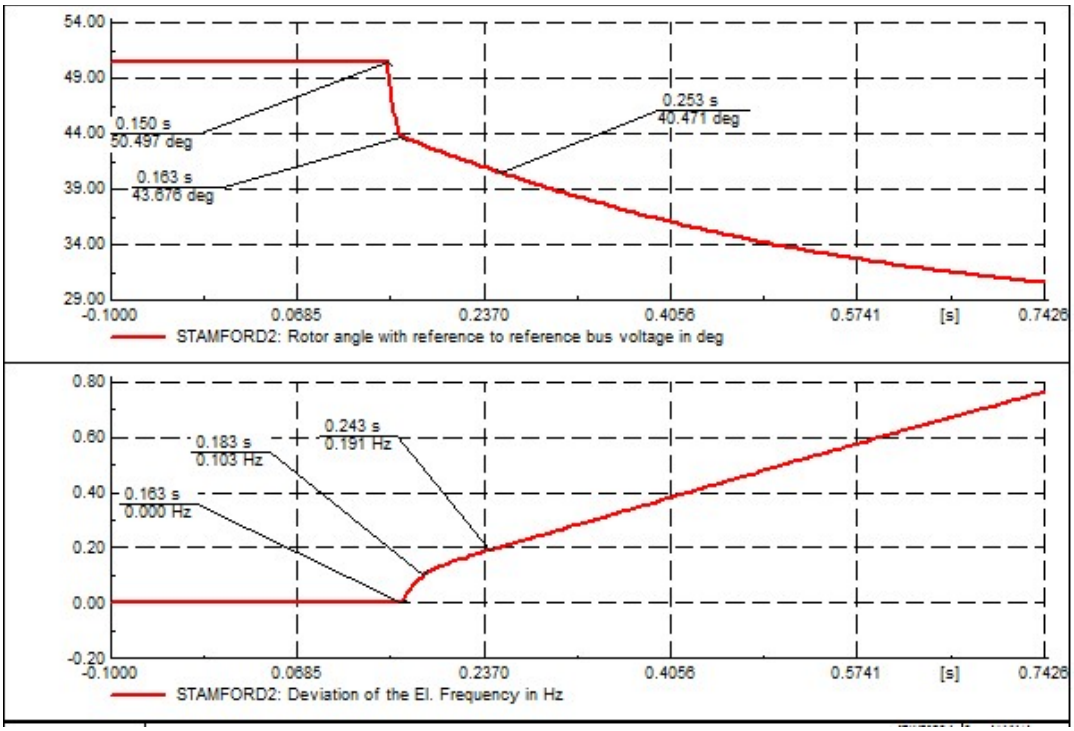
U točki t_2 = 0,233 s:

t_2=0,233 s

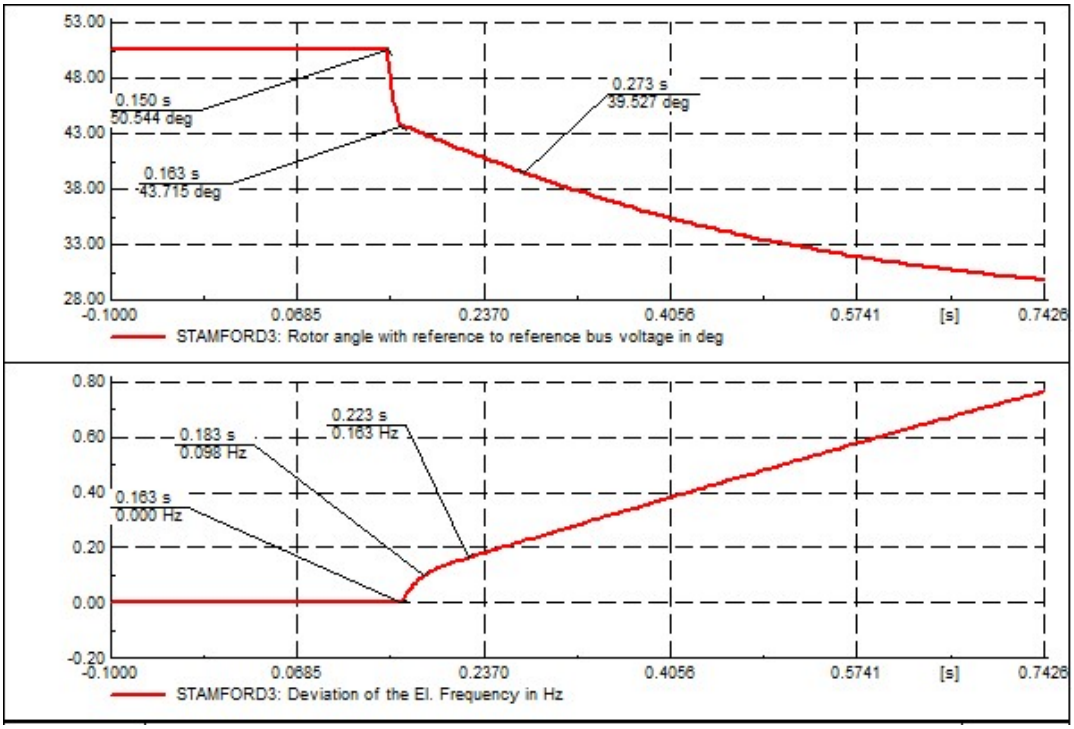
Δt_2= 0,233 s – 0,150 s = 0,083 s

$\Delta f_2/\Delta t_2$ =0,181/0,083 = 2,18 Hz/s.

Ostale proračune ćemo samo prikazati unutar tablica.



Sl.4.5. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 2



Sl.4.6. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 3

Tab. 4.5. Prikaz izračuna brzine promjene frekvencije generatora u točki 1

	Vrijeme u t_1[s]	Δt_1[s]	Δf_1[Hz]	$\Delta f_1/\Delta t_1$[Hz/s]	Prorada releja
Generator 1	0,183	0,033	0,103	3,12	da
Generator 2	0,183	0,033	0,103	3,12	da
Generator 3	0,183	0.233	0,098	2,97	da

Tab. 4.6. Prikaz izračuna brzine promjene frekvencije generatora u točki 2

	Vrijeme u t_2[s]	Δt_2[s]	Δf_2[Hz]	$\Delta f_2/\Delta t_2$[Hz/s]	Prorada releja
Generator 1	0.233	0,083	0,181	2,18	da
Generator 2	0.243	0,093	0,191	2,05	da
Generator 3	0.223	0,073	0,163	2,23	da

Promjena brzine frekvencije na generatorima prikazan je u Tab 4.5. u prvom vremenu $t_{1,}$ te u Tab 4.6. u drugom vremenu $t_{2.}$ U prvom i drugom trenutku brzina promjene frekvencije veća je od 0,2 Hz/s te je prema Tab 4.5. i Tab 4.6. vidljivo da bi zaštita proradila. Pomoću

prikaza funkcija za identifikaciju frekvencije vidljivo je da se grafovi u sva 3 generatora ponašaju identično, tj. nakon nastanka poremećaja u sustavu, prouzrokovanih isključenjem glavnog voda, funkcije skokovito rastu. Nakon skokovite promjene funkcije se stabiliziraju te postaju linearne. Nakon isključenja cjelokupno opterećenje preuzimaju generatori te im se tako i povećava generatorska frekvencija.

Tab. 4.7. Prikaz promjene kuta rotora u odnosu na kut napon referentne sabirnice

	Točka 1	Točka 2	Točka 3	Prorada releja
Generator 1	47,416°	40,599°	34,450°	da
Generator 2	50,497°	43,676°	40,471°	da
Generator 3	50,544°	43,715°	39,527°	da

Prema prikazu Tab 4.7. vidljivo je da se kut rotora svih generatora kreće u sličnim vrijednostima. Kako bi zaštita proradila i detektirala promjenu, promjena kuta mora biti veća od 7° jer je to najmanji prag prorade na koju relej reagira. Prema grafovima svih generatora vidimo da je promjena mnogo veća od 7° te će tako i zaštita reagirati. Funkcije nakon nastanka poremećaja skokovito padaju te nakon nekog vremena prelaze u linearnu funkciju.

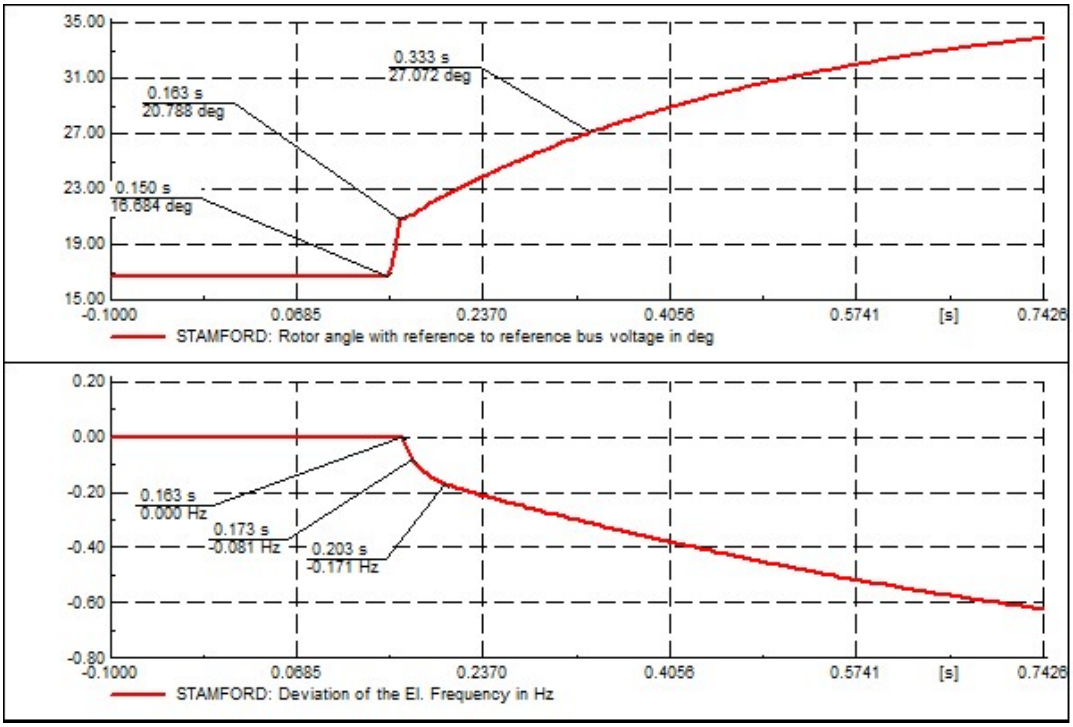
S obzirom da ne postoji balans između proizvodnje djelatne snage i potrošnje, višak proizvedene djelatne snage bio je injektiran u ekvivalentnu mrežu preko TS 110/30 kV – A, sve dok nije došlo do isključenja glavnog voda u TS 110/30 kV – A. Nakon isključenja cjelokupno opterećenje preuzimaju generatori te im se tako smanjuje kut rotora i povećava generatorska frekvencija. Sve tri simulacije triju generatora su gotovo identične.

4.2.2. Analiza i simulacija na glavnom izvodu s najmanjom proizvodnjom generatora i najvećim opterećenjem izvoda

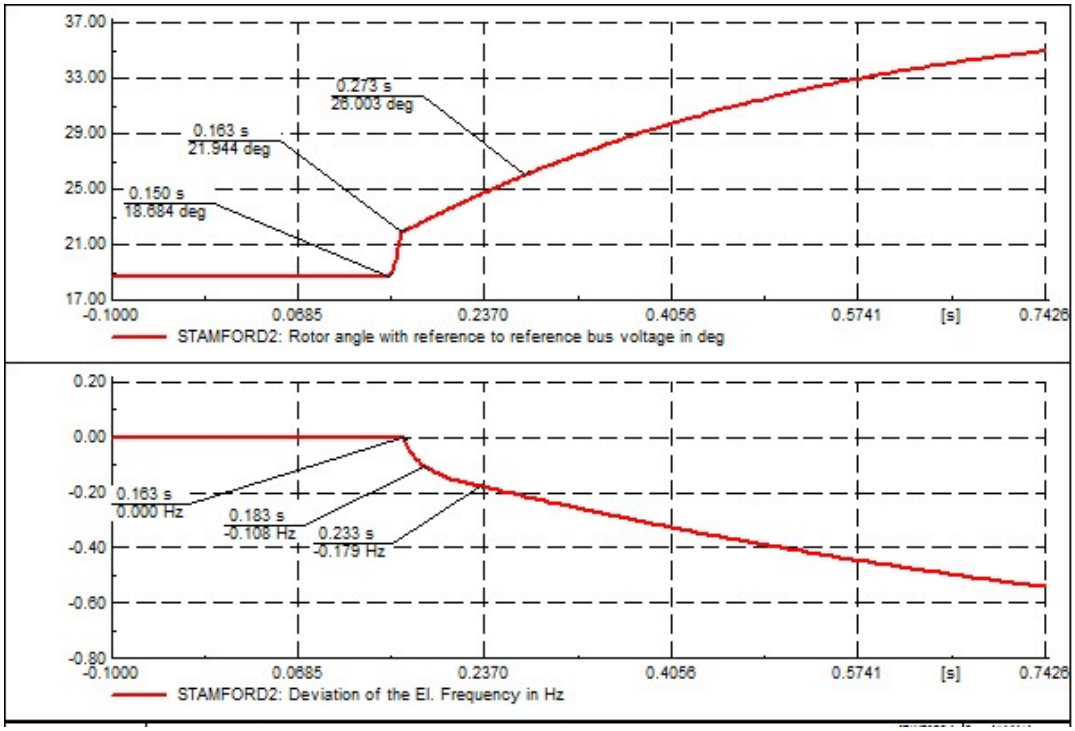
Analiza i simulacija detekcije i zaštite od otočnog pogona u ovom slučaju odradit će se na glavnom izvodu. Kako bi se izvela simulacija, postavljena je najmanja djelatna snaga na generatoru te najveće opterećenje na pojedinim opterećenjima na glavom izvodu. Sva tri generatora proizvode zajedno $\sum P_{Gmin} = 0{,}78$ MW djelatne snage, s time da svaki proizvodi $P_G = 0{,}26$ MW. Najmanje opterećenje glavnog izvoda podešeno je na $\sum P_{Lmax} = 0{,}31$ MW na

opterećenjima 3,6,7,10 koji su smješteni na glavnom izvodu. Ukupno opterećenje mreže sa svim priključenjem izvodima je $\sum P_L = 1{,}837$ MW. Kako bi se prikazala promjena generatorske frekvencije i kuta rotora, glavni vod je isključen u trenutku t = 150 ms na trafostanici 2-Winding Transformer (27) 110/30 kV - A. Simulacija je promatrana do vremena t = 750 ms te su u tom vremenskom periodu dani sljedeći grafovi funkcija.

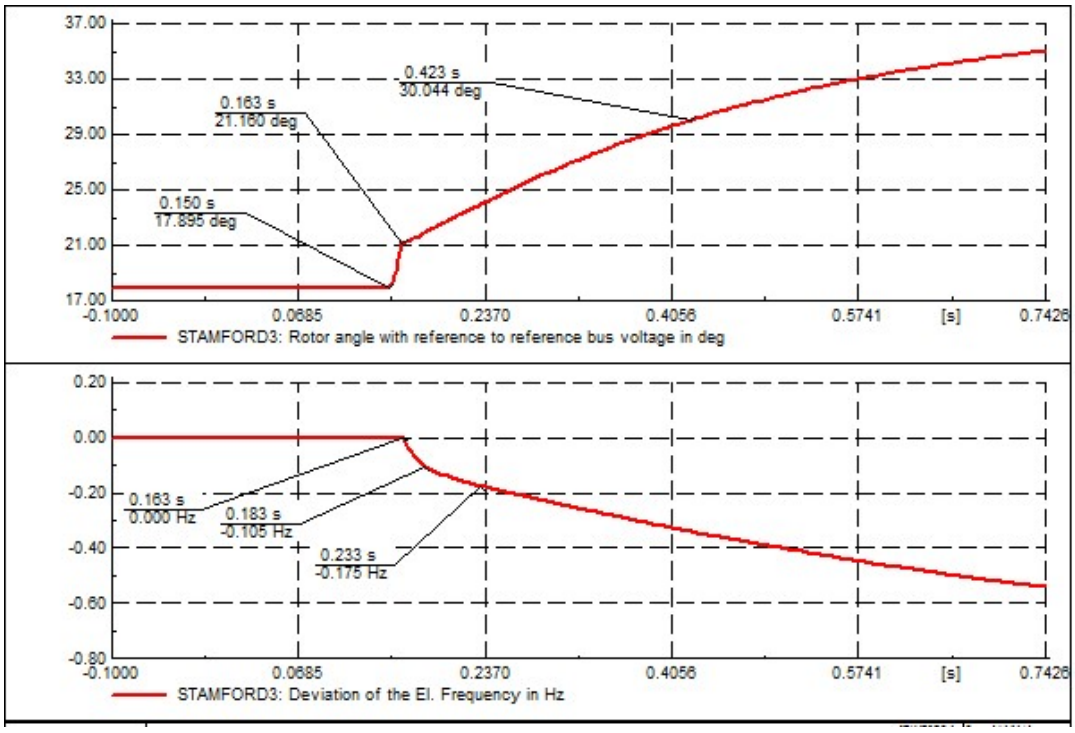
Grafovi su prikazani sljedećim slikama za sva 3 generatora.



Sl.4.7. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 1



Sl.4.8. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 2



Sl.4.9. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 3

Tab. 4.8. Prikaz izračuna brzine promjene frekvencije generatora u točki 1

	Vrijeme u t_1[s]	Δt_1[s]	Δf_1[Hz]	$\Delta f_1/\Delta t_1$[Hz/s]	Prorada releja
Generator 1	0,173	0,023	0,081	3,52	da
Generator 2	0,183	0,033	0,108	3,27	da
Generator 3	0,183	0,033	0,105	3,18	da

Tab. 4.9. Prikaz izračuna brzine promjene frekvencije generatora u točki 2

	Vrijeme u t_2[s]	Δt_2[s]	Δf_2[Hz]	$\Delta f_2/\Delta t_2$[Hz/s]	Prorada releja
Generator 1	0,203	0,053	0,171	3,23	da
Generator 2	0,233	0,083	0,179	2,16	da
Generator 3	0,233	0,083	0,175	2,11	da

Promjena brzine frekvencije na generatorima prikazana je u Tab 4.8. u prvom vremenu t_1, te u Tab 4.9. u drugom vremenu t_2. U prvom i drugom trenutku brzina promjene frekvencije veća je od 0,2 Hz/s te je prema Tab 4.8. i Tab 4.9. vidljivo da bi zaštita proradila. Preko prikaza funkcija za identifikaciju frekvencije vidljivo je da se grafovi u sva 3 generatora ponašaju identično, tj. nakon nastanka poremećaja u sustavu, prouzrokovanih isključenjem glavnog voda, funkcije skokovito padaju. Nakon skokovite promjene funkcije se stabiliziraju te postaju linearne.

Tab. 4.10. Prikaz promjene kuta rotora u odnosu na kut napon referentne sabirnice

	Točka 1	Točka 2	Točka 3	Prorada releja
Generator 1	16,684°	20,788°	27,072°	da
Generator 2	18,684°	21,944°	26,003°	da
Generator 3	17,895°	21,160°	30,044°	da

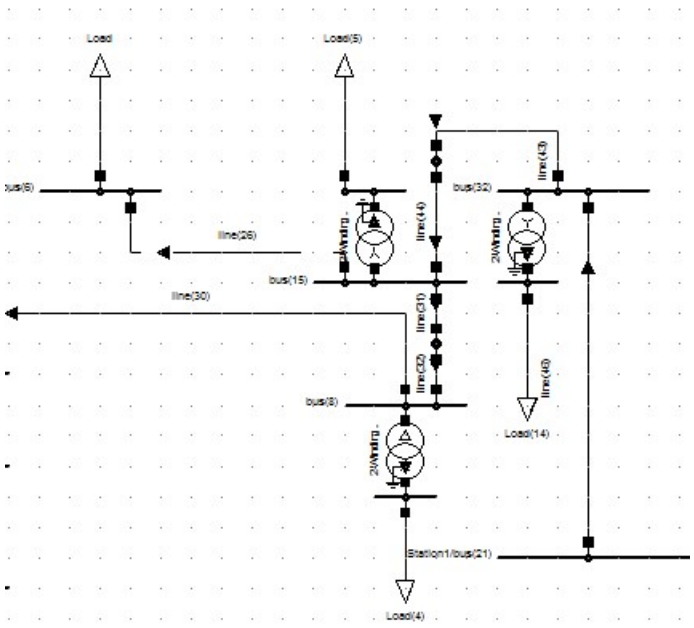
Prema prikazu Tab 4.10. vidljivo je da se kut rotora svih generatora kreće u sličnim vrijednostima. Kako bi zaštita proradila i detektirala promjenu, promjena kuta mora biti veća od 7° jer je to najmanji prag prorade na kojoj relej reagira. Prema grafovima svih generatora vidljivo je da je promjena mnogo veća od 7° te će tako i zaštita reagirati. Funkcije nakon nastanka poremećaja skokovito rastu te nakon nekog vremena prelaze u linearnu funkciju.

4.3. Simulacija ispitivanja detekcije i zaštite od otočnog pogona na pomoćnom izvodu

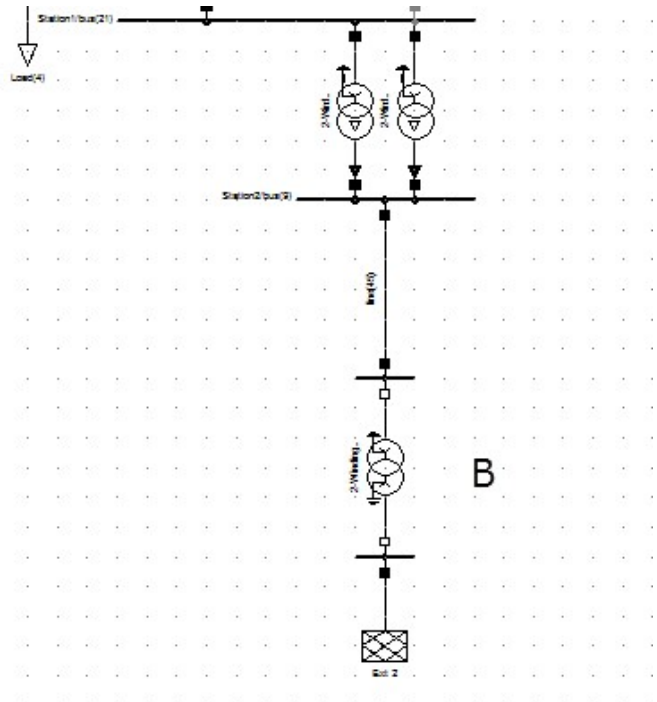
Analiza i simulacija detekcije i zaštite od otočnih pogona izvršena je ovog puta na pomoćnom izvodu. Simulacija se izvodi tako da se u određenom trenutku isključuje napajanje krute mreže od ostatka sustava. Vrijeme koje se uzima kao vrijeme isključenja krute mreže na njegovom transformatoru je 150 ms. Kako bi se dobili najpovoljniji rezultati, tj. najveću promjenu brzine frekvencije i kuta rotora, simulacija se radi za obrnute slučajeve potrošnje i proizvodnje djelatne snage. U jednom slučaju će se za simulaciju uzeti najveća proizvodnja djelatne snage generatora uz najmanje opterećenje pojedinih izvoda na pomoćnom izvodu, a u drugom slučaju najmanja proizvodnja djelatne snage generatora uz najveće opterećenje pojedinih izvodan na pomoćnom izvodu. Ovi slučajevi su već spomenuti u radu pa su već poznati. Najnepovoljniji je slučaj, kako je opisano u prijašnjem poglavlju, balans snaga između proizvodnje i potrošnje nakon isključenja pomoćnog izvoda. U tom slučaju nakon isključenja pomoćnog izvoda ne postoji injektiranje djelatne snage iz generatora u krutu mrežu niti obratno.

4.3.1. Analiza i simulacija na pomoćnom izvodu s najvećom proizvodnjom generatora i najmanjim opterećenjem izvoda

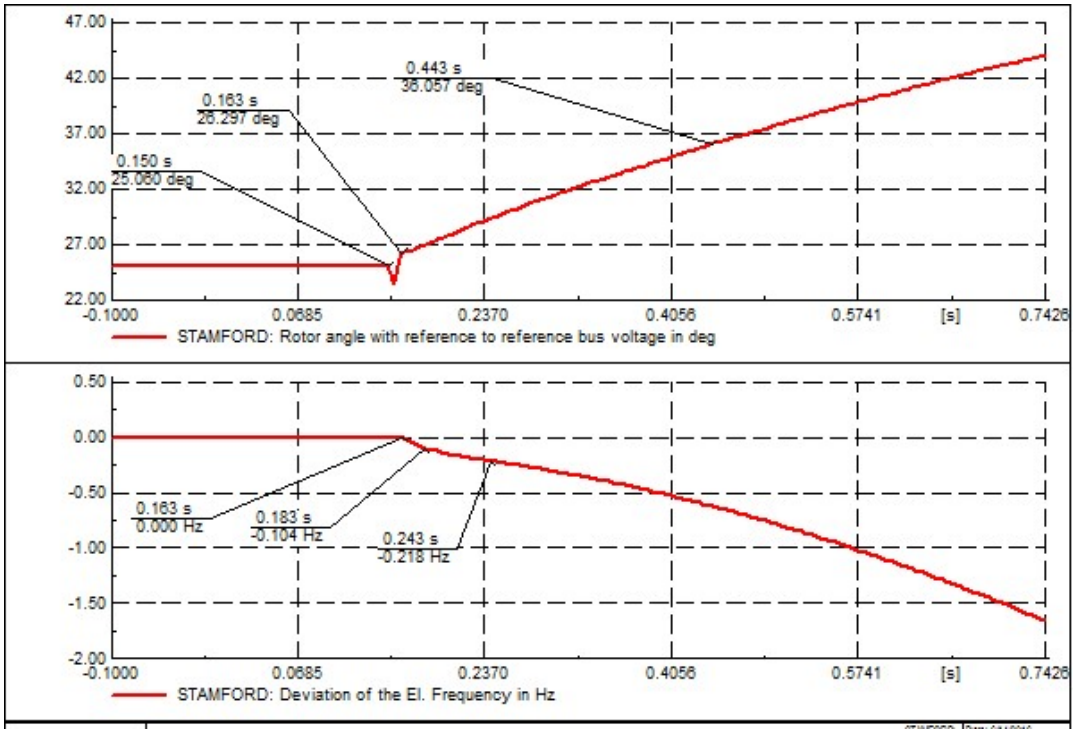
Analiza i simulacija detekcije i zaštite od otočnog pogona u ovom slučaju izvedena je na pomoćnom izvodu. Kako bi se izvela simulacija, postavljena je najveća djelatna snaga na generatoru te najmanje opterećenje na pojedinim opterećenjima na pomoćnom izvodu. Sva tri generatora proizvode zajedno $\sum P_{Gmax} = 1{,}2$ MW djelatne snage, s time da svaki proizvodi $P_G = 0{,}4$ MW. Najmanje opterećenje pomoćnog izvoda podešeno je na $\sum P_{Lmin} = 0{,}318$ MW na opterećenjima Load ,4,5,14 koji su smješteni na pomoćnom izvodu. Ukupno opterećenje na svim izvodima je $\sum P_L = 1{,}75$ MW. Kako bi se prikazala promjena generatorske frekvencije i kuta rotora, glavni vod je isključen u trenutku t = 150 ms na trafostanici 2-Winding Transformer (17) 110/30 kV - B prikazanoj na Sl 4.11. Simulacija je promatrana do vremena t = 750 ms te su u tom vremenskom periodu dani sljedeći grafovi funkcija.



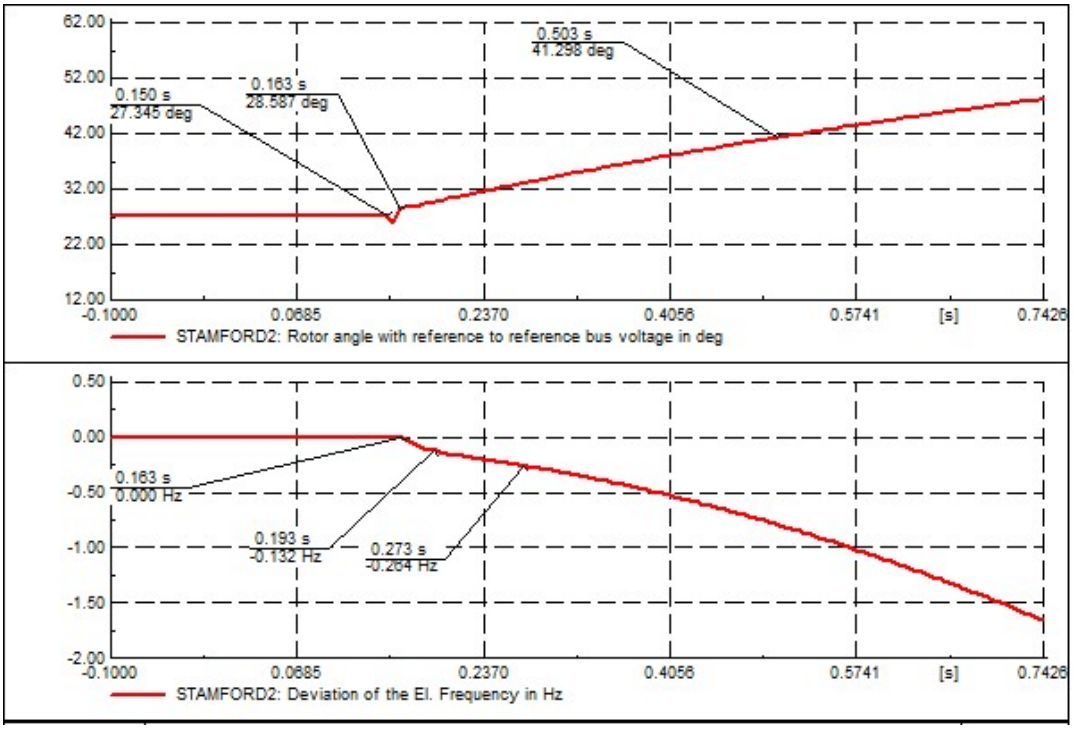
Sl.4.10. Prikaz promijenjenih opterećenja Load,4,5,14



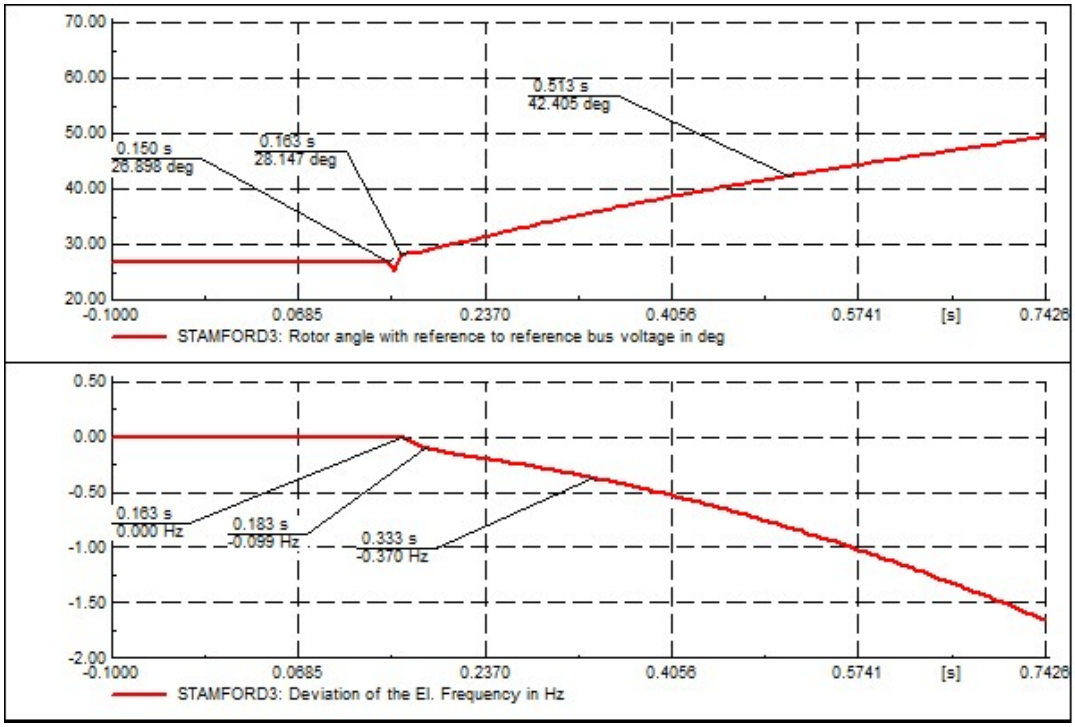
Sl.4.11. Prikaz isključenog transformatora nakon t = 150 ms



Sl.4.12. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 1



Sl.4.13. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 2



Sl.4.14. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 3

Tab. 4.11. Prikaz izračuna brzine promjene frekvencije generatora u točki 1

	Vrijeme u t_1[s]	Δt_1[s]	Δf_1[Hz]	$\Delta f_1/\Delta t_1$[Hz/s]	Prorada releja
Generator 1	0,183	0,033	0,104	3,15	da
Generator 2	0,193	0,043	0,132	3.07	da
Generator 3	0,183	0,033	0,099	3	da

Tab. 4.12. Prikaz izračuna brzine promjene frekvencije generatora u točki 2

	Vrijeme u t_2[s]	Δt_2[s]	Δf_2[Hz]	$\Delta f_2/\Delta t_2$[Hz/s]	Prorada releja
Generator 1	0,243	0,093	0,218/	2,34	da
Generator 2	0,273	0,123	0,264	2,14	da
Generator 3	0,333	0,183	0,370	2,02	da

Prema izračunima u sva tri generatora vidljivo je da su brzine promjene frekvencije veće od 0,2 Hz/s tako da bi zaštita reagirala. Nakon isključenja krute mreže graf frekvencije naglo

pada te se nakon naglog propada pretvara u linearnu funkciju. Uzimajući u obzir prvu točku izračuna i drugu vidljivo je da je najveća promjena na početku, tj. u prvoj točki nastanka promjene.

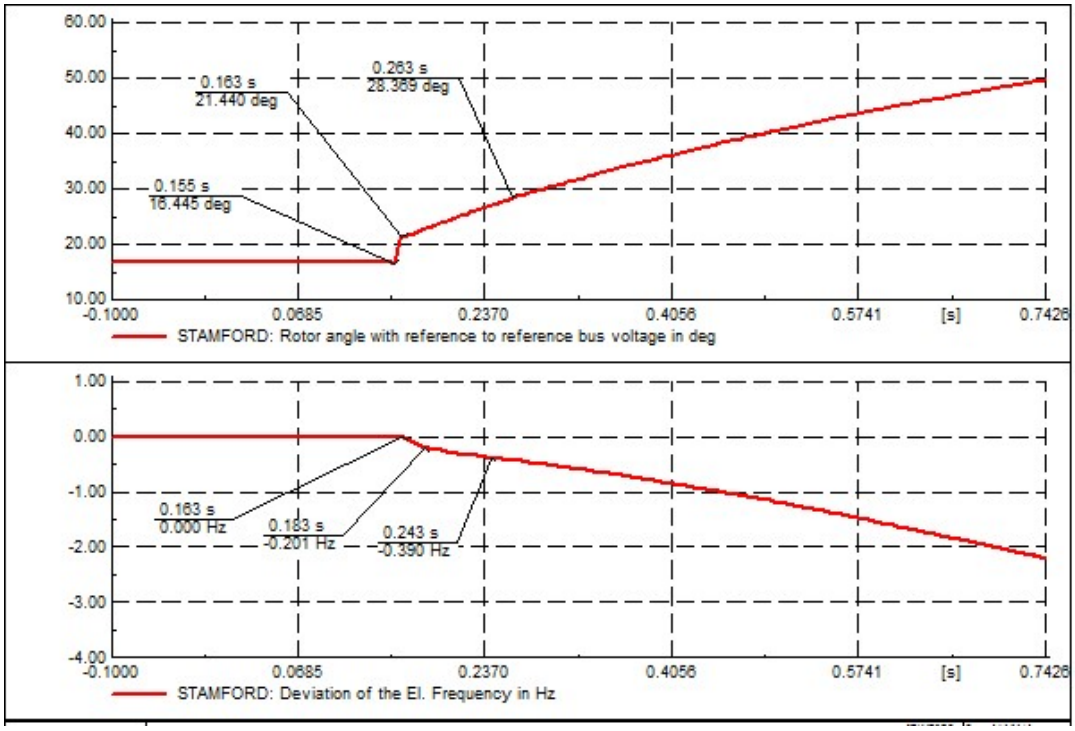
Tab. 4.13. Prikaz promjene kuta rotora u odnosu na kut napon referentne sabirnice

	Točka 1	Točka 2	Točka 3	Prorada releja
Generator 1	25,060°	26,297°	36,057°	da
Generator 2	27,345°	28,587°	41,298°	da
Generator 3	26,898°	28,147°	42,405°	da

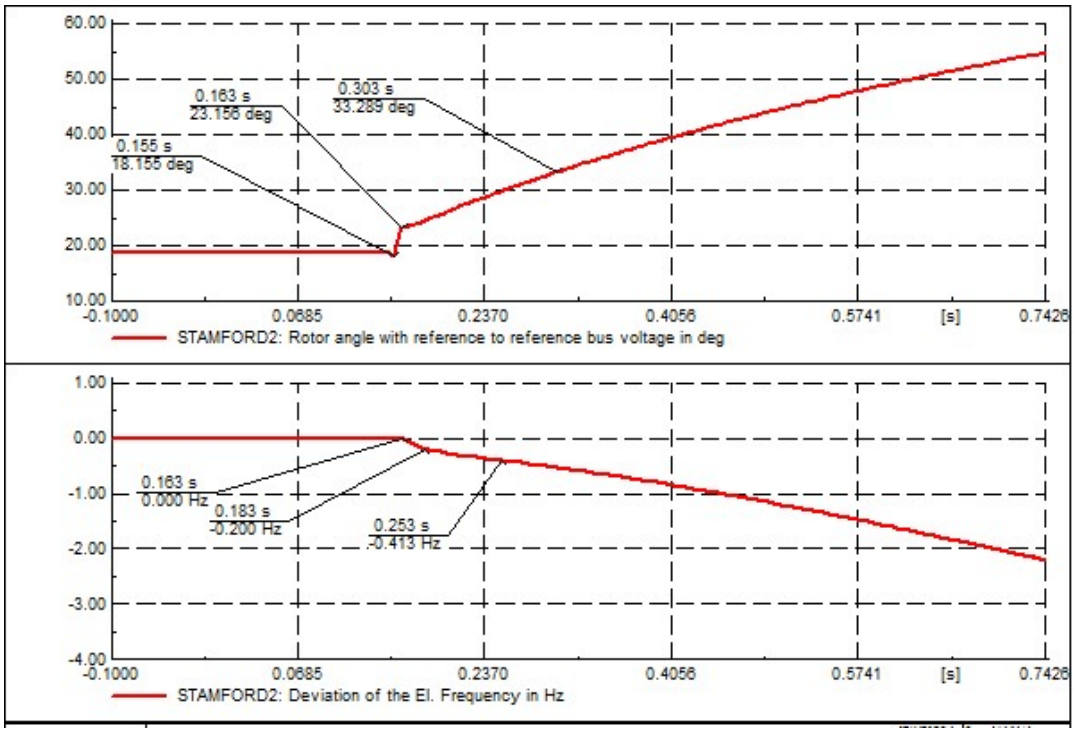
Prikazom u Tab. 4.13. vidljivo je da je promjena kuta rotora u svim slučajevima veća od 7° te bi tako i zaštita reagirala.

4.3.2. Analiza i simulacija na pomoćnom izvodu s najmanjom proizvodnjom generatora i najvećim opterećenjem izvoda

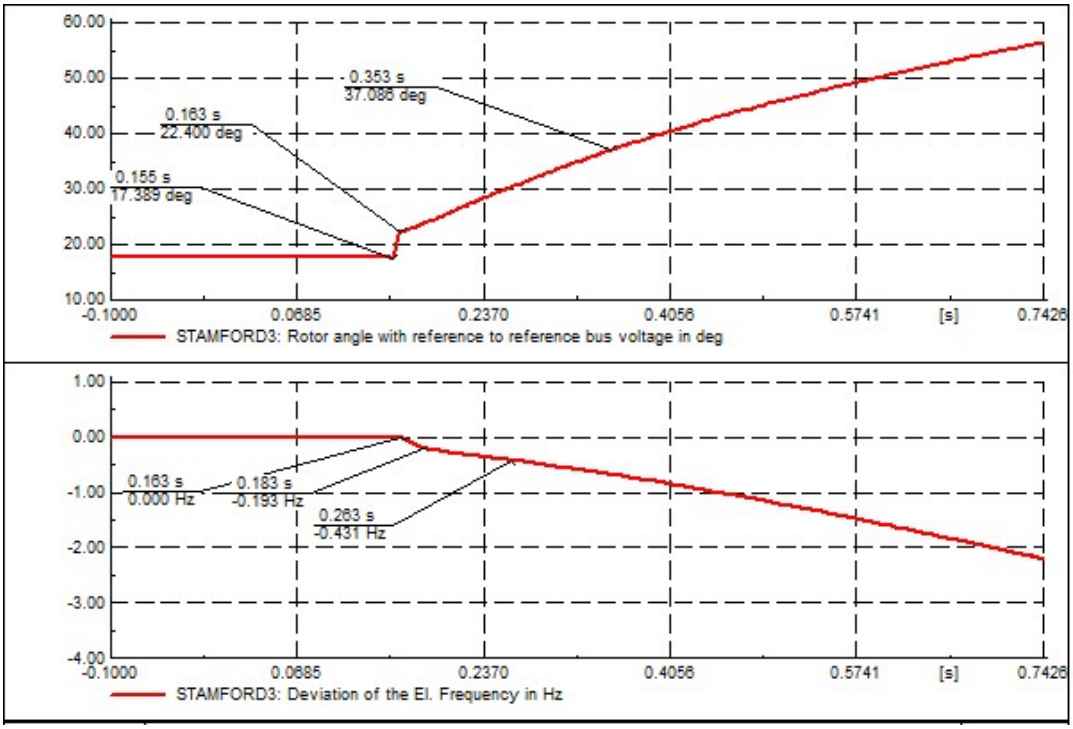
Kako bi se izvela simulacija na pomoćnom izvodu, postavljena je najmanja djelatna snaga na generatoru te najveće opterećenje na pojedinim opterećenjima na pomoćnom izvodu. Sva tri generatora proizvode zajedno $\sum P_{Gmin} = 0{,}78$ MW djelatne snage, s time da svaki proizvodi $P_G = 0{,}26$ MW. Najveće opterećenje pomoćnog izvoda podešeno je na $\sum P_{Lmax} = 0{,}834$MW na opterećenjima Load, 4, 5, 14 koji su smješteni na pomoćnom izvodu. Ukupno opterećenje mreže $\sum P_L = 2.19$ MW. Kako bi se prikazala promjena generatorske frekvencije i kuta rotora, glavni vod je isključen u trenutku t = 150 ms na trafostanici 2-Winding Transformer (17) 110/30 kV - B. Simulacija je promatrana do vremena t = 750 ms te su u tom vremenskom periodu dani sljedeći grafovi funkcija.



Sl.4.15. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 1



Sl.4.16. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 2



Sl.4.17. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 3

Tab. 4.14. Prikaz izračuna brzine promjene frekvencije generatora u točki 1

	Vrijeme u t_1[s]	Δt_1[s]	Δf_1[Hz]	$\Delta f_1/\Delta t_1$[Hz/s]	Prorada releja
Generator 1	0,183	0,033	0,201	6,09	da
Generator 2	0,183	0,033	0,200	6,06	da
Generator 3	0,183	0,033	0,193/	5,85	da

Tab. 4.15. Prikaz izračuna brzine promjene frekvencije generatora u točki 2

	Vrijeme u t_2[s]	Δt_2[s]	Δf_2[Hz]	$\Delta f_2/\Delta t_2$[Hz/s]	Prorada releja
Generator 1	0,243	0,093	0,390	4,19	da
Generator 2	0,253	0,103	0,413	4,01	da
Generator 3	0,263	0,113	0,431	3,81	da

Prikazom te simulacijom i analizom vidljivo je da su u sva tri generatora promjene frekvencije veće od 0,2 Hz/s i to vrijednosti koje se kreću oko 6 Hz/s. Naravno, kako i u svakom slučaju do sada, zaštita će proraditi.

Tab. 4.16. Prikaz promjene kuta rotora u odnosu na kut napon referentne sabirnice

	Točka 1	Točka 2	Točka 3	Prorada releja
Generator 1	16,445°	21,440°	28,369°	da
Generator 2	18,155°	23,156°	33,289°	da
Generator 3	17,389°	22,400°	37,086°	da

Prema Tab. 4.16. vidljivo je da su promjene kuta rotora veće od 7° te će tako zaštita proraditi.

Tab. 4.17. Prikaz svih analiza s ukupnom proizvodnjom generatora i ukupnim opterećenjem izvoda, te prikazom detekcije otočnog pogona

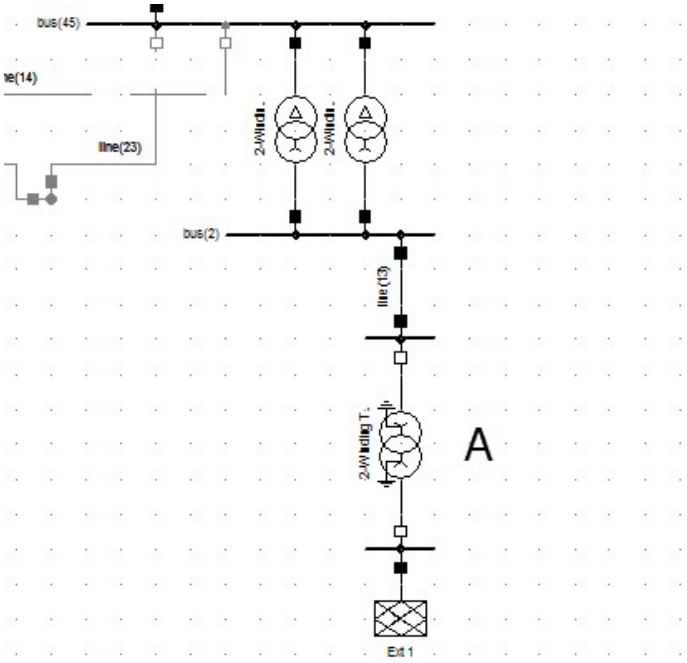
Analize	$\sum P_G$ [MW]	$\sum P_L$ [MW]	Prorada releja prema ROCOF [Hz/s]	Prorada releja prema VS [°]
Analiza 4.2.1. (P_{Gmax}, P_{Lmin})	2,55	1,522	da	da
Analiza 4.2.2. (P_{Gmin}, P_{Lmax})	0,78	1,837	da	da
Analiza 4.3.1. (P_{Gmax}, P_{Lmin})	1,2	1,75	da	da
Analiza 4.3.2. (P_{Gmin}, P_{Lmax})	0,78	2,19	da	da

4.4. Analiza i simulacija ispitivanja detekcije i zaštite od otočnog pogona na glavnom izvodu promjenom opterećenja svih priključenih lateralnih izvoda

Analiza i simulacija detekcije i zaštite od otočnog pogona izvršena je za prvi slučaj na glavnom izvodu. Simulacija se izvodi tako da se u određenom trenutku isključi napajanje krute mreže od ostatka sustava. Vrijeme koje se uzima kao vrijeme isključenja krute mreže na njegovom transformatoru je 150 ms. Kako bi se dobili najpovoljniji rezultati, tj. najveću promjenu brzine frekvencije i promjenu kuta rotora, simulacija se radi za obrnute slučajeve potrošnje i proizvodnje djelatne snage kao u prethodno navedenim slučajevima. Ovi slučajevi su već spomenuti u radu pa su već poznati. Najnepovoljniji je slučaj, kako je opisano u prijašnjem poglavlju, balans snaga između proizvodnje i potrošnje nakon isključenja glavnog izvoda koji su također prikazani. U tom slučaju nakon isključenja glavnog izvoda ne postoji injektiranje djelatne snage iz generatora u mrežu niti obratno.

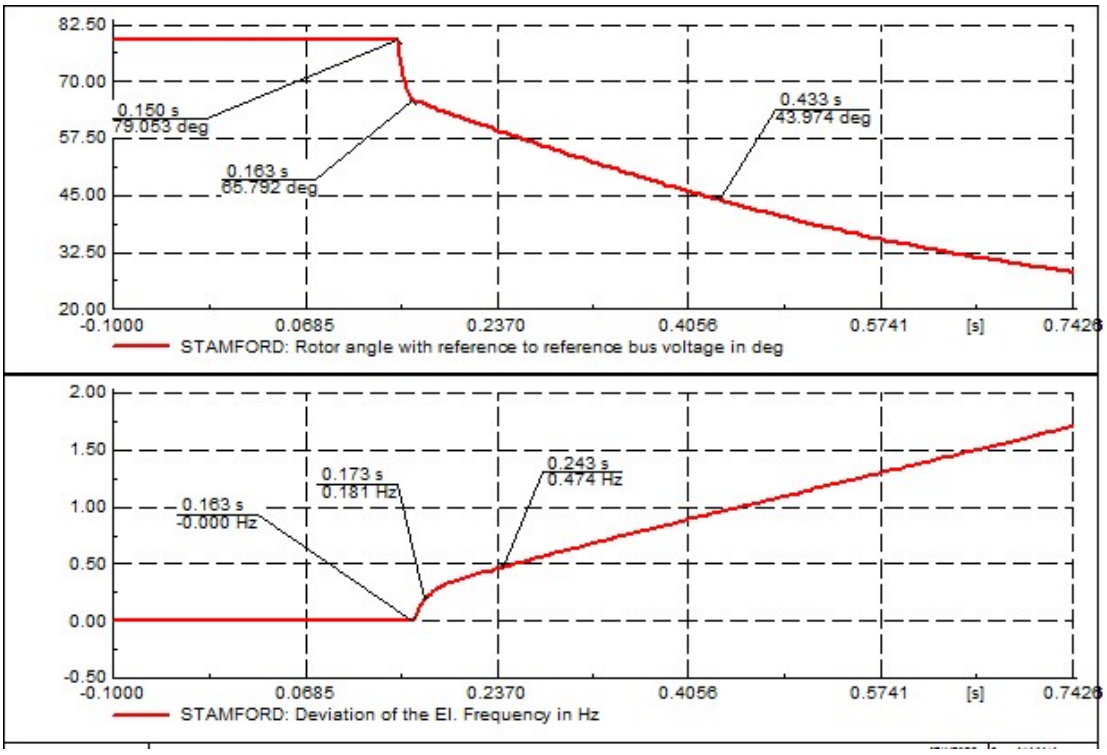
4.4.1. Analiza i simulacija na glavnom izvodu s najvećom proizvodnjom generatora i najmanjim opterećenjem izvoda

Analiza i simulacija detekcije i zaštite od otočnog pogona u ovom slučaju izvedena će biti na glavnom izvodu. Kako bi se izvela simulacija, postavljena je najveća djelatna snaga na generatoru te najmanje opterećenje na svim opterećenjima preko scaling faktora. Scaling faktor podešen je na svim opterećenjima na 0,2 vrijednosti kako bi se dobilo najmanje opterećenje izvoda. Generatori su podešeni da proizvode zajedno $\sum P_{Gmax} = 3$ MW djelatne snage, s time da svaki proizvodi $P_G = 1$ MW. Najmanje opterećenje glavnog izvoda nakon podešenja iznosi $\sum P_{L}min = 0{,}71$ MW. Kako bi se prikazala promjena generatorske frekvencije i kuta rotora, veza s mrežom krutog napona isključen je u trenutku t = 150 ms na trafostanici 2-Winding Transformer (27) 110/30 kV - A prikazanoj na Sl 4.18. Simulacija je promatrana do vremena t = 750 ms te su u tom vremenskom periodu dani sljedeći grafovi funkcija.

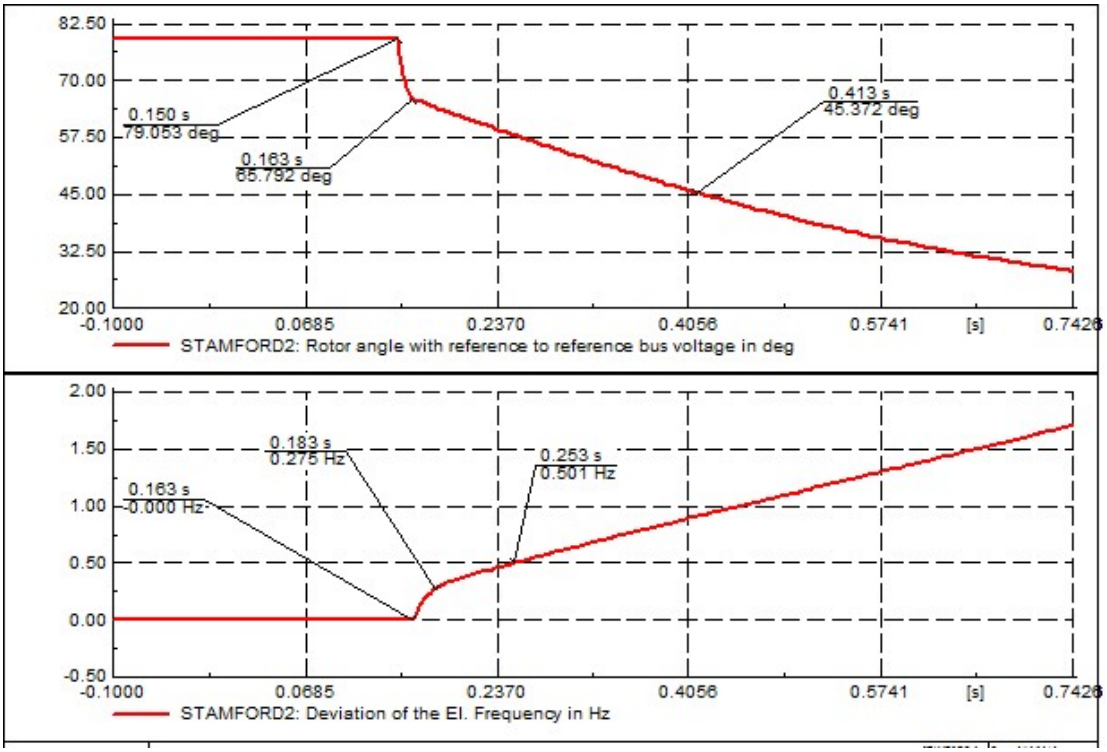


Sl.4.18. Prikaz isključenog transformatora nakon t = 150 ms

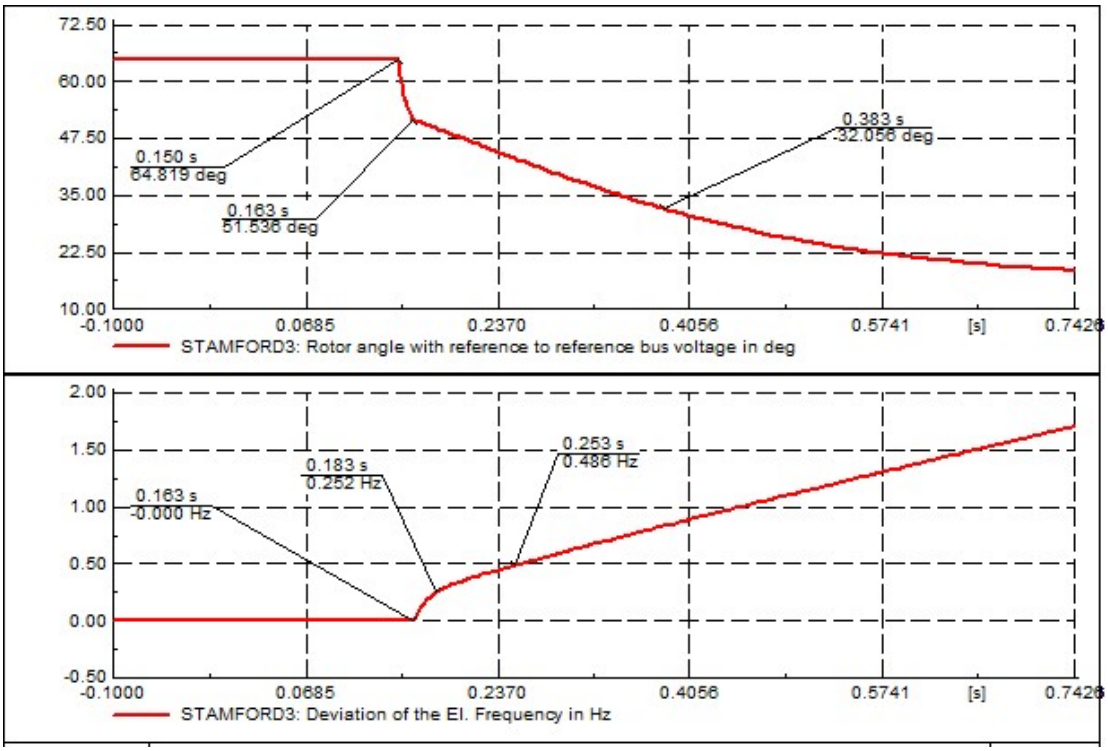
Simulacijom su dobiveni sljedeći grafovi za generator 1,2,3.



Sl.4.19. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 1



Sl.4.20. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 2



Sl.4.21. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 3

Tab. 4.18. Prikaz izračuna brzine promjene frekvencije generatora u točki 1

	Vrijeme u t_1[s]	Δt_1[s]	Δf_1[Hz]	$\Delta f_1/\Delta t_1$[Hz/s]	Prorada releja
Generator 1	0,173	0,023	0,181	7,87	da
Generator 2	0,183	0,033	0,275	8,33	da
Generator 3	0,183	0,033	0,252	7,64	da

Tab. 4.19. Prikaz izračuna brzine promjene frekvencije generatora u točki 2

	Vrijeme u t_2[s]	Δt_2[s]	Δf_2[Hz]	$\Delta f_2/\Delta t_2$[Hz/s]	Prorada releja
Generator 1	0,243	0,093	0,474	5,09	da
Generator 2	0,253	0,103	0,501	4,86	da
Generator 3	0,253	0,103	0,486	4,72	da

Promjena brzine frekvencije na generatorima prikazana je u Tab 4.18. u prvom vremenu t_1, te u Tab 4.19. u drugom vremenu t_2. U prvom i drugom trenutku brzina promjene frekvencije veća je od 0,2 Hz/s te je vidljivo da bi zaštita proradila. Preko prikaza funkcija za identifikaciju frekvencije vidljivo je da se grafovi u sva 3 generatora ponašaju identično. tj. nakon nastanka poremećaja u sustavu, prouzrokovanih isključenjem glavnog voda, funkcije skokovito rastu. Nakon skokovite promjene funkcije se stabiliziraju te postaju linearne.

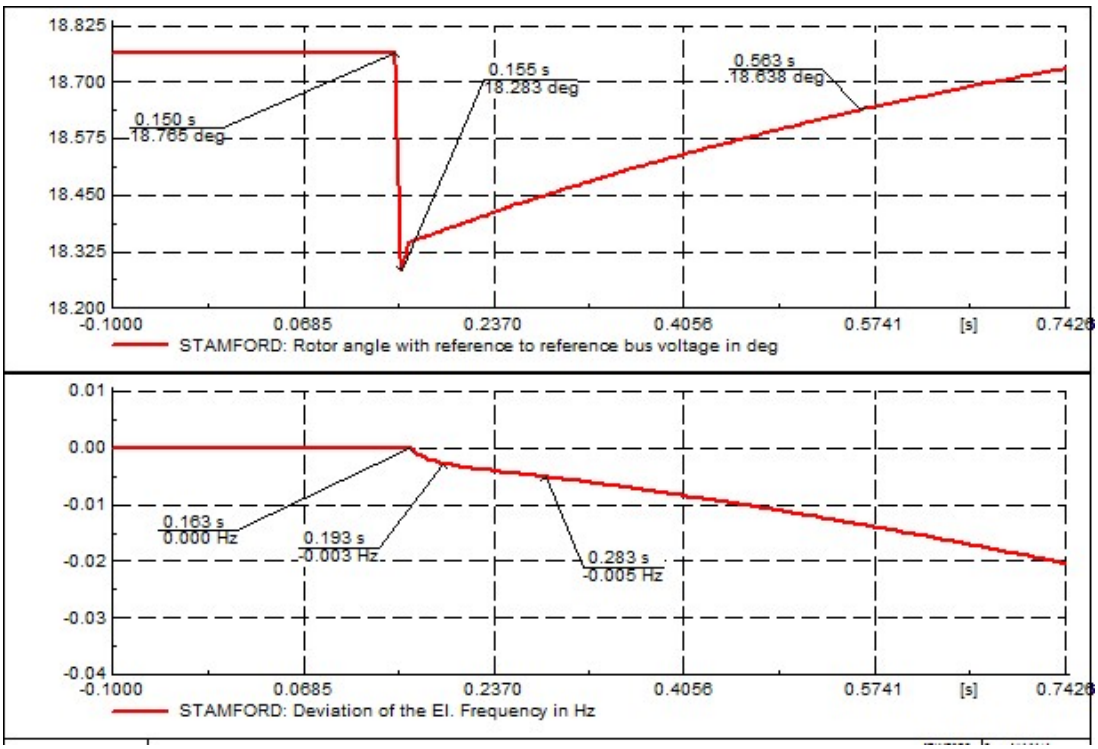
Tab. 4.20. Prikaz promjene kuta rotora u odnosu na kut napon referentne sabirnice

	Točka 1	Točka 2	Točka 3	Prorada releja
Generator 1	79,053°	65,792°	43,974°	da
Generator 2	79,053°	65,792°	45,372°	da
Generator 3	64,819°	51,536°	32,056°	da

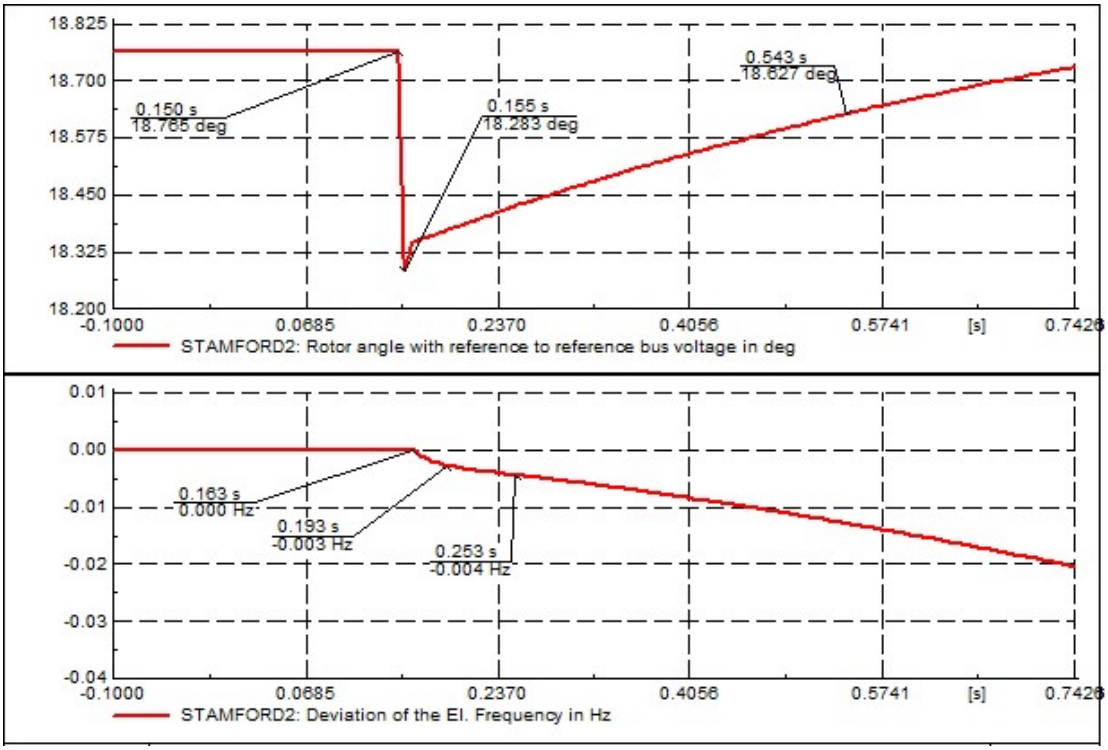
Prema prikazu Tab 4.20. vidljivo je da se kut rotora pojedinačnog generatora kreće u sličnim vrijednostima. Kako bi zaštita proradila i detektirala promjenu, promjena kuta mora biti veća od 7° jer je to najmanji prag prorade da koju relej reagira. Prema grafovima svih generatora vidljivo je da je promjena mnogo veća od 7° te će tako i zaštita reagirati. Funkcije nakon nastanka poremećaja skokovito padaju te nakon nekog vremena prelaze u linearnu funkciju.

4.4.2. Analiza i simulacija na glavnom izvodu s balansom proizvodnje generatora i potrošnje izvoda

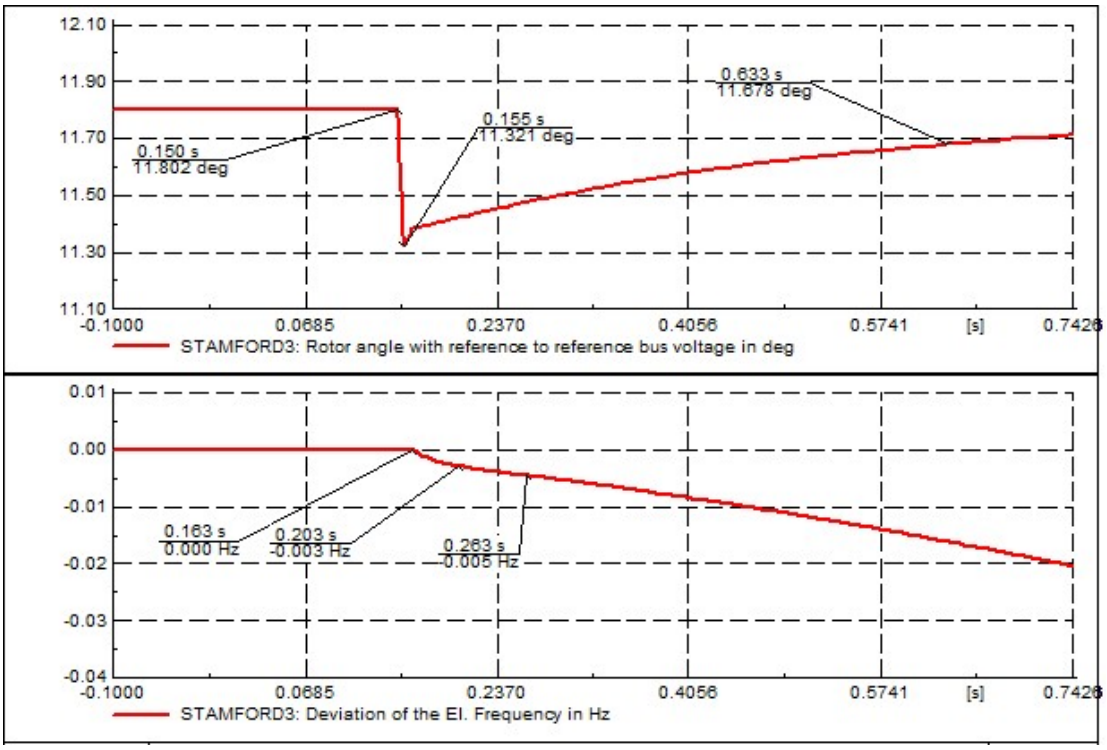
Za ovaj slučaj analize i simulacije izvršen će biti balans djelatnih snaga na generatoru i na izvodima. Zadana djelatna snaga preko scaling faktora je na 0,2 vrijednosti i iznosi $\sum P_L =$ 0,71 MW. Kako bi se dobio balans te vidio načini ponašanja generatorskih funkcija, ukupna vrijednost isporučene snage generatora podešava se na $\sum P_G = 0{,}71$ MW. Kako i u prijašnjim simulacijama, vremena isključenja i trajanja simulacije su jednaka. Kako bi se prikazala promjena generatorske frekvencije i kuta rotora, glavni vod isključen je u trenutku t = 150 ms na trafostanici 2-Winding Transformer (27) 110/30 kV - A. Simulacija je promatrana do vremena t = 750 ms te su u tom vremenskom periodu dani sljedeći grafovi funkcija.



Sl.4.22. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 1



Sl.4.23. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 2



Sl.4.24. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 3

Tab. 4.21. Prikaz izračuna brzine promjene frekvencije generatora u točki 1

	Vrijeme u t_1[s]	Δt_1[s]	Δf_1[Hz]	$\Delta f_1/\Delta t_1$[Hz/s]	Prorada releja
Generator 1	0,193	0,043	0,003	0,07	ne
Generator 2	0,193	0,043	0,003	0,07	ne
Generator 3	0,203	0,053	0,005	0,09	ne

Tab. 4.22. Prikaz izračuna brzine promjene frekvencije generatora u točki 2

	Vrijeme u t_2[s]	Δt_2[s]	Δf_2[Hz]	$\Delta f_2/\Delta t_2$[Hz/s]	Prorada releja
Generator 1	0,283	0,133	0,005	0,04	ne
Generator 2	0.253	0,103	0,004	0,04	ne
Generator 3	0.263	0,113	0,005	0,04	ne

Prema simulaciji u trenutku balansa potrošnje i proizvodnje vidljivo je da se vrijednosti promjene frekvencije generatora kreću oko 0,08 Hz/s. Zbog male promjene uzrokovane balansom relej neće reagirati te će sustav nastaviti s radom u otočnom pogonu.

Tab. 4.23. Prikaz promjene kuta rotora u odnosu na kut napon referentne sabirnice

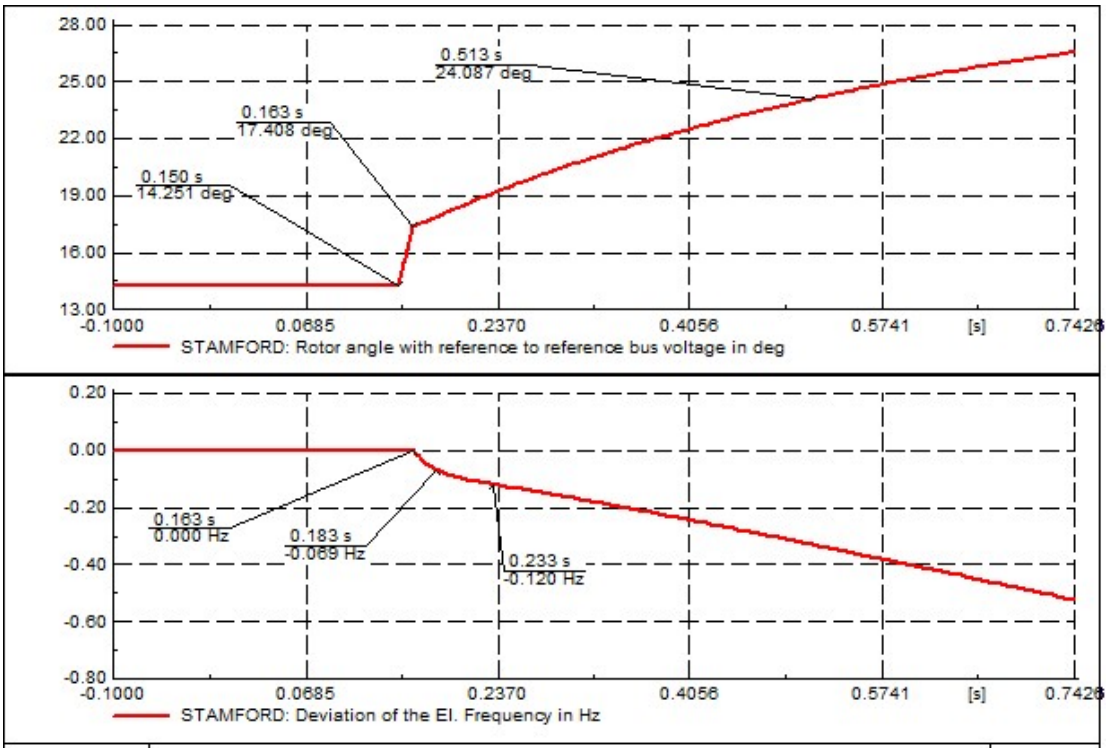
	Točka 1	Točka 2	Točka 3	Prorada releja
Generator 1	18,765°	18,283°	18,638°	ne
Generator 2	18,765°	18,283°	18,627°	ne
Generator 3	11,802°	11,321°	11,678°	ne

Kutovi rotora na sva tri generatora ne prelaze 1°. Vidljivo je da balans također ne utječe na detekciju zaštite te tako zaštita neće reagirati. Može se reći da su u trenutku balansa promjene vrlo male i ne utječu na karakteristike na generatorima.

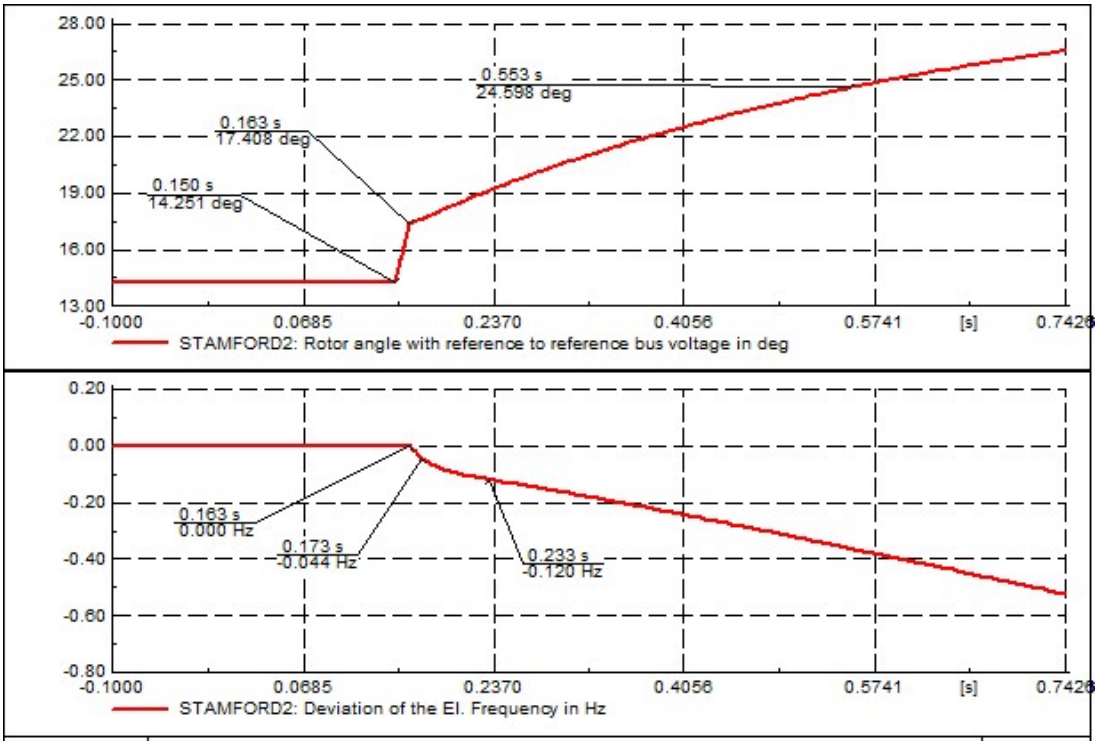
4.4.3. Analiza i simulacija na glavnom izvodu s najmanjom proizvodnjom generatora i najvećim opterećenjem izvoda

Analiza i simulacija detekcije i zaštite od otočnog pogona u ovom slučaju izvest će se na glavnom izvodu. Kako bi se izvela simulacija, postavljena je najmanja djelatna snaga na generatoru te najveće opterećenje na svim opterećenjima preko scaling factora. Scaling faktor podešen je na svim opterećenjima na 1 kako bi se dobilo najveće opterećenje izvoda. Sva tri generatora proizvode zajedno $\sum P_{Gmin} = 0{,}75$ MW djelatne snage, s time da svaki proizvodi $P_G = 0{,}25$ MW. Najveće opterećenje glavnog izvoda podešeno je na $\sum P_{Lmax} = 1{,}34$ MW na svim opterećenjima. Kako bi se prikazala promjena generatorske frekvencije i kuta rotora, glavni vod isključen je u trenutku t = 150 ms na trafostanici 2-Winding Transformer (27) 110/30 kV - A. Simulacija je promatrana do vremena t = 750 ms te su u tom vremenskom periodu dani sljedeći grafovi funkcija.

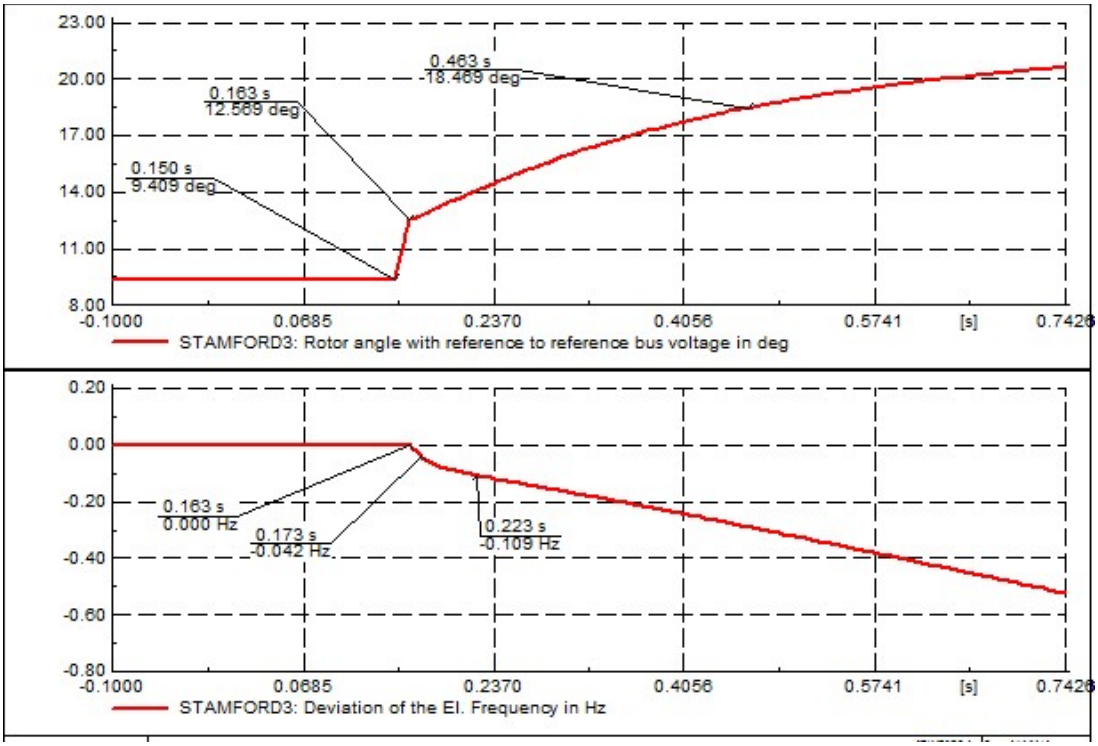
Grafovi su prikazani sljedećim slikama za sva 3 generatora.



Sl.4.25. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 1



Sl.4.26. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 2



Sl.4.27. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 3

Tab. 4.24. Prikaz izračuna brzine promjene frekvencije generatora u točki 1

	Vrijeme u t_1[s]	Δt_1[s]	Δf_1[Hz]	$\Delta f_1/\Delta t_1$[Hz/s]	Prorada releja
Generator 1	0,183	0,033	0,069	2,09	da
Generator 2	0,173	0,023	0,044	1,91	da
Generator 3	0,173	0,023	0,042	1,83	da

Tab. 4.25. Prikaz izračuna brzine promjene frekvencije generatora u točki 2

	Vrijeme u t_2[s]	Δt_2[s]	Δf_2[Hz]	$\Delta f_2/\Delta t_2$[Hz/s]	Prorada releja
Generator 1	0,233	0,083	0,120	1,44	da
Generator 2	0,233	0,083	0,120	1,44	da
Generator 3	0,223	0,073	0,109	1,49	da

Promjena brzine frekvencije na generatorima prikazana je u Tab 4.24. u prvom vremenu t_1, te u Tab 4.25. u drugom vremenu t_2. U prvom i drugom trenutku brzina promjene frekvencije veća je od 0,2 Hz/s te je vidljivo da bi zaštita proradila. Preko prikaza funkcija za identifikaciju frekvencije vidljivo je da se grafovi u sva 3 generatora ponašaju identično, tj. nakon nastanka poremećaja u sustavu, prouzrokovanih isključenjem glavnog voda, funkcije skokovito padaju. Nakon skokovite promjene funkcije se stabiliziraju te postaju linearne.

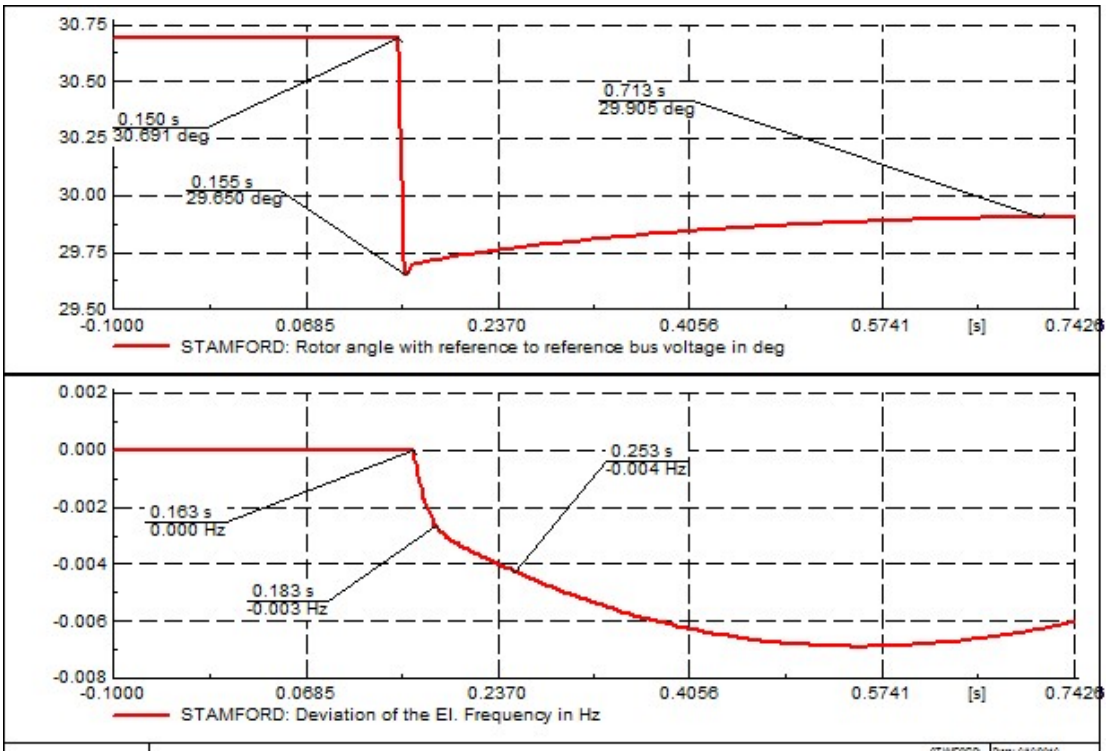
Tab. 4.26. Prikaz promjene kuta rotora u odnosu na kut napon referentne sabirnice

	Točka 1	Točka 2	Točka 3	Prorada releja
Generator 1	14,251°	17,408°	24,087°	da
Generator 2	14,251°	17,408°	24,598°	da
Generator 3	9,409°	12,569°	18,469°	da

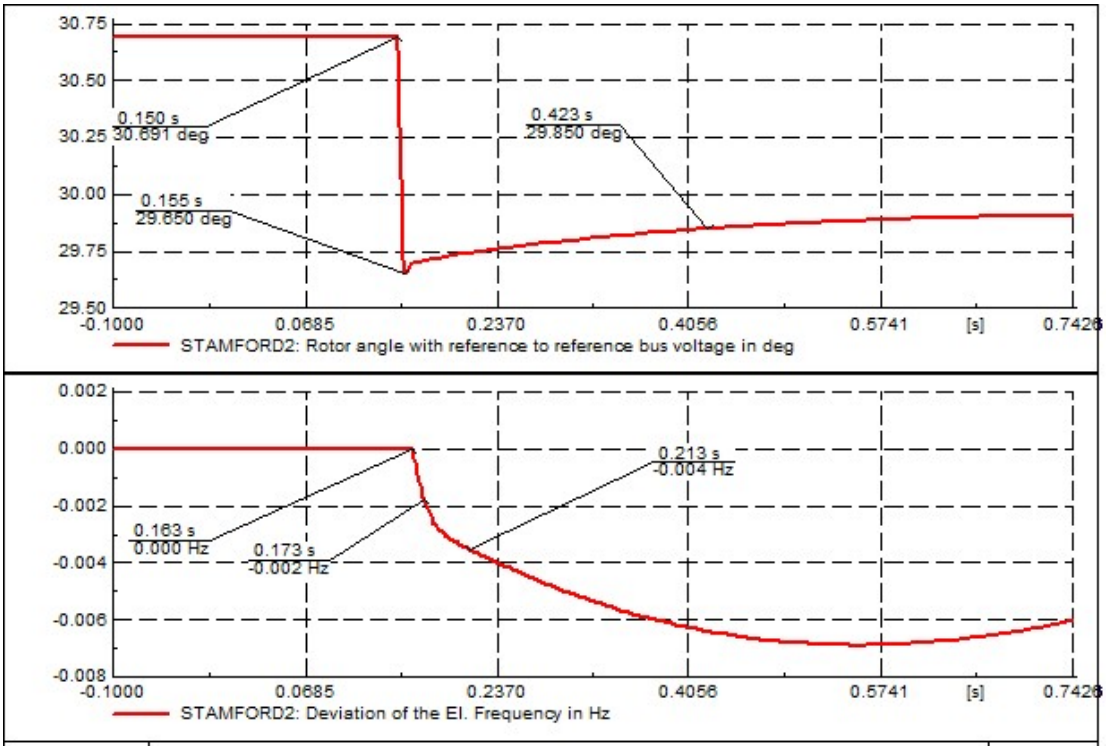
Prema prikazu Tab 4.26. vidljivo je da se kut rotora svih generatora kreće u sličnim vrijednostima. Kako bi zaštita proradila i detektirala promjenu, promjena kuta mora biti veća od 7° jer je to najmanji prag prorade na koju relej reagira. Prema grafovima svih generatora vidljivo je da je promjena mnogo veća od 7° te će tako i zaštita reagirati. Funkcije nakon nastanka poremećaja skokovito rastu te nakon nekog vremena prelaze u linearnu funkciju.

4.4.4. Analiza i simulacija na glavnom izvodu s balansom proizvodnje generatora i potrošnje izvoda

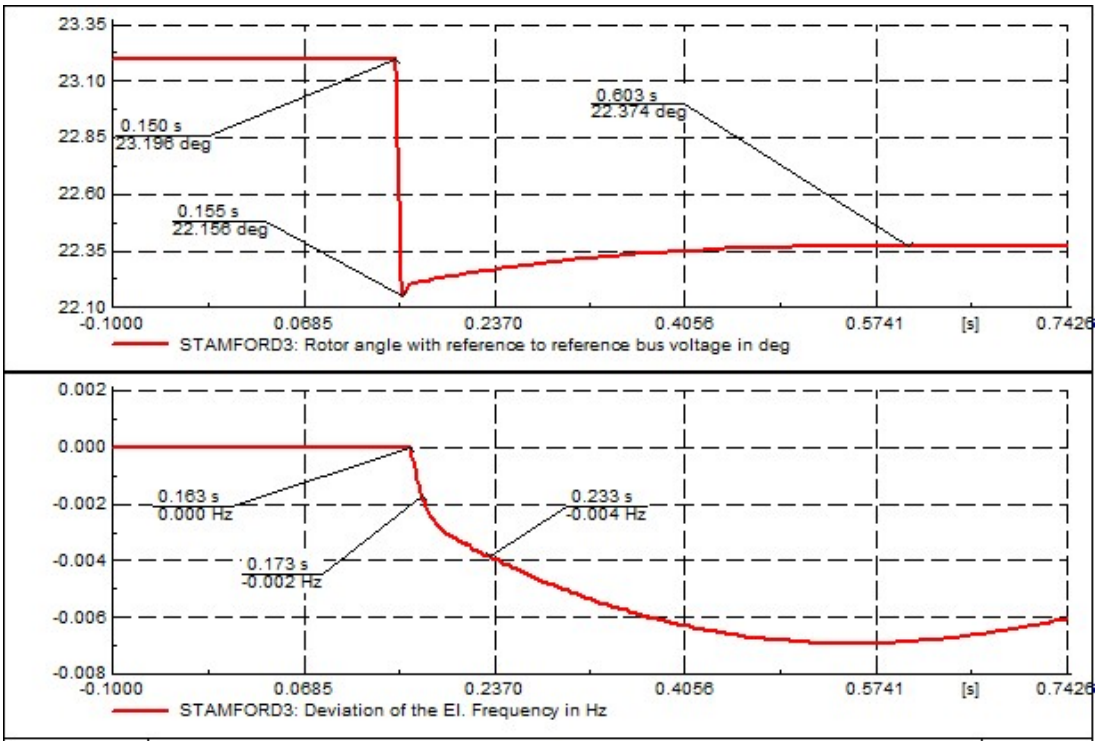
Analiza i simulacija detekcije i zaštite od otočnog pogona u ovom slučaju izvest će se na glavnom izvodu. Kako bi se izvela simulacija s balansom između proizvodnje i potrošnje, postavljene su iste djelatne snage na generatoru te na opterećenjima, na svim opterećenjima preko scaling factora. Scaling faktor podešen je na svim opterećenjima na 1 kako bi se dobilo najveće opterećenje izvoda. Sva tri generatora postavljena su prema snazi opterećenja na $\sum P_G$ = 1,34 MW djelatne snage, s time da svaki proizvodi P_G = 0,446 MW. Opterećenje glavnog izvoda podesili smo na $\sum P_L$ = 1,34 MW. Kako bi se prikazala promjena generatorske frekvencije i kuta rotora, glavni vod isključen je u trenutku t = 150 ms na trafostanici 2-Winding Transformer (27) 110/30 kV - A. Simulacija je promatrana do vremena t = 750 ms te su u tom vremenskom periodu dani sljedeći grafovi funkcija.



Sl.4.28. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 1



Sl.4.29. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 2



Sl.4.30. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 3

Tab. 4.27. Prikaz izračuna brzine promjene frekvencije generatora u točki 1

	Vrijeme u t_1[s]	Δt_1[s]	Δf_1[Hz]	$\Delta f_1/\Delta t_1$[Hz/s]	Prorada releja
Generator 1	0,183	0,033	0,003	0,09	ne
Generator 2	0,173	0,023	0,002	0,08	ne
Generator 3	0,173	0,023	0,002	0,08	ne

Tab. 4.28. Prikaz izračuna brzine promjene frekvencije generatora u točki 2

	Vrijeme u t_2[s]	Δt_2[s]	Δf_2[Hz]	$\Delta f_2/\Delta t_2$[Hz/s]	Prorada releja
Generator 1	0,253	0,103	0,004	0,04	ne
Generator 2	0,213	0,063	0,004	0,06	ne
Generator 3	0,233	0,083	0,004	0,04	ne

Simulacije su slične kao i kod balansa sa scaling faktorom od 0,2 prikazanog u prethodnoj simulaciji kod najmanjeg opterećenja izvoda i najveće proizvodnje generatora. Vidljivo je da zaštita neće reagirati ako je u bilo kojem slučaju postoji balans snaga.

Tab. 4.29. Prikaz promjene kuta rotora u odnosu na kut napon referentne sabirnice

	Točka 1	Točka 2	Točka 3	Prorada releja
Generator 1	30,691°	29,650°	29,905°	ne
Generator 2	30,691°	29,650°	29,850°	ne
Generator 3	23,196°	22,156°	22,374°	ne

Kako je objašnjeno za promjenu frekvencije generatora, tako je i kod promjene kuta rotora. Zaštita neće reagirati ako se radi o bilom kojem balansu snaga između potrošnje i proizvodnje.

Tab. 4.30. Prikaz svih analiza s ukupnom proizvodnjom generatora i ukupnim opterećenjem izvoda, te prikazom detekcije otočnog pogona

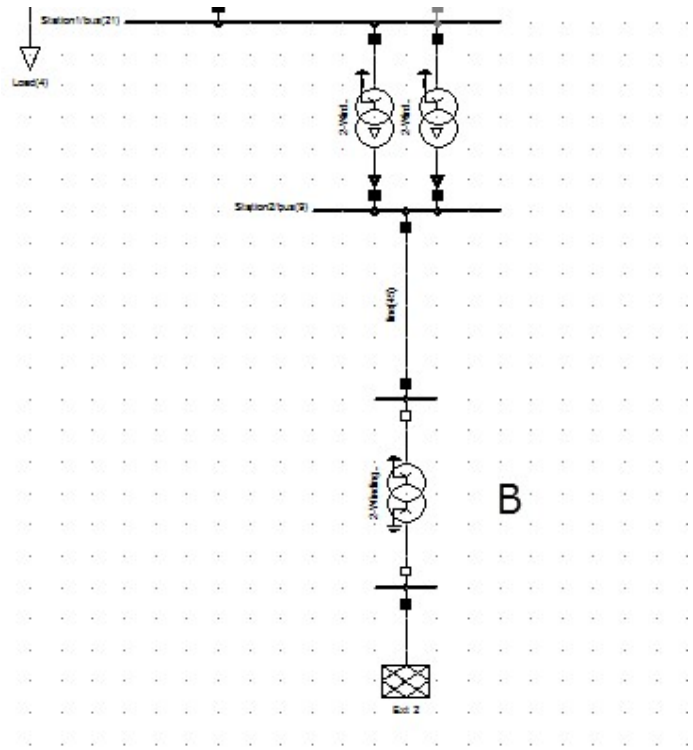
Analize	$\sum P_G$ [MW]	$\sum P_L$ [MW]	Prorada releja prema ROCOF [Hz/s]	Prorada releja prema VS [°]
Analiza 4.4.1. (P_{Gmax}, P_{Lmin})	3	0,71	da	da
Analiza 4.4.2. ($P_G = P_{Lmin}$)	0,71	0,71	ne	ne
Analiza 4.4.3. (P_{Gmin}, P_{Lmax})	0,75	1,34	da	da
Analiza 4.4.4. ($P_G = P_{Lmax}$)	1,34	1,34	ne	ne

4.5. Analiza i simulacija ispitivanja detekcije i zaštite od otočnog pogona na pomoćnom izvodu promjenom opterećenja svih priključenih lateralnih izvoda

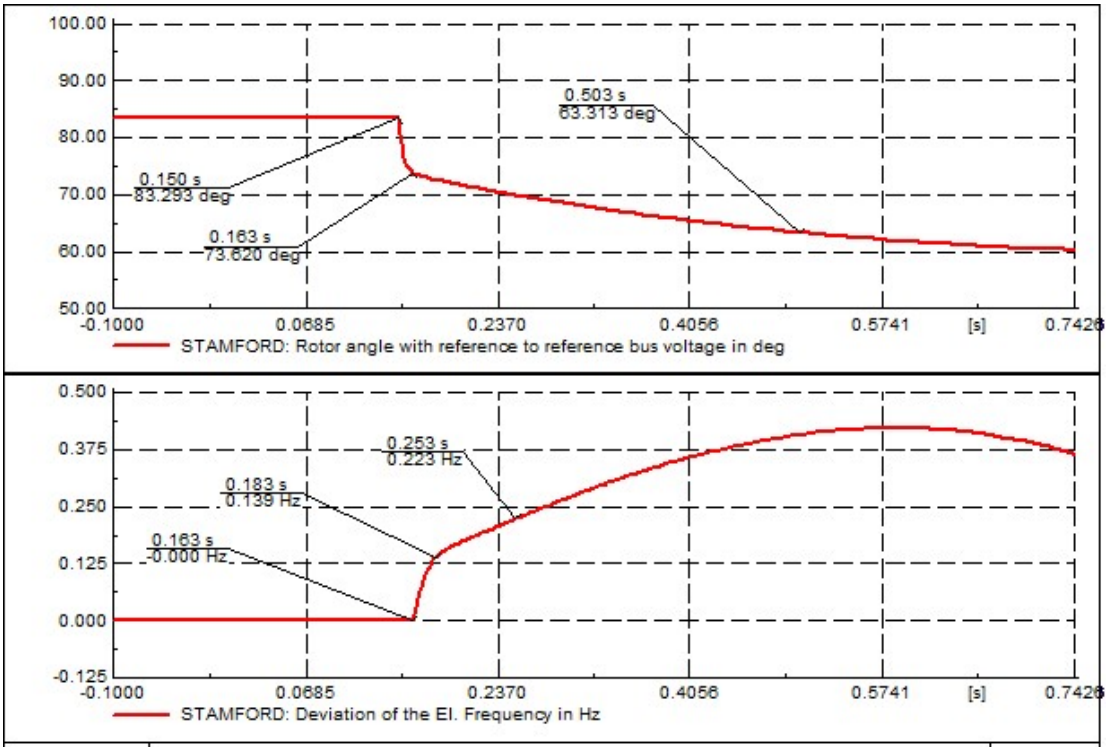
Analiza i simulacija detekcije i zaštite od otočnog pogona u ovom slučaju izvršiti će se na pomoćnom izvodu. Simulacija se izvodi kao kod prikaza simulacija na glavnom izvodu. Vrijeme koje se uzima kao vrijeme isključenja krute mreže ostaje isto kao u prethodnim simulacijama. Prvotno se simulacija radi za obrnute slučajeve potrošnje i proizvodnje djelatne snage. Dodatno je stvoren balans između proizvodnje generatora i potrošnje izvoda kao kod glavnog izvoda.

4.5.1. Analiza i simulacija na pomoćnom izvodu s najvećom proizvodnjom generatora i najmanjim opterećenjem izvoda

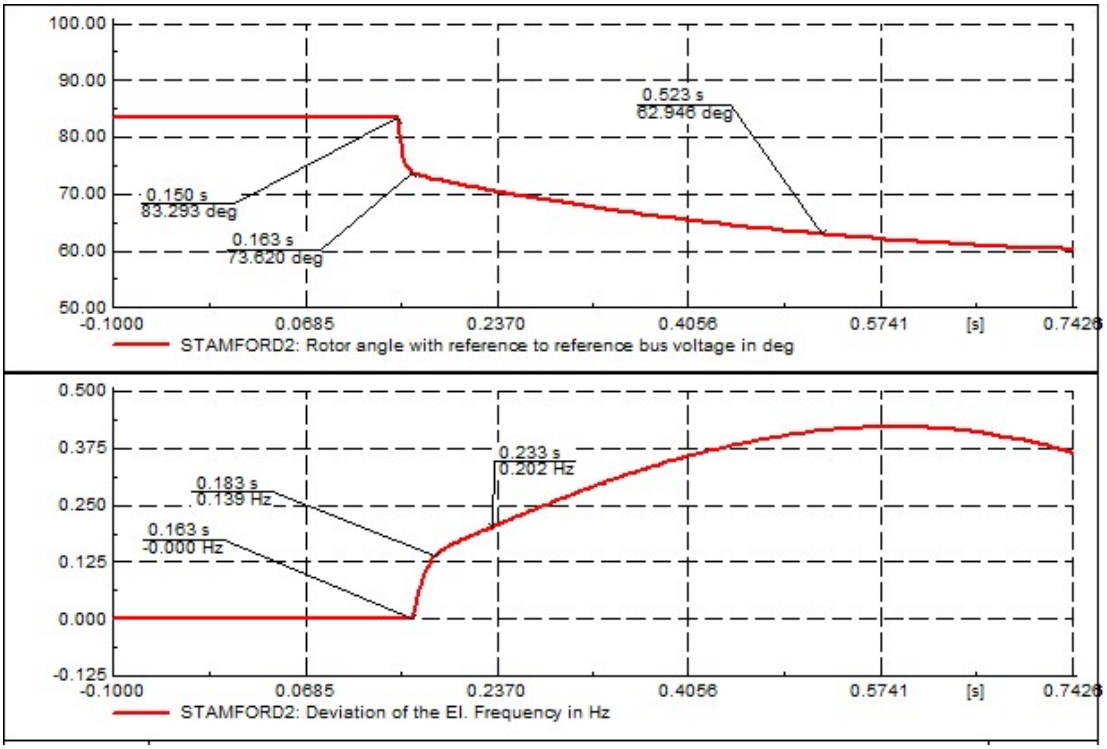
Analiza i simulacija detekcije i zaštite od otočnog pogona u ovom slučaju izvest će se na pomoćnom izvodu. Kako bi se izvela simulacija, postavljena je najveća djelatna snaga na generatorima te najmanje opterećenje na pomoćnom izvodu preko scaling faktora. Scaling faktor postavljen je na 0,2 vrijednosti na svim opterećenjima. Sva tri generatora proizvode zajedno $\sum P_{Gmax} = 2{,}4$ MW djelatne snage, s time da svaki proizvodi $P_G = 0{,}8$ MW. Najmanje opterećenje glavnog izvoda postavljen je na $\sum P_{Lmin} = 0{,}37$ MW. Kako bi se prikazala promjena generatorske frekvencije i kuta rotora, pomoćni vod isključen je u trenutku t = 150 ms na trafostanici 2-Winding Transformer (17) 110/30 kV - B prikazanoj na Sl 4.31. Simulacija je promatrana do vremena t = 750 ms te su u tom vremenskom periodu dani sljedeći grafovi funkcija.



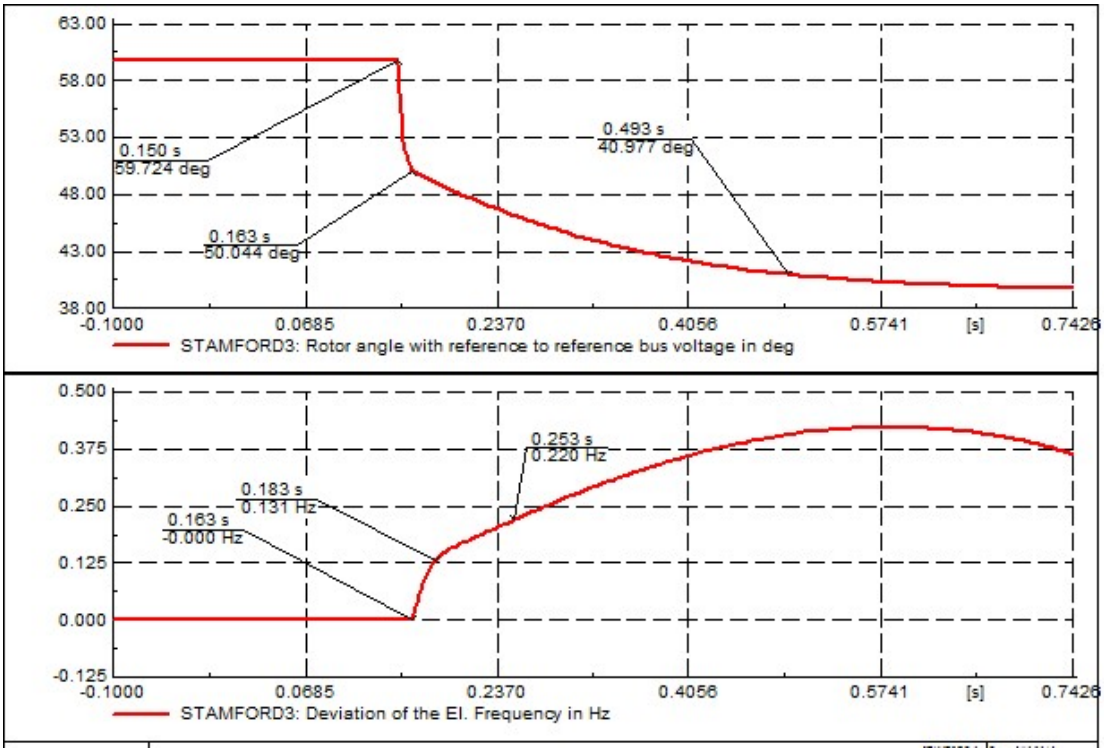
Sl.4.31. Prikaz isključenog transformatora nakon t = 150 ms



Sl.4.32. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 1



Sl.4.33. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 2



Sl.4.34. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 3

Tab. 4.31. Prikaz izračuna brzine promjene frekvencije generatora u točki 1

	Vrijeme u t_1[s]	Δt_1[s]	Δf_1[Hz]	$\Delta f_1/\Delta t_1$[Hz/s]	Prorada releja
Generator 1	0,183	0,033	0,139	4,21	da
Generator 2	0,183	0,033	0,139	4,21	da
Generator 3	0,183	0,033	0,131	3,96	da

Tab. 4.32. Prikaz izračuna brzine promjene frekvencije generatora u točki 2

	Vrijeme u t_2[s]	Δt_2[s]	Δf_2[Hz]	$\Delta f_2/\Delta t_2$[Hz/s]	Prorada releja
Generator 1	0,253	0,103	0,223	2,16	da
Generator 2	0.233	0,083	0,202	2,43	da
Generator 3	0,253	0,103	0,220	2,13	da

Promjenom, tj. isključenjem pomoćnog voda u vremenu 150 ms vidljive su promjene u frekvenciji. Prema grafovima, na sva tri generatora promjena brzine frekvencije se kreće u

vrijednostima oko 4 Hz/s u prvoj točki te oko 2 Hz/s u drugoj točki mjerenja. Vidljivo je iz izračuna da će zaštita detektirati promjenu stanja te će tako i uključiti zaštitu.

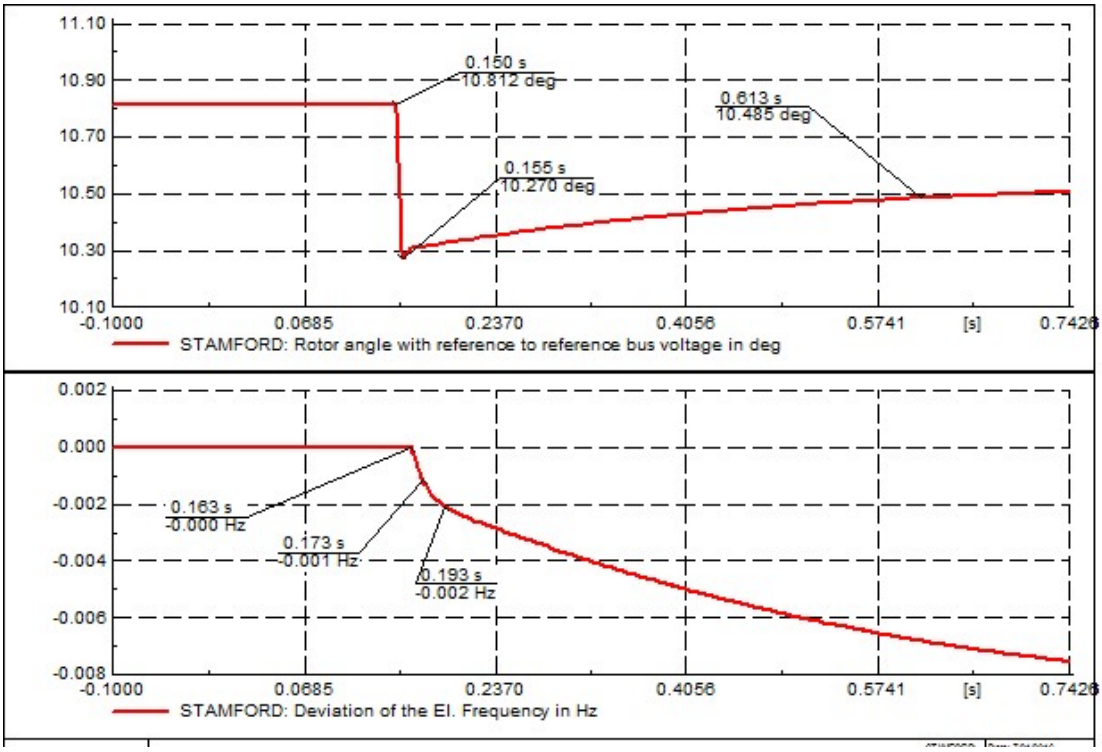
Tab. 4.33. Prikaz promjene kuta rotora u odnosu na kut napon referentne sabirnice

	Točka 1	Točka 2	Točka 3	Prorada releja
Generator 1	83,293°	73,620°	63,313°	da
Generator 2	83,293°	73,620°	62,946°	da
Generator 3	59,724°	50,044°	40,977°	da

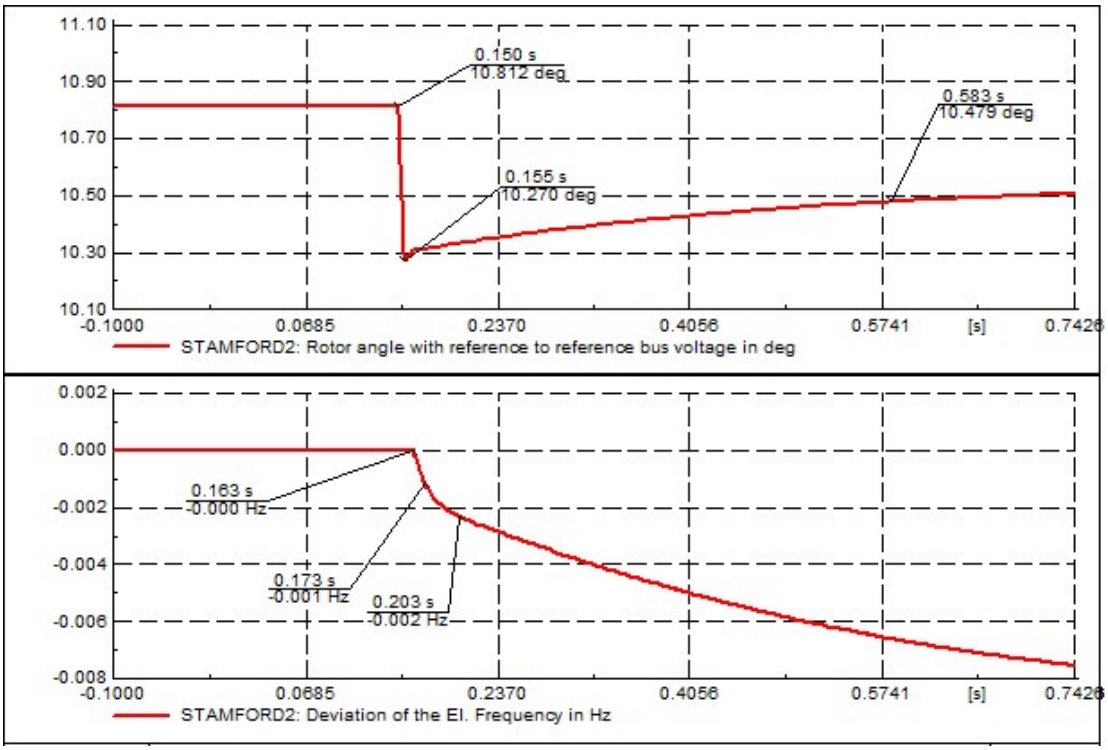
Prema prikazu Tab 4.33. vidljivo je da se kut rotora pojedinačnih generatora kreće u sličnim vrijednostima. Kako bi zaštita proradila i detektirala promjenu, promjena kuta mora biti veća od 7° jer je to najmanji prag prorade na koju relej reagira. Prema grafovima svih generatora, vidljivo je da je promjena mnogo veća od 7° te će tako i zaštita reagirati. Funkcije nakon nastanka poremećaja skokovito rastu te nakon nekog vremena prelaze u linearnu funkciju.

4.5.2. Analiza i simulacija na pomoćnom izvodu s balansom proizvodnje generatora i potrošnje izvoda

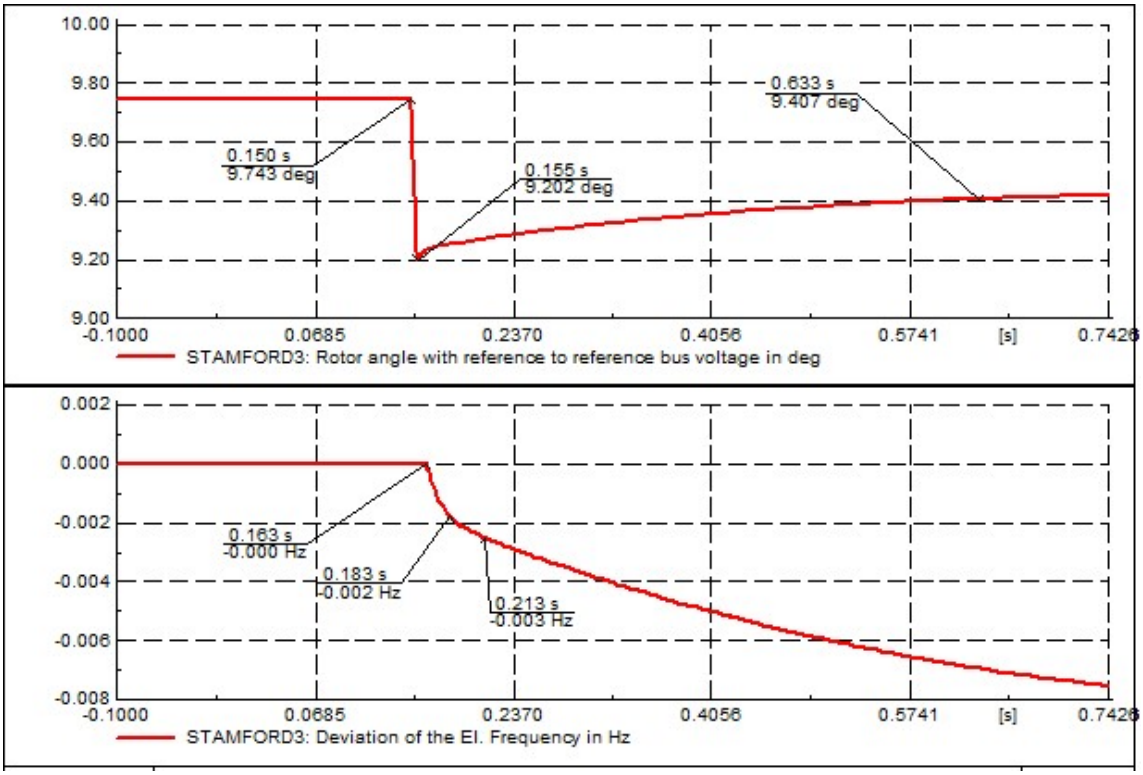
Za ovaj slučaj analize i simulacije izvršit će se balans djelatnih snaga na generatoru i na izvodima. Zadana djelatna snaga preko scaling faktora je na 0,2 vrijednosti i iznosi $\sum P_L = 0,37$ MW. Kako bi se dobio balans te vidio načini ponašanja generatorskih funkcija, ukupna vrijednost generatora podešava se na $\sum P_G = 0,37$ MW. Kao i u prijašnjim simulacijama, vremena isključenja i trajanja simulacije su jednaka. Kako bi se prikazala promjena generatorske frekvencije i kuta rotora, pomoćni vod isključen je u trenutku t = 150 ms na trafostanici 2-Winding Transformer (17) 110/30 kV - B. Simulacija je promatrana do vremena t = 750 ms te su u tom vremenskom periodu dani sljedeći grafovi funkcija.



Sl.4.35. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 1



Sl.4.36. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 2



Sl.4.37. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 3

Tab. 4.34. Prikaz izračuna brzine promjene frekvencije generatora u točki 1

	Vrijeme u t_1[s]	Δt_1[s]	Δf_1[Hz]	$\Delta f_1/\Delta t_1$[Hz/s]	Prorada releja
Generator 1	0,173	0,023	0,001	0,04	ne
Generator 2	0,173	0,023	0,001	0,04	ne
Generator 3	0,183	0,033	0,002	0,06	ne

Tab. 4.35. Prikaz izračuna brzine promjene frekvencije generatora u točki 2

	Vrijeme u t_2[s]	Δt_2[s]	Δf_2[Hz]	$\Delta f_2/\Delta t_2$[Hz/s]	Prorada releja
Generator 1	0,193	0,043	0,002	0,04	ne
Generator 2	0.203	0,053	0,002	0,04	ne
Generator 3	0.213	0,063	0,003	0,05	ne

Simulacija prikazuje balans između proizvodnje generatora i potrošnje izvoda. Prema dobivenim rezultatima vidljivo je da zaštita neće reagirati te će sustav ostati u otočnom pogonu. Izmjerene veličine promjene frekvenije kreću se u vrijednostima 0,04 Hz/s. Prema teoriji balans je najnepovoljniji slučaj za nastanak otočnog pogona u kojem zaštita neće reagirati.

Tab. 4.36. Prikaz promjene kuta rotora u odnosu na kut napon referentne sabirnice

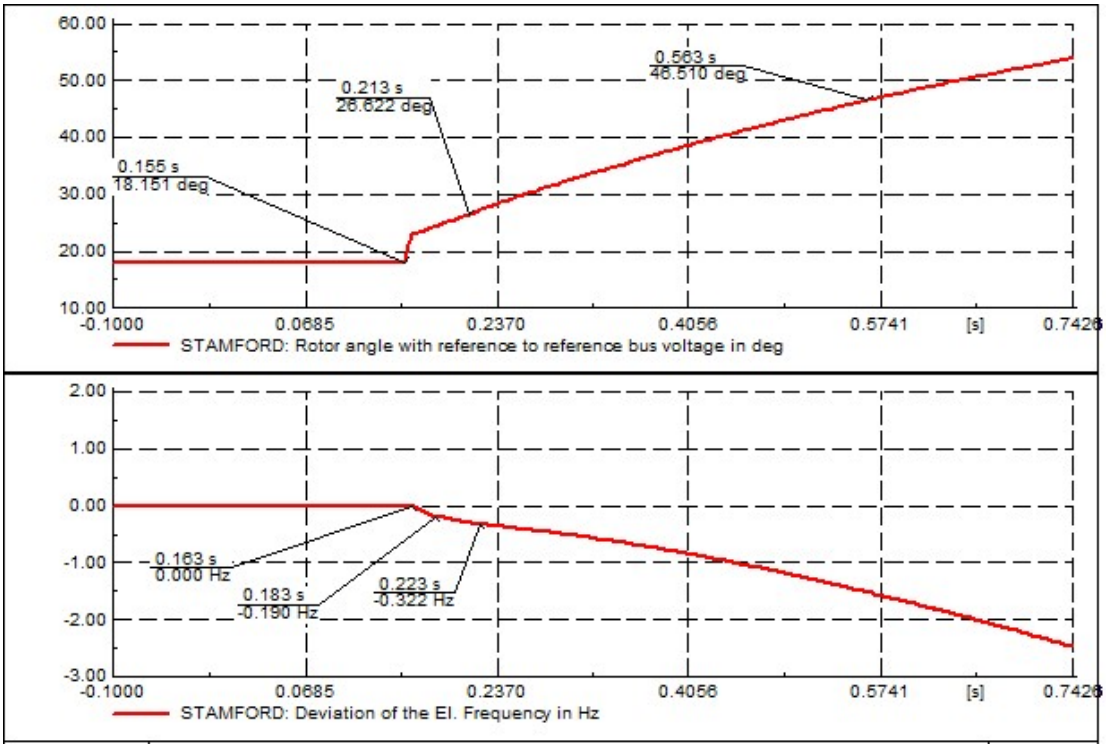
	Točka 1	Točka 2	Točka 3	Prorada releja
Generator 1	10,812°	10,270°	10,485°	ne
Generator 2	10,812°	10,270°	10,479°	ne
Generator 3	9,743°	9,202°	9,407°	ne

Kao i kod promjene frekvencije, tako i kod promjene kuta rotora generatora kod ovog balansa djelatnih snaga zaštita neće reagirati. Promjene kutova rotora se kreću oko 1°.

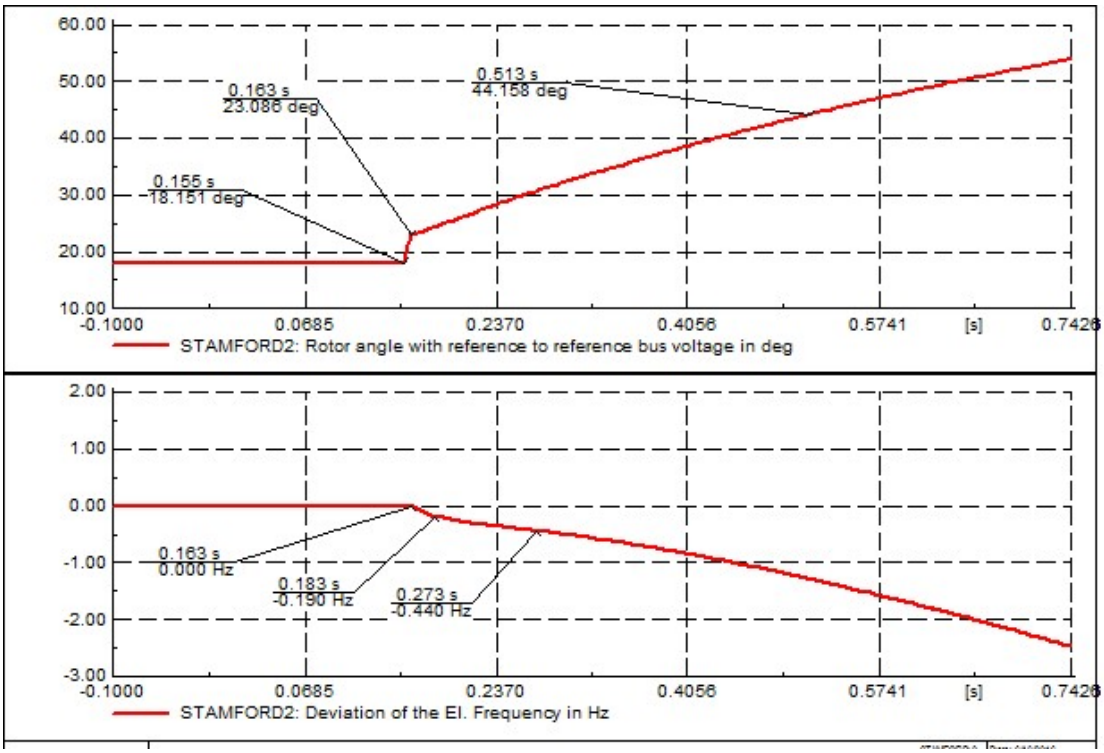
4.5.3. Analiza i simulacija na pomoćnom izvodu s najmanjom proizvodnjom generatora i najvećim opterećenjem izvoda

Analiza i simulacija detekcije i zaštite od otočnog pogona u ovom slučaju izvest će se na pomoćnom izvodu. Kako bi se izvela simulacija, postavljena je najmanja djelatna snaga na generatoru te najveće opterećenje na svim opterećenjima preko scaling factora. Scaling faktor postavljen je na svim opterećenjima na 1 kako bi se dobilo najveće opterećenje izvoda. Sva tri generatora proizvode zajedno $\sum P_{Gmin} = 0{,}81$ MW djelatne snage, s time da svaki proizvodi $P_G = 0{,}27$ MW. Najveće opterećenje pomoćnog izvoda postavljeno je na $\sum P_{Lmax} = 1{,}87$ MW. Kako bi se prikazala promjena generatorske frekvencije i kuta rotora, pomoćni izvod je isključen u trenutku t = 150 ms na trafostanici 2-Winding Transformer (17) 110/30 kV - B. Simulacija je promatrana do vremena t = 750 ms te su u tom vremenskom periodu dani sljedeći grafovi funkcija.

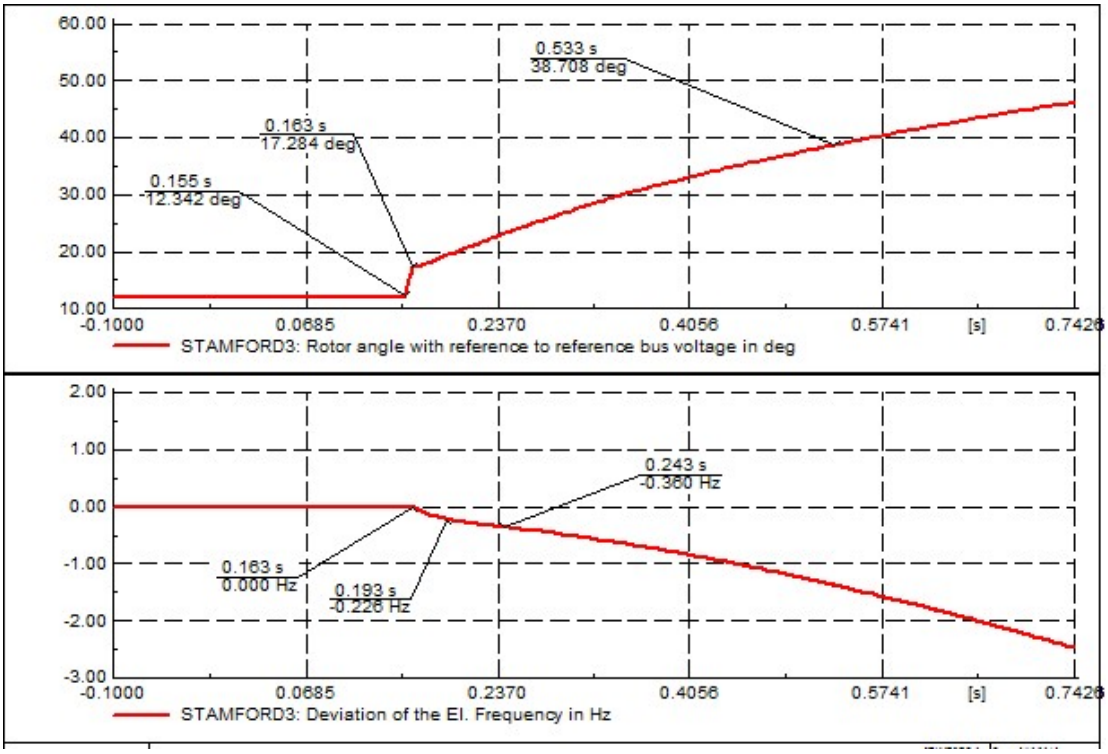
Grafovi su prikazani sljedećim slikama za sva 3 generatora.



Sl.4.38. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 1



Sl.4.39. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 2



Sl.4.40. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 3

Tab. 4.37. Prikaz izračuna brzine promjene frekvencije generatora u točki 1

	Vrijeme u t_1[s]	Δt_1[s]	Δf_1[Hz]	$\Delta f_1/\Delta t_1$[Hz/s]	Prorada releja
Generator 1	0,183	0,033	0,190	5,75	da
Generator 2	0,183	0,033	0,190	5,75	da
Generator 3	0,193	0,043	0,226	5,25	da

Tab. 4.38. Prikaz izračuna brzine promjene frekvencije generatora u točki 2

	Vrijeme u t_2[s]	Δt_2[s]	Δf_2[Hz]	$\Delta f_2/\Delta t_2$[Hz/s]	Prorada releja
Generator 1	0,223	0,073	0,322	4,41	da
Generator 2	0,273	0,123	0,440	3,57	da
Generator 3	0,243	0,093	0,360	3,87	da

Promjena brzine frekvencije na generatorima prikaza je u Tab 4.37. u prvom vremenu t_1, te u Tab 4.38. u drugom vremenu t_2. U prvom i drugom trenutku brzina promjene frekvencije

veća je od 0,2 Hz/s te je prema Tab 4.37. i Tab 4.38. vidljivo da bi zaštita proradila. Preko prikaza funkcija za identifikaciju frekvencije vidljivo je da se grafovi u sva 3 generatora ponašaju identično, tj. nakon nastanka poremećaja u sustavu, prouzrokovanih isključenjem pomoćnog izvoda, funkcije skokovito padaju. Nakon skokovite promjene funkcije se stabiliziraju te postaju linearne.

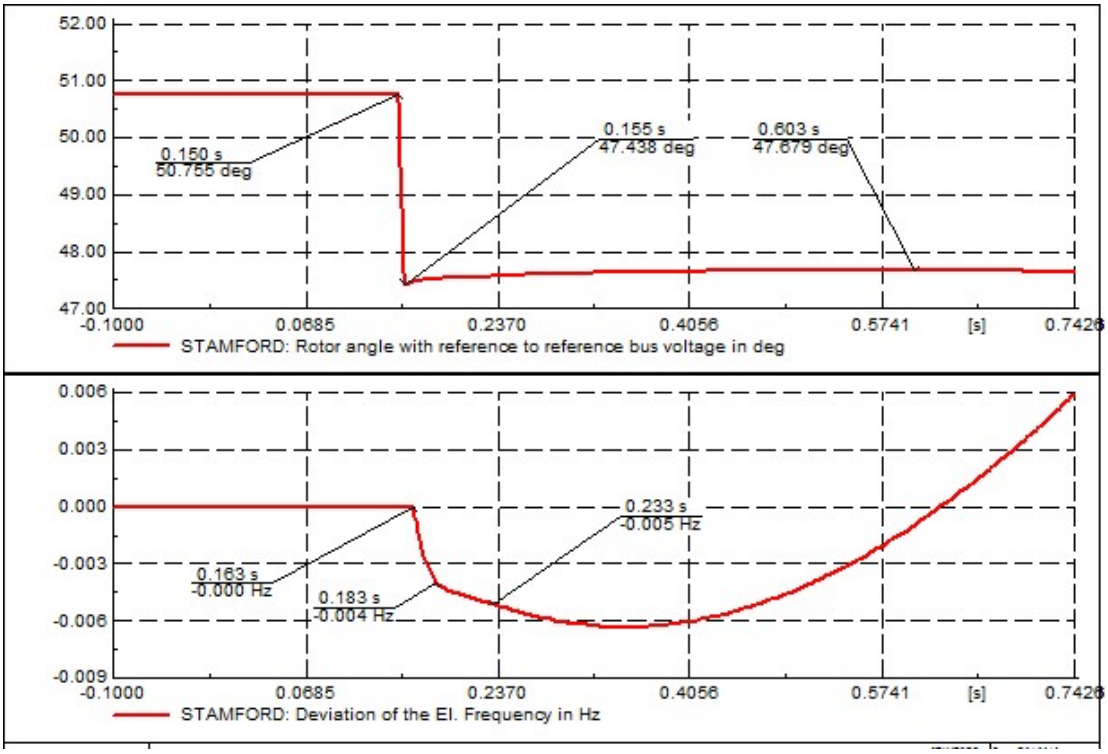
Tab. 4.39. Prikaz promjene kuta rotora u odnosu na kut napon referentne sabirnice

	Točka 1	Točka 2	Točka 3	Prorada releja
Generator 1	18,151°	26,622°	46,510°	da
Generator 2	18,151°	23,086°	44,158°	da
Generator 3	12,342°	17,284°	38,708°	da

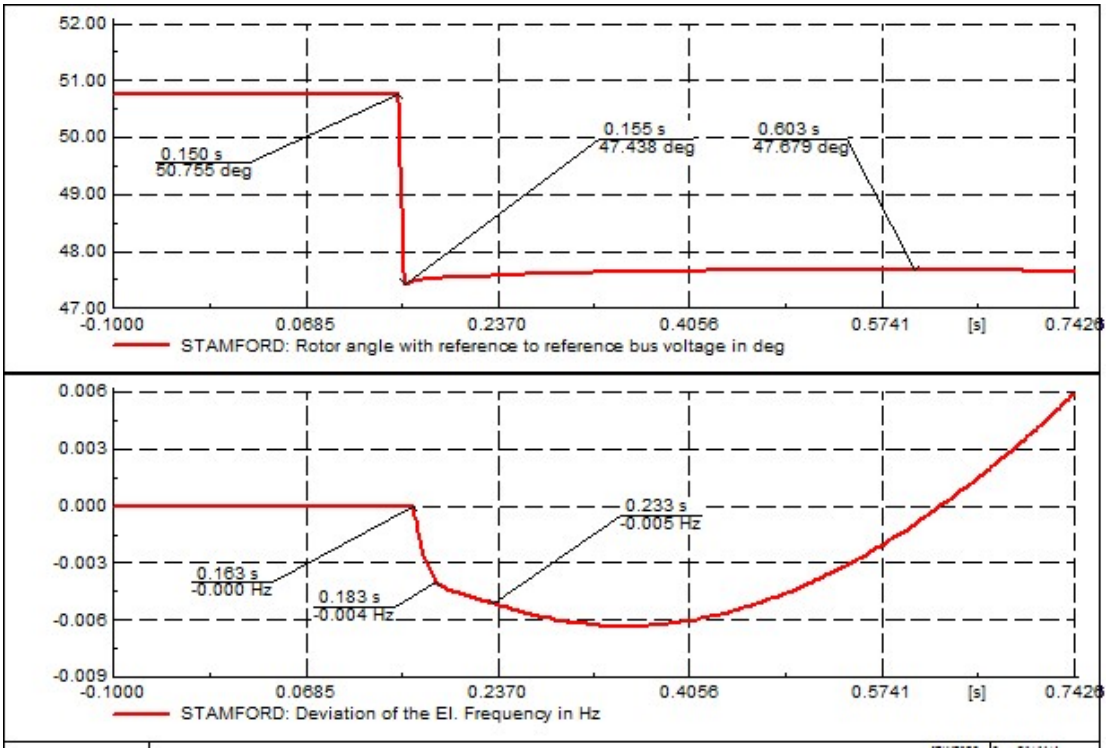
Prema prikazu Tab 4.39. vidljivo je da se kut rotora svih generatora kreće u sličnim vrijednostima. Kako bi zaštita proradila i detektirala promjenu, promjena kuta mora biti veća od 7°. Prema grafovima svih generatora detektira se promjena i zaštita reagira.

4.5.4. Analiza i simulacija na pomoćnom izvodu s balansom proizvodnje generatora i potrošnje izvoda

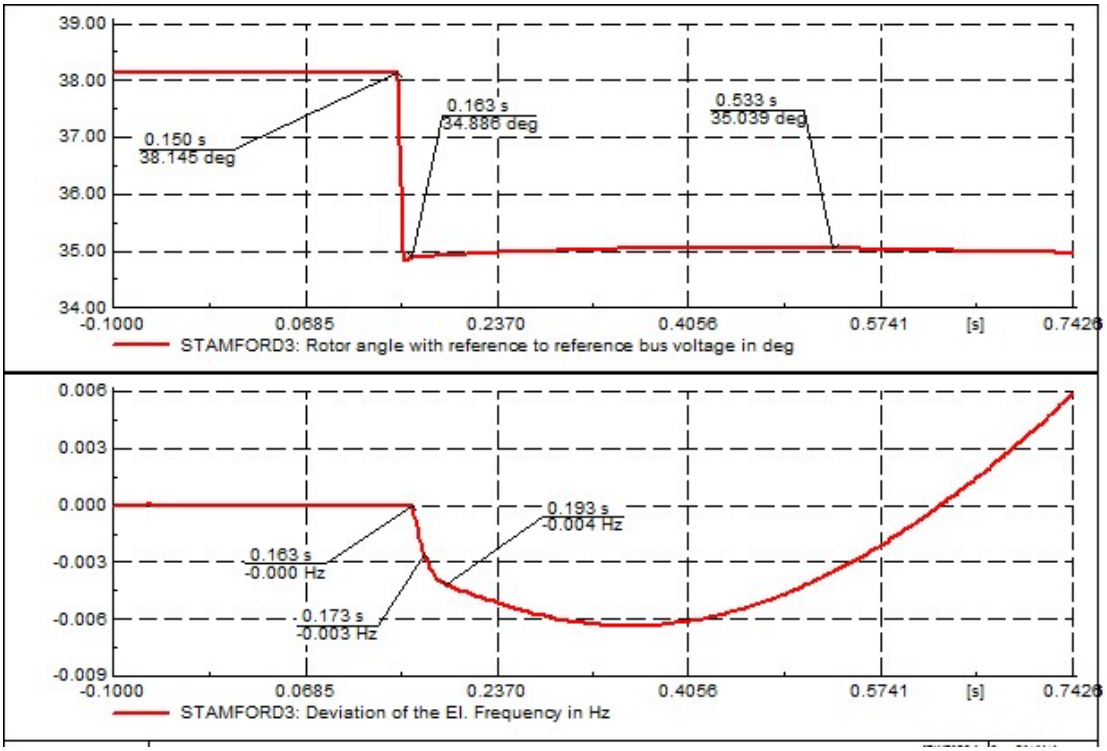
Analiza i simulacija detekcije i zaštite od otočnog pogona u ovom slučaju izvest će se na pomoćnom izvodu. Kako bi se izvela simulacija s balansom između proizvodnje i potrošnje, postavljene su iste djelatne snage na generatoru te na opterećenjima, na svim opterećenjima preko scaling factora. Scaling faktor postavljen je na svim opterećenjima na 1 kako bi se dobilo najveće opterećenje izvoda. Sva tri generatora postavljena su prema snazi opterećenja na $\sum P_G = 1,87$ MW djelatne snage, s time da svaki proizvodi generator proizvodi $P_G = 0,623$ MW. Opterećenje pomoćnog izvoda podešen je na $\sum P_L = 1,87$ MW. Kako bi se prikazala promjena generatorske frekvencije i kuta rotora, pomoćni vod isključen je u trenutku t = 150 ms na trafostanici 2-Winding Transformer (17) 110/30 kV - B. Simulacija je promatrana do vremena t = 750 ms te su u tom vremenskom periodu dani sljedeći grafovi funkcija.



Sl.4.41. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 1



Sl.4.42. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 2



Sl.4.43. Prikaz kuta rotora u odnosu na kut napona referentne sabirnice i promjena frekvencije generatora na generatoru 3

Tab. 4.40. Prikaz izračuna brzine promjene frekvencije generatora u točki 1

	Vrijeme u t_1[s]	Δt_1[s]	Δf_1[Hz]	$\Delta f_1/\Delta t_1$[Hz/s]	Prorada releja
Generator 1	0,183	0,033	0,004	0,12	ne
Generator 2	0,173	0,023	0,003	0,13	ne
Generator 3	0,173	0,023	0,003	0,13	ne

Tab. 4.41. Prikaz izračuna brzine promjene frekvencije generatora u točki 2

	Vrijeme u t_2[s]	Δt_2[s]	Δf_2[Hz]	$\Delta f_2/\Delta t_2$[Hz/s]	Prorada releja
Generator 1	0,233	0,083	0,005	0,06	ne
Generator 2	0,203	0,053	0,005	0,09	ne
Generator 3	0,193	0,043	0,004	0,09	ne

Iz dobivenih grafova vidimo da prilikom balansa na pomoćnom izvodu između proizvodnje generatora i potrošnje izvoda zaštita ne reagira. Izmjerene vrijednosti frekvencije se nalaze ispod proradnog praga releja.

Tab. 4.42. Prikaz promjene kuta rotora u odnosu na kut napon referentne sabirnice

	Točka 1	Točka 2	Točka 3	Prorada releja
Generator 1	50,755°	47,438°	47,679°	ne
Generator 2	50,755°	47,496°	47,676°	ne
Generator 3	38,145°	34,886°	35,039°	ne

Kao i kod promjene frekvencije tako i kod promjene kuta rotora generatora kod ovog balansa djelatnih snaga neće se detektirati otočni pogon. Promjene u kutovima rotora su manje od proradnog praga releja.

Tab. 4.43. Prikaz analiza s ukupnom proizvodnjom svih generatora i ukupnim opterećenjem izvoda, te prikazom detekcije otočnog pogona

Analize	$\sum P_G$ [MW]	$\sum P_L$ [MW]	Prorada releja prema ROCOF [Hz/s]	Prorada releja prema VS [°]
Analiza 4.5.1. ($P_{Gmax,}$ P_{Lmin})	2,4	0,37	da	da
Analiza 4.5.2. ($P_G =$ P_{Lmin})	0,37	0,37	ne	ne
Analiza 4.5.3. ($P_{Gmin,}$ P_{Lmax})	0,81	1,87	da	da
Analiza 4.5.4. ($P_G =$ P_{Lmax})	1,87	1,87	ne	ne

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu je prikazan rad triju sinkronih generatora pojedinačnih snaga 1,5 MVA priključenih na distributivnu mrežu. Rad triju generatora promatran je u različitim uvjetima. Prvotno je pogon prikazan sa priključenjem tri generatora na glavni izvod a drugi slučaj je bio priključenje na pomoćni izvod. U oba slučaja je sustav preko glavnog ili pomoćnog izvoda bio spojen na krutu mrežu sve do trenutka kada je napravljen otočni pogon isključenjem krute mreže. Isključenjem nadređene krute mreže te nastankom otočnog pogona podešene su različite vrijednosti na generatorima i na opterećenjima izvoda. Jedan od slučaja prikazan u radu je najveća proizvodnja djelatne snage generatora i najmanje opterećenje izvoda. Drugi slučaj koji je prikazan je najmanja proizvodnja djelatne snage generatora i najveće opterećenje izvoda. Podešavanje vrijednosti opterećenja izvoda je prvotno postavljeno na pojedinim opterećenjima na 30 % a u drugom na 80 % nazivne snage transformatora. Sljedeća promjena je podešena preko scaling faktora na svim priključenim lateralnim izvodima . U prvom slučaju za slučaj najmanjem opterećenja na 0,2 tj. 20 % maksimalno zabilježenog opterećenja a za drugi slučaj, slučaj najvećeg opterećenja izvoda na 1, s 100% namještenog opterećenja izvoda. Podešavanjem vrijednosti opterećenja podešavana je i obrnuta proizvodnja djelatne snage na generatorima. U svim ovim slučajevima koji su prethodno navedeni simuliran je otočni pogon sustava te bi shodno tome zaštita reagirala i isključila sustav. Dodatno je prikazan i balans između proizvodnje i potrošnje na oba izvoda. U simulaciji balansa u otočnom pogonu na glavnom i pomoćnom izvodu promjena je zanemariva zbog istih vrijednosti snaga između proizvodnje i potrošnje. Sve simulacije rađene su u svrhu detekcije i zaštite od otočnog pogona s primjenom ROCOF i VS metoda. Sve simulacije popraćene su grafovima mjerenih funkcija kuta rotora i promjene frekvencije generatora. Analizom dobivenih grafova određeno je dali će se detektirati otočni pogon i dali će zaštita proraditi i obaviti svoju funkciju.

LITERATURA

[1] Tomislav Alinjak, Optimizacija pogona distribucijske mreže sa značajnim udjelom distribuiranih izvora , HEP ODS d.o.o. ,Slavonski Brod, 2012.

[2] Damir Karavidović, Distribucijska mreža i distribuirani izvori zajedno u paralelnom i otočnom pogonu, CIRED - 2. (8.) savjetovanje, Umag, 2010.

[3] Mreža pravila elektroenergetskog sustava, NN 36/06, MINGORP.

[4] M. Ivas, Otočni pogon distribuiranih izvora sastavljenih od mrežnih izmjenjivačkih jedinica, Telenerg d.o.o. , Zagreb, 2014.

[5] R. Teodorescu, M. Lissere, P. Rodriguez, Grid converters for photovoltaic and wind power systems , John Willey & Sons Ltd, UK, 2011.

[6] N. Dizdarević, M. Majstorović, S. Žutobradić, Distribuirana proizvodnja električne energije, Zagreb, 2003.

[7] R. Bugdal,, A. Dysko, G.M.Burt, J.R. McDonald, Performance analysis of the ROCOF and Vector Shift Methods using a dynamic protection modelling approach, PSP 2006, Effect of distributed generation on power system protection, pp 139-144.

[8] A. Beddoes, P. Thomas, M. Gosden, Loss of Mains protection relay performances when subjected to network disturbances/events, 18 th International Conference on Electricity Distribution – CIRED, Turin, 6-9 June 2005.

[9] S. Tešnjak, Modeliranje i simulacija pogona elektroenergetskog sustava, FER, Zagreb, 2015.

[10] S. Nikolovski, M. Vukobratović, P. Marić, Detekcija i zaštita od otočnog pogona distribuirane proizvodnje, CIGRE - 11. simpozij o sustavu vođenja EES-a, Opatija, 2014.

[11] C. Booth, Loss of Mains Protection, University of Strathclyde, Manchester, 2011.

SAŽETAK

U ovom radu je prikazan pogon triju generatora nazivnih snaga 1,5 MVA u distributivnoj mreži spojenih preko glavnog ili pomoćnog izvoda na krutu mrežu. Izvedene su simulacije otočnog pogona generatora i analize sustava prvobitno napajanjem iz glavnog izvoda te zatim napajanjem preko pomoćnog izvoda. Isključenjem krute nadređene mreže na koju su izvodi spojeni promatrane su simulacije otočnoga pogona za različite izlazne djelatne snage generatora i različite iznose opterećenja. Prvotno je provedena simulacija s promjenom opterećenja izvoda i promjenom izlazne djelatne snage generatora dok su dodatna razmatranja obavljena u uvjetima balansa između proizvodnje generatora i potrošnje izvoda. Dobivene vrijednosti simulacije – promjena frekvencije i kuta opterećenja generatora analizirane su da bi se uvidjelo hoće li zaštita detektirati otočni pogon ili ne.

Ključne riječi: distributivna mreža, glavni izvod, pomoćni izvod, djelatna snaga, otočni pogon, frekvencija, kut rotora, proizvodnja generatora, potrošnja izvoda.

ABSTRACT

This paper presents three generators with rated power of 1.5 MVA operating on external higher voltage network via main and auxiliary feeder. The simulation of island operation of the system originally supplied by the main feeder and then powered through auxiliary feeder was performed. Island operation was created by simulation of certain feeder triping in cases with different generated active power dispatch and system load values. Additional considerations were performed in terms of the balance between the generated active power and the load in the system. Results obtained in the simulation - changes of the generator frequency and the rotor angle were analyzed in terms of detection of the island operation.

Keywords: distribution network, main feeder, auxiliary feeder, active power, island operation, generator frequency, rotor angle, system load.

ŽIVOTOPIS

Mario Rakarić, rođen je 27. veljače 1990. godine u Pakracu. Pohađao je srednju „Tehničku školu Daruvaru“ u Daruvaru te 2008. godine stekao zvanje elektrotehničar. Odmah po završetku srednjoškolskog obrazovanja upisao je „Elektrotehnički fakultet Osijek“ u Osijeku, Stručni studij, smjer Elektroenergetika kao redovit student. Nakon završetka Stručnog studija upisao je razlikovnu godinu te je nakon nje upisao Diplomski studij. Svojim marljivim radom te savjesnim obavljanjem studenskih obaveza proglašen je najboljim studentom na godini.

Radno iskustvo:

1,5 godinu rada u Hrvatskom Telekomu u službi za korisnike,

5 godina rada u Optima Telekomu u službi za korisnike,

6 godina rada u Novom Studentskom Domu kao recepcionar,

0,5 godine sam radio u teretani.

Cijelo školovanje je popravljao računalnu, mobilnu i električnu opremu te uređaje.

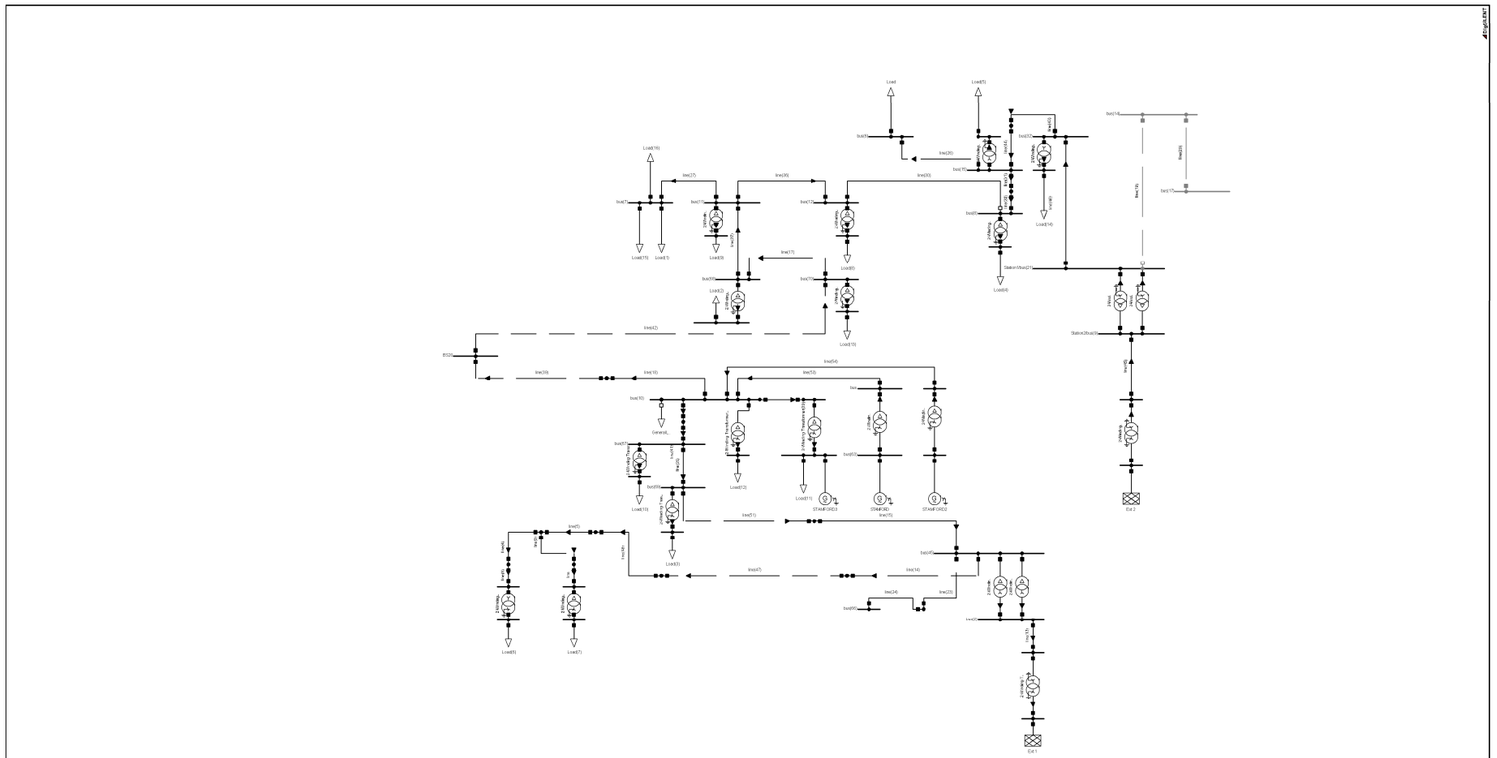
Radio je mnoge poslove vezne za električne instalacije, centralna grijanja, vodovod te automehaniku.

_____

Rakarić Mario

PRILOG

P.4.1. Prikaz distribucijske mreže – jednopolna shema -DIgSILENT



Load Flow Balanced	
Nodes	Branches
Line-Line Voltage, Magnitude [kV]	Active Power [MW]
Voltage, Magnitude [p.u.]	Reactive Power [Mvar]
Voltage, Angle [deg]	Loading [%]