

# Analiza i podešenje zaštite od gubitka sinkronizma generatora

---

**Drmić, Marko**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:402150>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-03**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni studij**

**ANALIZA I PODEŠENJE ZAŠTITE OD GUBITKA  
SINKRONIZMA GENERATORA**

**Diplomski rad**

**Marko Drmić**

**Osijek, 2024.**

# SADRŽAJ

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. UVOD</b> .....   | <b>1</b>  |
| <b>2. PREGLED PODRUČJA TEME</b> .....  | <b>2</b>  |
| <b>3. ZAŠTITA U ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU, NJIHANJE SNAGA I<br/>KLIZANJE POLOVA</b> ..... | <b>4</b>  |
| 3.1.1. Relejna zaštita u elektroenergetskom sustavu.....                                   | 4         |
| 3.1.2. Distantna zaštita.....  | 5         |
| 3.1.3. Njihanje snage .....  | 9         |
| 3.1.4. Klizanje polova.....  | 11        |
| 3.1.5. Detektiranje gubitka sinkronizma.....   | 16        |
| 3.1.6. Štićenje prekidača prilikom gubitka sinkronizma.....                                | 16        |
| <b>4. ANALIZA STABILNOSTI GENERATORA</b> .....   | <b>19</b> |
| <b>4.1. Osnovni slučaj tranzijentne stabilnosti</b> .....                                  | <b>19</b> |
| <b>4.2. Prolazni kvar</b> .....  | <b>22</b> |
| <b>4.3. Osnovni slučaj njihanja snage</b> .....  | <b>26</b> |
| <b>4.4. Slučaj uklopa tereta</b> .....   | <b>29</b> |
| <b>4.5. Slučaj nastupa kratkog spoja</b> .....   | <b>31</b> |
| <b>4.6. Kratki spoj – prolazni kvar (APU)</b> .....  | <b>33</b> |
| <b>4.7. Diskusija rezultata</b> .....  | <b>35</b> |
| <b>5. ZAKLJUČAK</b> .....  | <b>36</b> |
| <b>LITERATURA</b> .....  | <b>37</b> |
| <b>SAŽETAK</b> .....   | <b>38</b> |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | <b>39</b> |

## 1. UVOD

Elektroenergetski sustavi rade s vrlo uskim marginama stabilnosti pa kada sustav doživi kvar ili poremećaj, rotori generatora podliježu jako velikim oscilacijama. Ove oscilacije u kutu rotora generatora dovode do ozbiljnih oscilacija snage (kolebanja snage) kroz sustav. Pojavu njihanja snaga (*eng.* *Power swing*) u elektroenergetskom sustavu treba detektirati i poduzeti odgovarajuće zaštitne mjere.

Za stabilna njihanje snage, postoji mogućnost da se putanja impedancije pozitivne sekvence kreće kroz radnu zonu releja distantne zaštite. U tom slučaju, proradu releja distantne zaštite treba blokirati, koristeći blokadu njihanja snage (*eng.* *Power Swing Block - PSB*); inače može doći do neželjene prorade releja distantne zaštite, što može dodatno oslabiti već oslabljen sustav. Stoga je važno što brže detektirati stanja njihanja snage kako bi se spriječila neželjena prorada sustava zaštite.

Za nestabilna stanja njihanja snaga, uvodi se funkcija naloga za isključenjem prekidača u slučaju klizanja polova (*eng.* *Out of Step Tripping - OST*) kako bi se mreža podijelila u otoke s ravnotežom između proizvodnje i potrošnje. Studije stabilnosti određuju mjesta gdje je najbolje detektirati uvjete klizanja polova i podijeliti sustav na otoke. Na svim ostalim mjestima potrebno je primijeniti blokiranje naloga za isključenje prekidača kako bi se izbjeglo dijeljenje sustava na nepoželjnim mjestima. Klizanje polova dolazi s vlastitim izazovima, kao na primjer kada treba izdati naredbu za isključenjem ili naredbu za blokadu isključenja prekidača od strane releja, ako sustav može ponovno uspostaviti stabilnost nakon klizanja polova generatora.

U ovome radu spomenut će se zaštita u elektroenergetskom sustavu, teorija o njihaju snaga (*eng.* *Power Swing*) i klizanju polova (*eng.* *Out of Step*) te podešavanje zaštite gdje, kako i zašto se koristi pojedina zaštita.

Četvrti dio je zapravo naglasak ovoga rada, a to je praktični dio rada na modelu unutar programskog paketa DIGSILENT PowerFactory te interpretacija rezultata.

## 2. PREGLED PODRUČJA TEME

Održavanje pouzdanosti i stabilnosti elektroenergetskog sustava u dereguliranom tržišnom okruženju svakodnevni je izazov za elektroprivredne tvrtke diljem svijeta. Stabilnost i toplinska ograničenja, kolapsi napona i tokovi snaga uobičajeni su izazovi sa kojima se planeri i operateri sustava moraju nositi. Nedavni kaskadni ispadi (pr. 21.6.2024 kada je cijela regija u Hrvatskoj, Dalmacija, ostala bez energije) u nekoliko elektroenergetskih sustava širom svijeta zahtijevaju točno određene analize, istraživačke i razvojne napore kako bi se odredili uvjeti i događaji koji su prouzročili stanje kvara unutar mreže te kako bi se razvila rješenja za preventivno planiranje prijenosa i postupci automatske zaštite sustava. Može se reći da se otkrivanje gubitka sinkronizma smatra strateškom funkcijom zaštite elektroenergetskog sustava od teških i nepredviđenih događaja i kaskadnih ispada i kvarova unutar mreže.

Literatura [1] govori o tome kada dođe do poremećaja u sustavu, generatori koji osjete utjecaj poremećaja trebaju činiti jednu skupinu, a svi ostali generatori drugu. Ako je poremećaj ozbiljniji, može doći do gubitka sinkronizma unutar grupe. Ovaj rad predlaže novu metodu, metodu koja će mjeriti struju i snagu u jednakim intervalima na vodu koji spaja pod grupe generatora. Promjene snage i struje mjere se u određenom intervalu, smjer radne točke elektroenergetskog sustava koja se kreće po krivulji snage i fazni kut. Prema tim mjerenjima može se detektirati gubitak sinkronizma sustava. Spomenuta metoda se naziva PI-metoda.

Literatura [2] govori jednoj od glavnih sjevernoameričkih elektroprivreda, Hydro-Quebec, Kanada, koja upravlja modernim i kompleksan sustavom koji zahtjeva učinkovite i inovativne sheme zaštite. Trenutno, njihov prijenosni sustav je zaštićen nizom koordiniranih posebnih zaštitnih shema koje su razvijene tijekom posljednjih 20 godina. Ove zaštitne sheme zahtijevaju stalnu prilagodbu, zbog sve većeg kapaciteta i složenosti prijenosnog sustava. Novi veliki obnovljivi izvori električne energije kao što su hidro i vjetroelektrane se dodaju u sustav, ali prijenosni sustav je strogo ograničen zbog ekonomskih i ekoloških razloga. Timovi za razvoj i istraživanje u Hydro-Quebec i Areva T&D zajednički razvijaju dva nova releja za otkrivanje gubitka sinkronizma u prijenosu i elektranama. Ti releji su dizajnirani kako bi poboljšali sadašnje posebne zaštitne sheme te pružili novu vrstu zaštite sustava. Oni mogu predvidjeti gubitak sinkronizma koristeći samo lokalne varijable i temelje se na algoritmima neizrazite logike (*eng. fuzzy-logic*). Ovi releji mogu se primijeniti na druge velike elektroenergetske sustave sklone prolaznim i dinamičkim nestabilnostima. Unutar ovoga rada prikazane su glavne karakteristike i primjene ovih releja unutar prijenosnog sustava Hydro-Quebec.

Literatura [3] govori o tome da kada nastupi ozbiljan poremećaj u sustavu, može doći do gubitka sinkronizma te da postoji mogućnost da više generatora ispadne iz sinkronizma što bi dovelo do nestanka električne energije. Kada dvije grupe generatora ispadnu iz sinkronizma, na nekim vodovima iznos napona padne na vrijednost nula. U ovome znanstvenom radu, pristup je bio upravo na tom faktoru. Znanstveni rad opisuje dva načina detektiranja gubitka sinkronizma. Prvi je identificiranje voda kojemu se pojavljuje „električna centralna točka“ prilikom poremećaja u sustavu. Točka u kojoj napon postaje nula, a nalazi se između dvije točke u kojima se kut napona invertira na samom početku kvara u sustavu. Prateći napon u spomenutoj točki i njegov pad na nulu, poremećaj kod ostalih generatora u mreži može se spriječiti. Predložena metoda uključuje i korištenje jalove energije prema vodu u vremenu kada nastupa gubitak sinkronizma. Druga metoda je zapravo eksperimentalna, gdje koriste simuliranje sustava napajanja, trofazni tiristorski pretvarač, istosmjerni generator, trofazni sinkroni generator, prijenosni vod i prekidač. Autori su pomoću ove simulacije potvrdili prethodno spomenutu metodu gdje traže „točku“ gdje napon na vodu postaje jednak nuli.

Literatura [4] govori o primjeni promjeni redoslijeda faza (eng. *Phase sequence exchange - PSE*) kao o novo razvijenoj tehnici upravljanja gdje se pametni električni uređaji koriste kako bi zamijenili redoslijed faza. U ovoj literaturi se predlažu tehnike za upravljanje PSE uređajima, pomoću generiranja signala koristeći lokalna mjerenja nakon poremećaja te pokazuju efektivnost PSE uređaja u stabiliziranju sustava sa više generatora. Testove su radili na IEEE 39-sabirničkom sustavu u pomoću digitalnog simulatora (eng. *real time digital simulator - RTDS*).

Literatura [5] govori o odnosu preopterećenja voda i gubitku sinkronizma u međusobno povezanim sustavima. Raspravlja se o tome kako se dogodi gubitak sinkronizma prilikom prorade zaštitnih uređaja. Teorijski se pristupa fenomenu gubitka sinkronizma kada nastupa klizanje polova. Simuliran je scenarij kada nastupa gubitak sinkronizma u međusobno povezanim sustavima te je posebno stavljen naglasak na točno i ispravno modeliranje sustava zaštite u takvim mrežama te na temelju dobivenih rezultata simulacija dana je preporuka za dizajn shema sustava zaštite

### **3. ZAŠTITA U ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU, NJIHANJE SNAGA I KLIZANJE POLOVA**

#### **3.1.1. Relejna zaštita u elektroenergetskom sustavu**

Relejna zaštita je složeni sustav sastavljen je od strujnih i naponskih transformatora, sekundarnih krugova ožičenja između strujnih, naponskih transformatora i zaštitnih uređaja, samih uređaja relejne zaštite i prekidača koji prekidaju strujni krug u kvaru (prema nalogu releja) [6]. Relej je osnovni element relejne zaštite, može biti jednofazni odnosno trofazni. Uređaj koji trajno kontrolira određenu veličinu koja može biti električna, kada se radi o struji, naponu, frekvenciji, otporu, impedanciji ili neelektrična kada je u pitanju temperatura, tlak, broj okretaja i sl. Releji su konstrukcijski komplicirani uređaji koji posjeduju više članova, a neki od njih su:

- Mjerni član
- Vremenski član
- Proradni član
- Usmjereni član

Tri su poznate generacije relejne zaštite, a to su elektromehanički releji, statički releji i danas najčešći numerički releji. Elektromehanički releji rade na principu pomicanja kontakata elektromehaničkim silama koje izaziva struja prilikom protjecanja određenim svicima. Statički relej bazira svoje djelovanje na principu poluvodičke tehnike. Umjesto pomičnih kontakata oni imaju nepomične kontakte koji se temelje na tranzistorima i poluvodičkim diodama. Prednost im je brže djelovanje u usporedbi sa elektromehaničkim relejima. Numerički releji baziraju se na primjeni mikroprocesora i računalnih programa koji zamjenjuju osnovne principe djelovanje zaštite. Prednost im je vrlo velika brzina rada te mala potrošnja. Takav relej u jednoj samostalnoj jedinici posjeduje više funkcija zaštite. Svaka od zaštitnih funkcija posjeduje računalni program koji kontrolira neku od električnih veličina ili kombinaciju, primjer struju i napon kako bi računao impedanciju [6].



Sl. 3.1. Numerički relej, Siemens Siprotec 5 [7]

### 3.1.2. Distantna zaštita

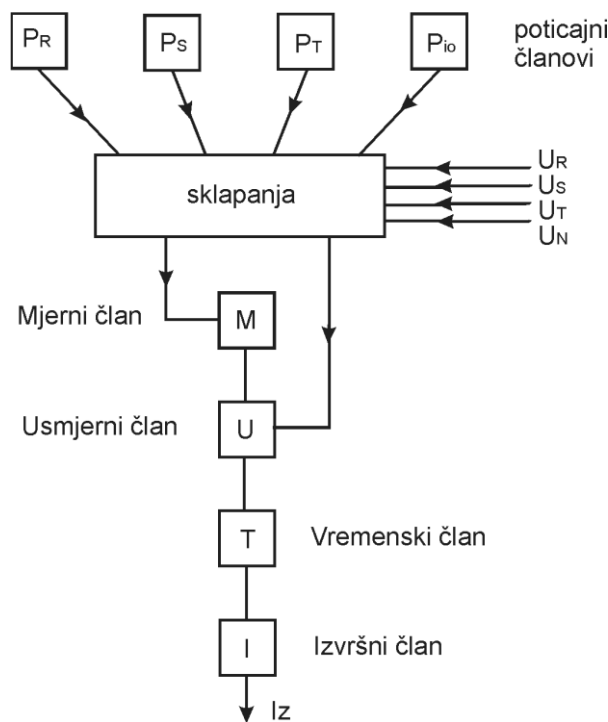
Budući da je tema ovoga rada analiza i podešenje zaštita od klizanja polova i njihanja snaga, prilikom pojave ovakvih poremećaja u mreži, distantna zaštita je ta koja će imati ulogu u zaštiti mreže, dalekovoda i generatora. Najčešće se koristi za zaštitu vodova u visokonaponskim prijenosnim mrežama, relej distantne zaštite priključuje se na strujne i naponske transformatore te ima IEC oznaku Z<, a ANSI kod joj je 21. Kao kriterij djelovanja koristi vrijednosti napona i struje na mjestu ugradnje releja. Djeluje na iskllope prekidača prilikom kvara u vodnom polju, zbog bolje selektivnosti te bržeg otklanjanja kvara, distantna zaštita se ugrađuje na oba kraja visoko naponskih vodova te releji komuniciraju međusobno, najčešće putem optičkog kabela odnosno telekomunikacijskog voda. Vrijeme djelovanje ovisi o udaljenost između mjesta nastajanja kratkoga spoja i mjesta ugradnje distantnog releja. Distantni relej složeni je uređaj sa više članova, a to su najčešće

- **Poticajni član:** Stavlja u pokret rad zaštite u slučaju pojave poremećaja u sustavu te priključuje usmjereni i mjerni član na potrebne struje i napone
- **Usmjereni član:** Nadzire smjer snage kratkog spoja
- **Mjerni član:** priključen je na struju i napon te mjeri impedanciju (općenito) između mjesta nastupa kratkog spoja i mjesta ugradnje zaštitnog releja. Mjerena impedancija je proporcionalna udaljenosti između spomenuta dva mjesta. Ukoliko je mjerena impedancija



manja od podešene vrijednosti impedancije na mjernom članu, mjerni član šalje nalog izvršnom članu, podstredstvom vremenskog člana

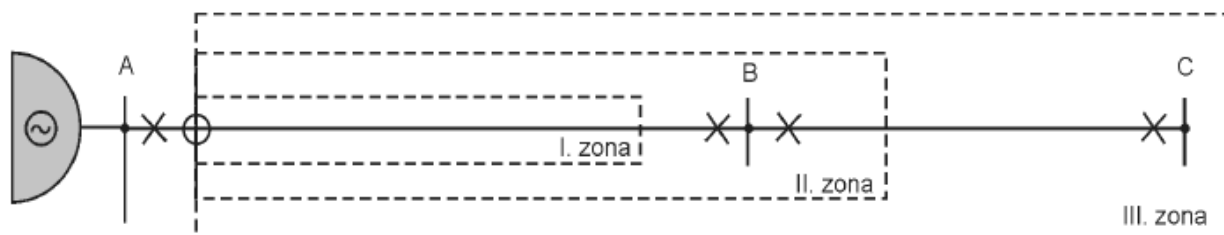
- **Vremenski član:** Osigurava vremensko stupnjevanje djelovanja distantne zaštite (selektivnost) u ovisnosti o udaljenosti mjesta kratkog spoja od mjesta ugradnje releja
- **Izvršni član:** ima zadaću djelovati po nalogu ili mjernog ili vremenskog člana, na isključenje prekidača i odgovarajuću signalizaciju prorade distatnog releja. Ovaj član prvenstveno djeluje na odgovarajući isklopni svitak prekidača
- **Pomoćni članovi:** Služe za pomoćne svrhe, signalizacija djelovanja, sprječavanje ostalih pogrešnih djelovanja, APU i sl.[6]



Sl. 3.2. Blok shema djelovanja distatnog releja [6]

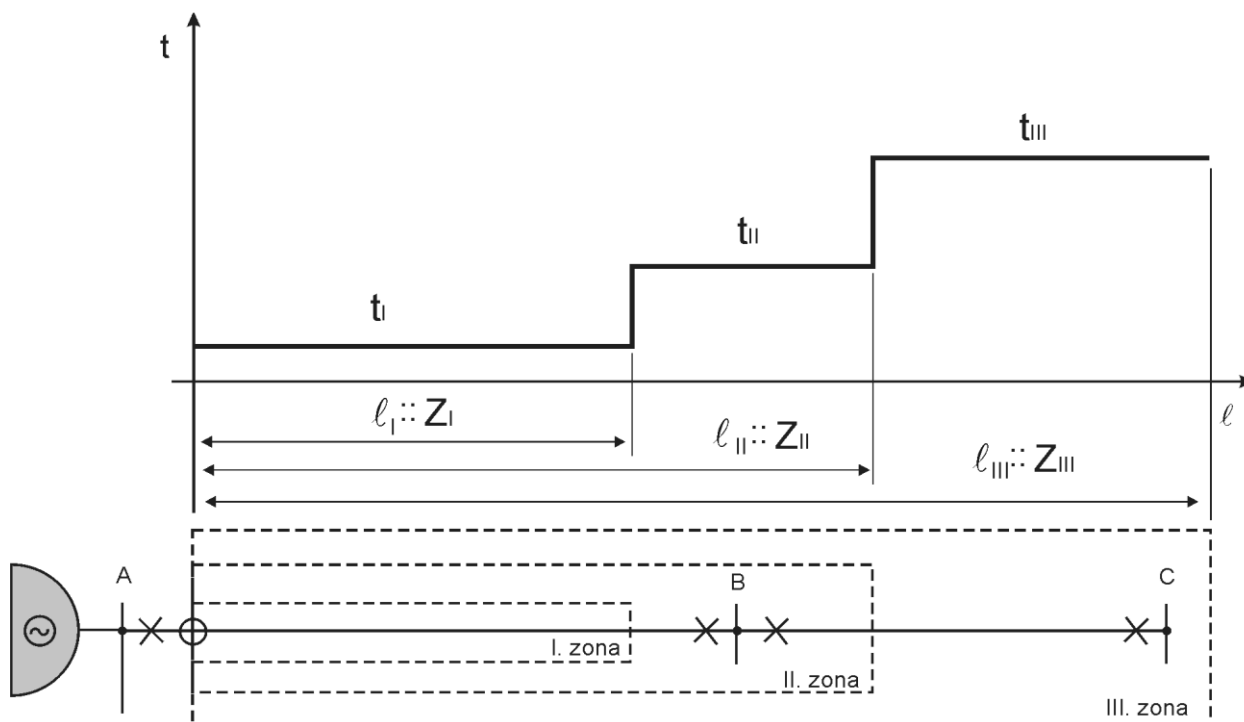
Distantna zaštita ima mogućnost razlikovanja stanja kvara uzorkovanog od strane kratkoga spoja od stanja poremećaja nastalog promjenama u mreži (APU, uklopi, isklopi velikih tereta i sl.) i to pomoću mjerenja impedancije, sama vrijednost impedancije odgovara udaljenosti nastanka poremećaja do mjesta ugradnje releja. Distantna zaštita neće biti u mogućnosti točno odrediti mjesto kvara, isto tako moguća je pojava različitih spojeva na štíćenom objektu te pojave električnog luka koji utječe na vrijednost mjerenja impedancije, sve navedeno i još dosta različitih faktora može dovesti do toga da relej distantne zaštite pogrešno odredi mjesto kvara. Iz tog razloga, distantna zaštita radi na principu zaštitnih zona. Četiri zone pokrivaju određeni dio voda.

- 1. zona: 80-85% štíćenog voda, zbog osiguranja selektivnosti
- 2. zona: 120% štíćenog voda, cijeli vod te 20% duljine susjednog voda do maksimalno 50% duljine susjednog voda
- 3. zona: 100% duljine štíćenog voda te najduži vod susjedni vod
- 4. zona: reverzna sabirnička zaštita, postavlja se u suprotnom smjeru od prve 3 te pokriva 50 %- 60% duljine najkraćeg voda u suprotnom smjeru [8]



Sl. 3.3. Grafički prikaz zaštitnih zona distantne zaštite [6]

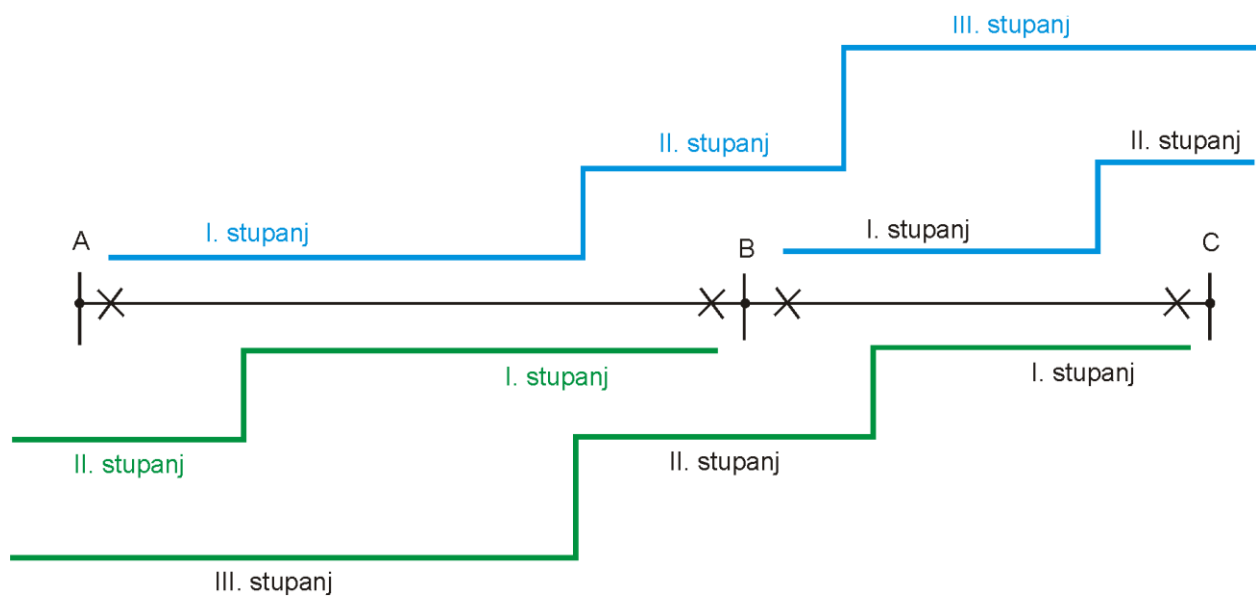
Selektivnost između distantnih releja koji se nalaze na različitim krajevima vodova i u drugačijim zonama štíćenja, ostvaruje se pomoću različitog vremenskog podešavanja. Vremenska karakteristika distantne zaštite na vodu A-B sa slike 3.3 prikazana je na slici 3.4, gdje se vidi selektivnost između zaštitnih zona koje se ostvaruje pomoću vremenske odgode djelovanje zaštite, tako da se između zona postavi odgovarajući vremenski interval  $\Delta t$ .



Sl. 3.4. Vremenske karakteristike distantne zaštite [6]

Točke A B i C predstavljaju postrojenja koja imaju postavljene releje distantne zaštite pa tako postrojenje A ima relej koji je usmjeren prema postrojenja B, postrojenje B ima dva releja, jedan usmjeren prema postrojenju A, a drugi usmjeren prema postrojenja C, relej u postrojenju C usmjeren je prema postrojenju B, što znači da ukupno postoje 4 releja, odnosno po 2 na svakom od vodova.

$t_I, t_{II}, t_{III}$  predstavljaju vremensku odgodu djelovanja unutar prve druge i treće zone distantnog releja,  $Z_I, Z_{II}, Z_{III}$  su impedancije unutar zona releja koje su proporcionalne odgovarajućim udaljenostima  $l_I, l_{II}, l_{III}$ .

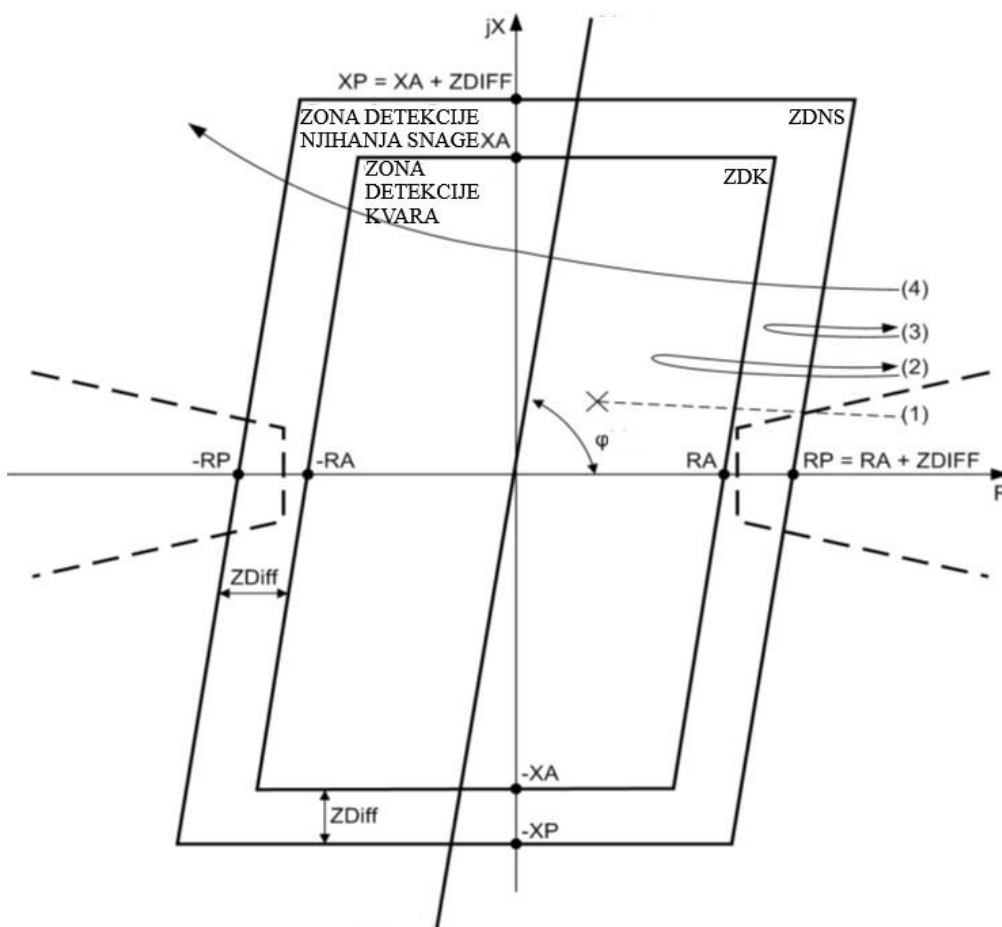


Sl. 3.5. Koordiniranje vremenskih karakteristika više releja [6]

Sa slike 3.5 vidi se koordinacija vremenskih karakteristika, obično se nastoji postaviti zaštita na taj način da se veći dio voda štiti prvom zonom, budući da u spomenutoj situaciji imamo slučaj sa prijenosnim vodovima, koji su napajani sa obje strane, distantna zaštita će u ovoj situaciji isključiti vod u kvaru na oba njegova kraja. Kako bi bili sigurni da će oba releja odraditi ispravno te da će poslati nalog prekidaču za isključenje u isto vrijeme, releje povezujemo optičkim kabelom, kako bi releji mogli međusobno komunicirati. Ova komunikacija se postavlja upravo iz tog razloga, kako bi se vod uvijek uključio unutar vremena prve zone. Ukoliko se kvar dogodi na 90% dužine voda od postrojenja A, vidimo na slici 3.5 da relej postavljen u postrojenju A, kvar vidi u svojoj drugoj zoni, dok je isto to mjesto, prva zona releju koji se nalazi u postrojenju B. Tada će relej u postrojenju B preko optičke veze, poslati komunikacijsku poruku releju A, da „vidi“ kvar unutar svoje prve zone te će oba releja poslati nalog prekidačima da reagiraju unutar vremena postavljenom za prvo zonu.

### 3.1.3. Njihanje snage

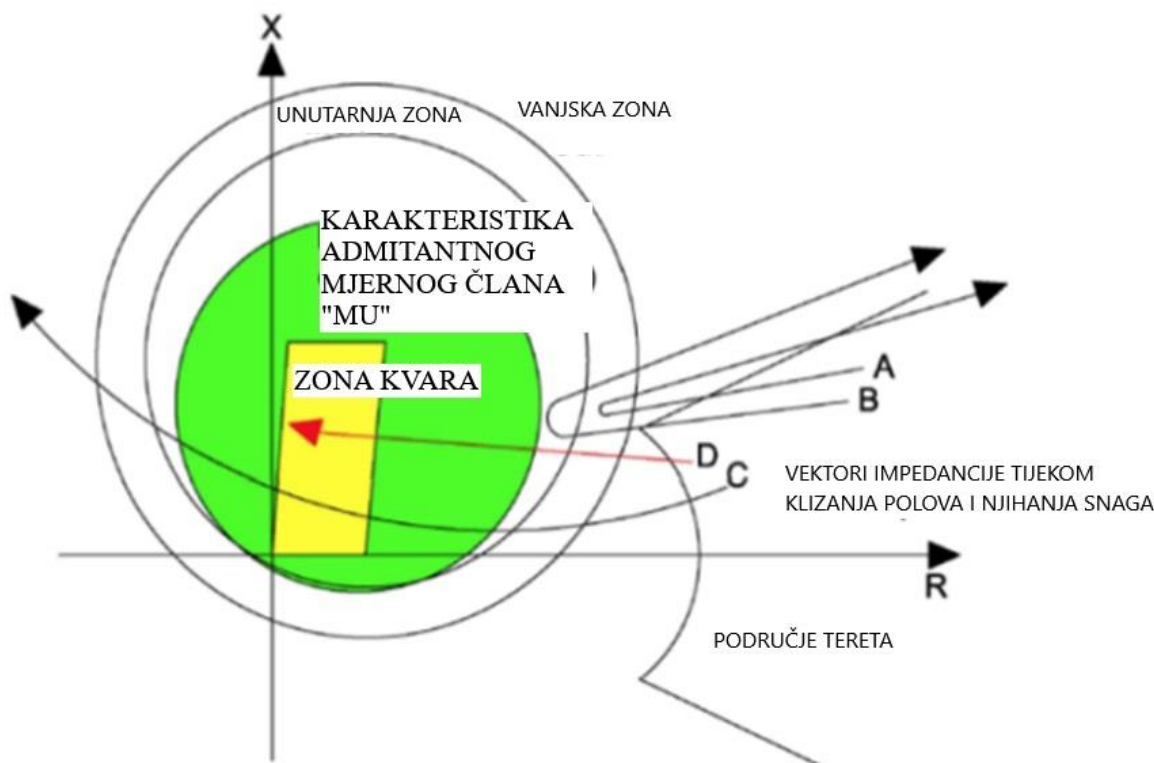
Njihanje snage je prijelazna pojava koja se javlja zbog različitih pojava u mreži, uključujući kvarove, uklapanje ili isklapanje velikih tereta, automatskog ponovnog uklopa i sl. Njihanje snage u elektroenergetskom sustavu može uzrokovati nepravilan rad distantnih releja, zbog prirode kvara koji nastaje prilikom pojave njihanja snaga, impedancija koju mjeri distantni relej u trenutku nastanka tog poremećaja može biti pogrešna vrijednost koja se pojavi unutar neke od zona distantnog releja. Neželjeni nalog za isklupom prekidača distatnog releja u tom trenutku može dovesti do narušavanja stabilnosti elektroenergetskog sustava i uzrokovati kaskadna ispadanja dalekovoda. Kako bi se izbjegli neželjeni nalozi za isklupom prekidača distatnih releja u ovakvim slučajevima, numerički releji opremljeni su posebnom zaštitnom funkcijom blokiranja prorade zaštite prilikom pojave njihanja snaga (eng. *Power Swing Block - PSB*). Blokiranje se temelji na mjerenju impedancije, tj. trofaznom mjerenju struje i napona te prati brzinu promjene vektora impedancije. Ako se promjena impedancije dogodi u mreži, algoritam releja učita da se zapravo radi o njihanju snage, a ne o kratkom spoju, blokirat će proradu releja.



Sl. 3.6. proradna karakteristika algoritma za detekciju njihanja snage [6]

Promjenu impedancije u mreži relej gleda kao promjenu smjera i brzine vektora, promjena impedancije ovisi o tome što se dogodilo u mreži, da li se radi o isklapanju ili uklapanju tereta, kratkog spoja ili o njihovoj snage. Releji će iz tog razloga gledati brzinu promjene te smjer vektora impedancije. Upravo se za to koristi proradna karakteristika releja na slici 3.6. Na slici 3.6 prikazane su dvije poligonalne karakteristike, ZDNS (zona detekcije njihovih snaga) i ZDK (zona detekcije kvara), poligonalna karakteristika ZDNS nalazi se izvan ZDK te se nalazi na određenoj udaljenosti koja se podešava unutar releja za određeni iznos impedancije, u ovom slučaju je to ZDiff (vrijednost impedancije podešene unutar releja). Mjerenje brzine prolaska vektora impedancije između spomenutih poligonalnih karakteristika koristi se kao temelj za detekciju njihovih snaga. U normalnom stanju mreže, vektor impedancije se nalazi u području koje je naznačeno iscertanom linijom, ukoliko se dogodi kratki spoj, vektor impedancije će vrlo brzo promijeniti mjesto te će preći u područje gdje distantna zaštita šalje komandu prekidaču za isklon, to mjesto se nalazi unutar prodane karakteristike ZDK, a na slici je naznačeno sa linijom koja ima oznaku 1. Ukoliko se dogodi njihovih snaga, vektor mjerene impedancije će imati drugačiju putanju te sporiju promjenu u odnosu na slučaj kratkog spoja, putanja je označena sa brojevima 2 i 3, dok oznaka 4 predstavlja slučaj kada dolazi do gubitka sinkronizma, tada će vektor u potpunosti proći kroz područje prorade distantne zaštite. Spomenute putanje 2, 3 i 4 također imaju situaciju kada vektor impedancije ulazi unutar ZDK karakteristike, ali taj vektor ima dosta sporiji ulaz unutar spomenute karakteristike nego li u slučaju kratkog spoja. Brzina prolaska vektora se mjeri između ZDNS i ZDK karakteristike i to u trenutku kada vektor presječe ZDNS karakteristiku unutar releja nalog za start prima vremenski član koji mjeri vrijeme koje je potrebno od tog trenutka do trenutka kada će vektor impedancije presjeći ZDK karakteristiku, Ukoliko je to vrijeme dovoljno kratko, znači da je nastupio kratki spoj, suprotno radi se o njihovoj snage. Samo podešavanje algoritma numeričkog releja je znatno složenije od spomenutoga te se odluka o isklonu ili blokiranju isklopa prekidača donosi na puno više kriterija.

Osim spomenute metode, postoji još nekoliko metoda, koje rade na sličan način kao prethodno spomenuta metoda, pomoću kojih relej donosi odluku radi li se o pojavi njihovih snaga ili je nastupio kratki spoj.



Sl. 3.7. MHO prorađna karakteristika za detekciju njihanja snaga [9]

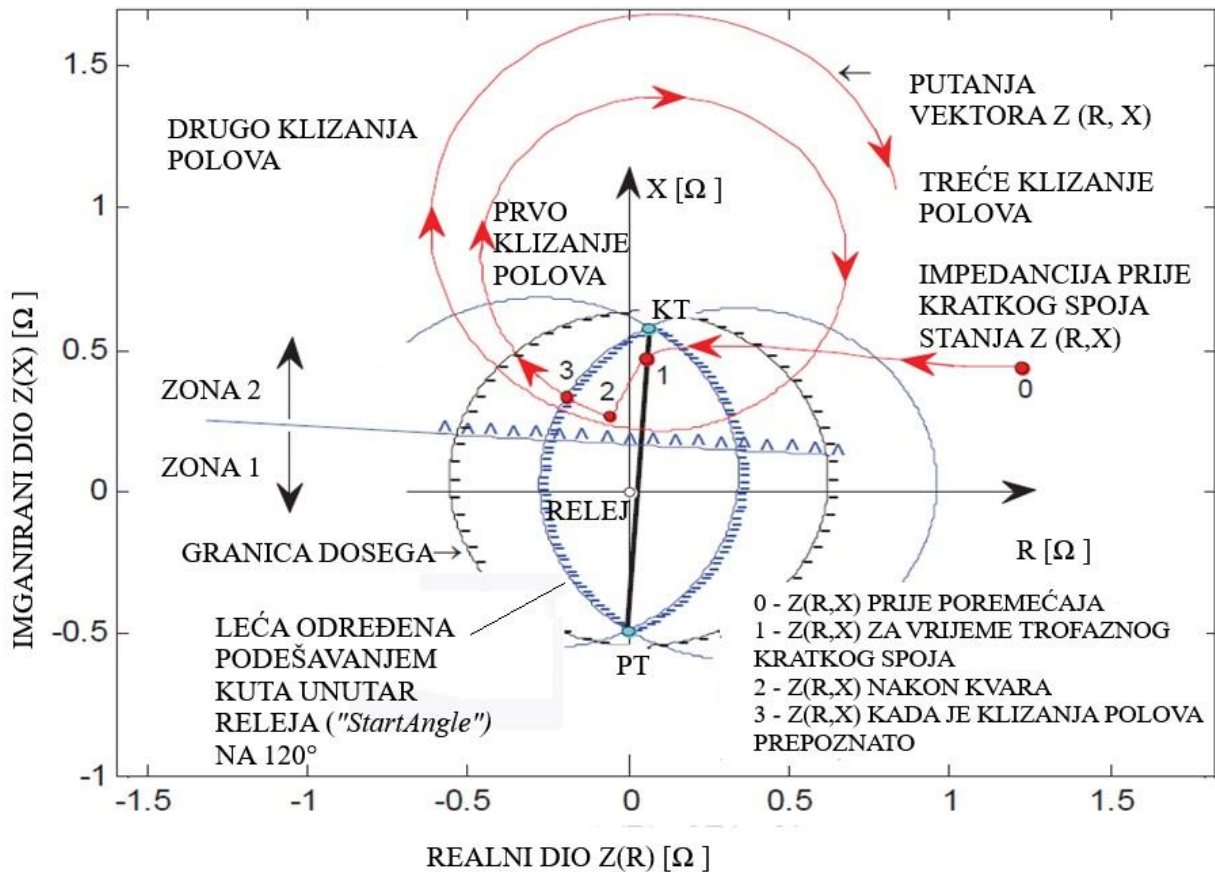
Kada kriteriji za detekciju njihanja snaga nisu zadovoljeni, karakteristika za detekciju klizanja polova se uzima u obzir, tada se privremeno blokiraju sve zone distantnog releja te se mjeri vektor impedancije  $Z$  te kada izađe iz područja koje predstavlja njihanje snage, vrijednost komponente  $R$  se provjerava, ukoliko ona zadržava isti predznak kao u točki ulaska unutar karakteristike to ukazuje na pojavu njihanja snage te njezino stabiliziranje. No ukoliko vektor prođe kroz MHO karakteristiku znači da dolazi do gubitka sinkronizma, opisan slučaj je označen oznakom  $C$  na slici 3.7. Oznaka  $D$  predstavlja brzu promjenu vektora impedancije i njezin ulazak u prorađnu karakteristiku te relej šalje nalog prekidaču, a oznake  $A$  i  $B$  predstavljaju sporu promjenu vektora impedancije te naznaku da se radi o njihanju snage.

### 3.1.4. Klizanje polova

Klizanje polova je stanje u kojem generator doživljava veliko povećanje kutne razlike elektromotorne sile s drugim generatorima ili dijelovima sustava na koje je spojen, obično se ta promjena „osjeti“ nakon većeg poremećaja elektroenergetskog sustava. Ovisno o veličini

poremećaja jedan ili više generatora može izgubiti sinkronizam sa ostatkom sustava. Kada je generator i dalje spojen na mrežu, ali je van sinkronizma s obzirom na ostale generatore spojene na istu mrežu, nastalo stanje zovemo klizanje polova. Ako kut rotora pređe kritičnu vrijednost kuta, tada generator ispada iz sinkronizma, to stanje može također biti uzorkovano kvarovima u sustavima automatskog reguliranja napona. Nestabilna njihanja (kada postoje pravi uvjeti za klizanje polova) zahtijevaju isključivanje generatora ili eventualnu izolaciju sustava kako bi se minimizirao poremećaj. Takva stanja proizvode visoke vrijednosti vršnih struja, naprezanje namota generatora te pulsirajuće okretno momente i mehaničke rezonancije unutar generatora što obično zahtjeva odvajanje generatora od sustava. Ovo odvajanje od sustava se obično postiže relejima koji u sebi imaju funkciju prepoznavanja stanja klizanja polova. Ukoliko se radi o malom poremećaju, sustav je i dalje stabilan, a kut rotora oscilira oko vrijednosti kuta koju je imao u stabilnom stanju. Takav „stabilan“ sustav može, ali i ne mora biti dobro prigušen. U slučaju stabilne oscilacije, nije poželjno da zaštitni relej da naredbu za isključenje prekidača. Nakon dinamičkih događaja kao što su promjene opterećenja, automatski ponovni uklopi ili poremećaji u sustavu, generatori koji su izloženi oscilacijama moraju se prilagoditi novo nastaloj situaciji i novoj ravnoteži sustava

Funkcija prepoznavanja klizanja polova temelji se na mjerenju impedancije i analiziranju fazora impedancije. Spomenuta zaštita može se koristiti i kod zaštite generatora i kod zaštite dalekovoda. Glavna svrha funkcije je detektirati, procijeniti i poduzeti potrebne mjere tijekom pojave klizanja polova u sustavu. Obično se detektiraju uvjeti klizanja polova i odvaja se generator od mreže što je prije moguće, nakon prvog klizanja, ukoliko je centar oscilacije unutar zone 1, što obično obuhvaća generator i transformator. Ako se centar oscilacije nalazi dalje u elektroenergetskom sustavu, recimo u zoni 2, funkcija zaštite će dozvoliti više od jednog klizanja polova prije nego relej pošalje nalog za izbacivanje generatora van mreže kako bi ga zaštitio. Ukoliko postoji više releja sa funkcijom prepoznavanja klizanja polova unutar sustava, onda će prvi proraditi onaj relej koji „vidi“ centar oscilacija unutar svoje prve zone. U uravnoteženim i stabilnim uvjetima, generator radi s konstantnim kutom rotora (kut snage), predajući djelatnu snagu sustavu, koja je približno jednaka ulaznoj mehaničkoj snazi na osovinama generatora. Struja i naponi su konstantni i stabilni. Stanje klizanja polova okarakterizirano je periodičkim promjenama u kutu rotora, što dovodi do velikih promjena snage, tako da imamo i periodične promjene u kutnoj brzini, kutu rotora, strujama i naponima. Kada su prikazane unutar komplekse ravnine impedancije, ove promjene karakteriziraju ciklične promjene u impedanciji opterećenja  $Z$  ( $R$ ,  $X$ ), izmjerenoj na stezaljkama generatora.



Sl. 3.8. Slučaj gubitka sinkronizma generatora nakon nastanka kratkog spoja koji nije očišćen dovoljno brzo [10]

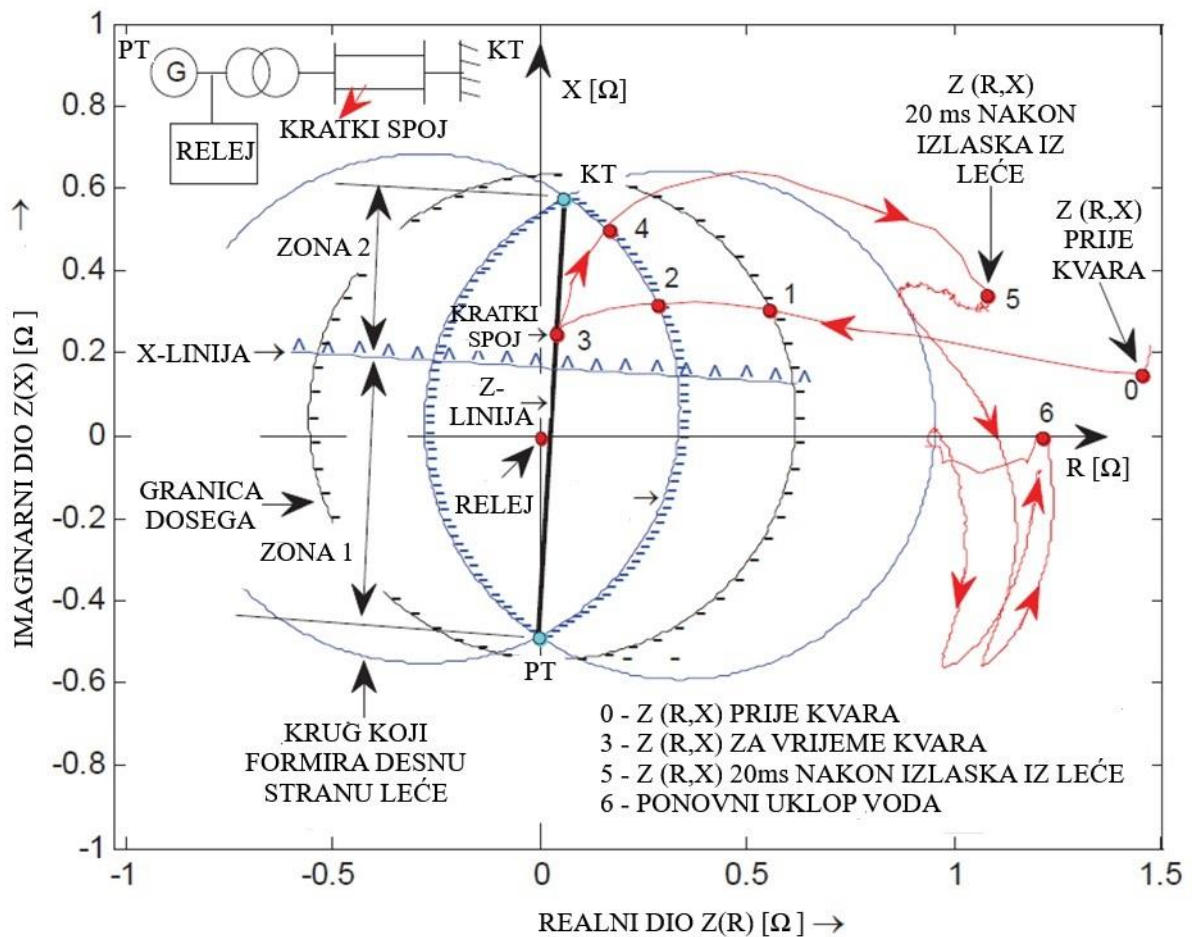
U normalnim uvjetima, kada štice generator opskrbljuje radnom i jalovom energijom sustav, kompleksna impedancija  $Z(R, X)$  se nalazi u prvom kvadrantu, što je na slici 3.8 u točki 0. Ukoliko dođe do trofaznog kratkog spoja, centar oscilacija će biti u točki 1, budući da su sva tri napona jednaka ili približno jednaka nuli. U uvjetima kvara, generator je ubrzavao i kada je kvar konačno očišćen, kompleksna impedancija je skočila u točku 2 na slici 3.8, a tada je generator već izgubio korak, impedancija nastavlja svoju putanju sa desna na lijevo unutar koordinatnog sustava te se prvo klizanje polova ne može izbjeći, ukoliko generator nije odmah isključen, klizanje polova će se nastaviti. U uvjetima klizanja polova centar oscilacija je tamo gdje kompleksna impedancija  $Z(R, X)$  siječe liniju koja povezuje točke PT (početna točka) i KT (krajnja točka). Točka na liniji PT-KT gdje putanja  $Z$ , siječe liniju, može se mijenjati s vremenom i obično je funkcija unutarnjeg napona na oba kraja ekvivalentnog dvostrano napajanog sustava.

Mjerenje veličine, smjera i brzine promjene impedancije opterećenja u odnosu na terminale generatora pružaju pouzdan način otkrivanja da li je klizanje polova prisutno. Također, važno je i mjerenje kuta rotora. Kut rotora može se predstaviti kao kut između dvije zamišljene linije na slici 3.8, dvije linije koje povezuju točku 0, točka gdje je  $Z$  impedancija normalnog pogona, sa točkama



PT i KT. Te dvije zamišljene linije unutar normalnog stanja obično zatvaraju kut od 30 do 60 stupnjeva.

Suprotno od prethodnog slučaja, gdje je prikazano kako generator gubi sinkronizam, prikazat će se primjer gdje generator neće izgubiti sinkronizam zbog boljeg razumijevanja.

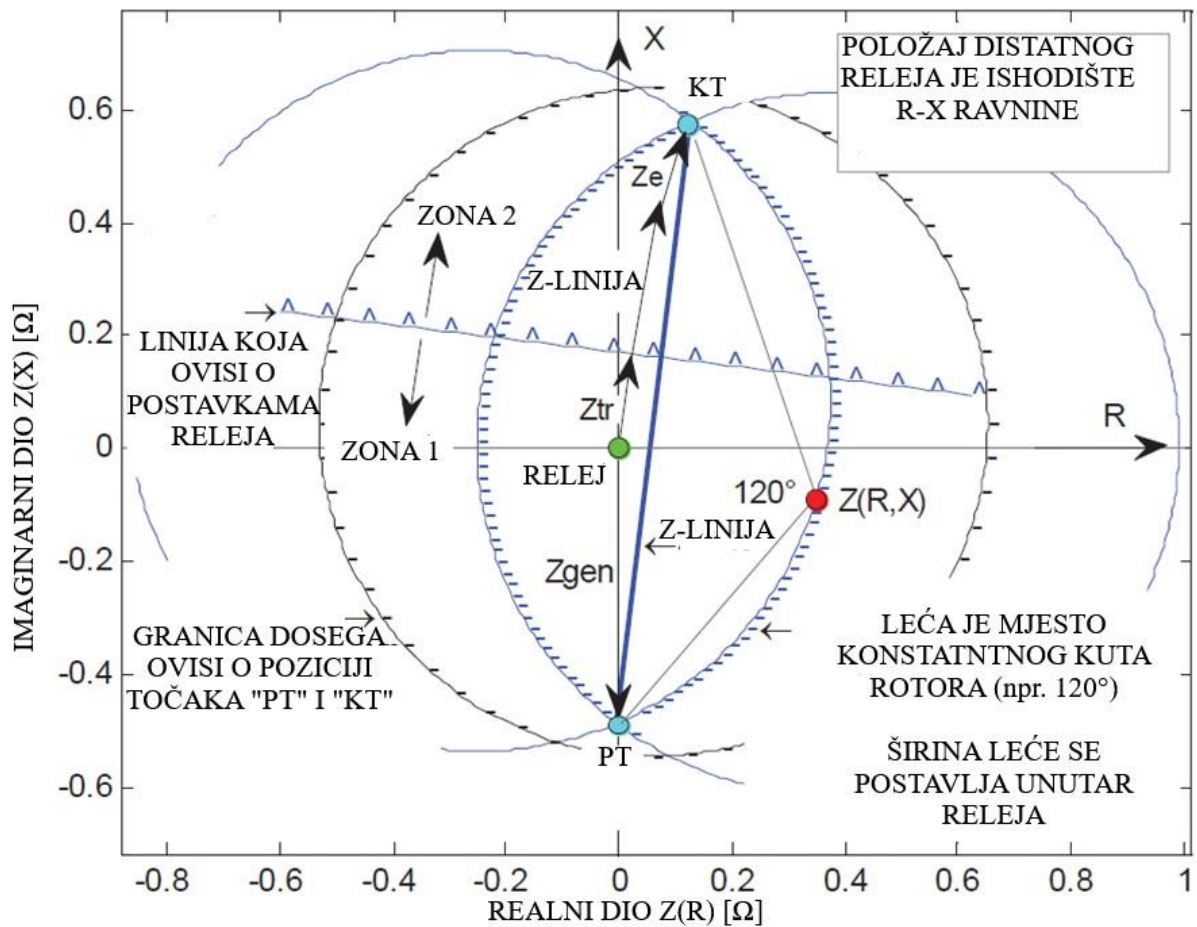


Sl. 3.9. Poremećaj koji ne izbacuje generator iz sinkronizma [10]

U stabilnom slučaju, koji je prikazan na slici 3.9, poremećaj u sustavu neće uzrokovati da generator izgubi sinkronizam, impedancija  $Z$ , izlazi (točka 4) iz karakteristike leće sa iste strane na koju je i ušla (točka 2) te nema ponovnog ulaza unutar karakteristike. U stabilnom slučaju, gdje generator ostaje u sinkronizmu, točka impedancija se vraća u prvi kvadrant te nakon završenih oscilacija, vraća se u normalnu poziciju, koju je imala prije poremećaja (točka 0) ili negdje u blizini nje.

Preduvjet da bi se mogla konstruirati odgovarajuća karakteristika leće je da sustav napajanja u kojemu postoji funkcija prepoznavanja klizanja polova, modelira se kao sustav sa dva generatora ili kao sustav jednog generatora i beskonačne sabirnice (eng. *Single Machine Infinite Bus -SMIB*). Karakteristika na slici 3.8 i 3.9 su dvije karakteristike jednake u veličini ali različito pomaknute,

MHO karakteristika postavljene tako da se preklapaju, rezultirajuća leća je karakteristika za impedanciju  $Z$ , kojoj je kut rotora konstantan i iznosi 110 ili 120 stupnjeva. Ukoliko se kut rotora približava toj vrijednosti onda postoji velika vjerojatnost od pojave uvjeta za klizanje polova. Granica doseg konstruirana se automatski pomoću algoritma te je 10% širi od kruga koji ima PT-KT liniju kao promjer (tj. karakteristika klizanja polova koja odgovara kutu snage rotora od 90 stupnjeva.) na slici 3.10 prikazana je konstrukcija karakteristika leća za elektroenergetski sustav.



Sl. 3.10. Konstrukcija karakteristike leće[10]

### 3.1.5. Detektiranje gubitka sinkronizma

Uvjeti gubitka sinkronizma okarakterizirani su periodičnim promjenama kuta rotora, koje dovodi do promjena snage pa postoje i promjene brzine vrtnje, struje i napona. Kada su prikazane na kompleksnoj ravnini, ove promjene karakterizira ciklična promjena impedancije  $Z(R, X)$  mjerena na stezaljkama generatora. Kada je generator van sinkronizma nastupa klizanje polova. Kako bi se prepoznalo klizanje polova, točka impedancije  $Z$  mora proći leću sa desne na lijevu stranu u slučaju generatora, a u suprotnom smjeru ukoliko se radi o motoru. Još jedan od uvjeta je taj da put koji prelazi točka impedancije, preko leće ne traje kraće od minimalnog vremena prijelaza, obično se radi o intervalu od 40 od 60 milisekundi. Navedeno vrijeme koristi se kako bi se razlikovao kvar od poremećaja koji neće izbaciti generator izvan sinkronizma. Na slici 3.8 neke od važnih točaka putanje impedancije  $Z$  su određene. Točka 0, impedancija normalnog pogona, Točka 1, impedancija pod trofaznim kvarom sa malom vrijednošću otpora. Točka 2, je vrijednost impedancije odmah nakon čišćenja kvara. Vrijeme potrebno da točka  $Z$  dođe iz točke 0 u točku 1 je obično 20milisekundi. Impedancija tada ima smjer na grafu sa desna na lijevo, tj. izlazi iz karakteristične leće na suprotnu stranu od koje je ušla, kada se to dogodi, prvo klizanje polova se već dogodilo te ukoliko se generator ne od spoji, očekuje se veći broj klizanja polova i naravno gubitak sinkronizma ukoliko se generator ne odspoji od mreže unutar kritičnog vremena isključenja. Slika 3.8 prikazuje dvije pojave klizanja polova.

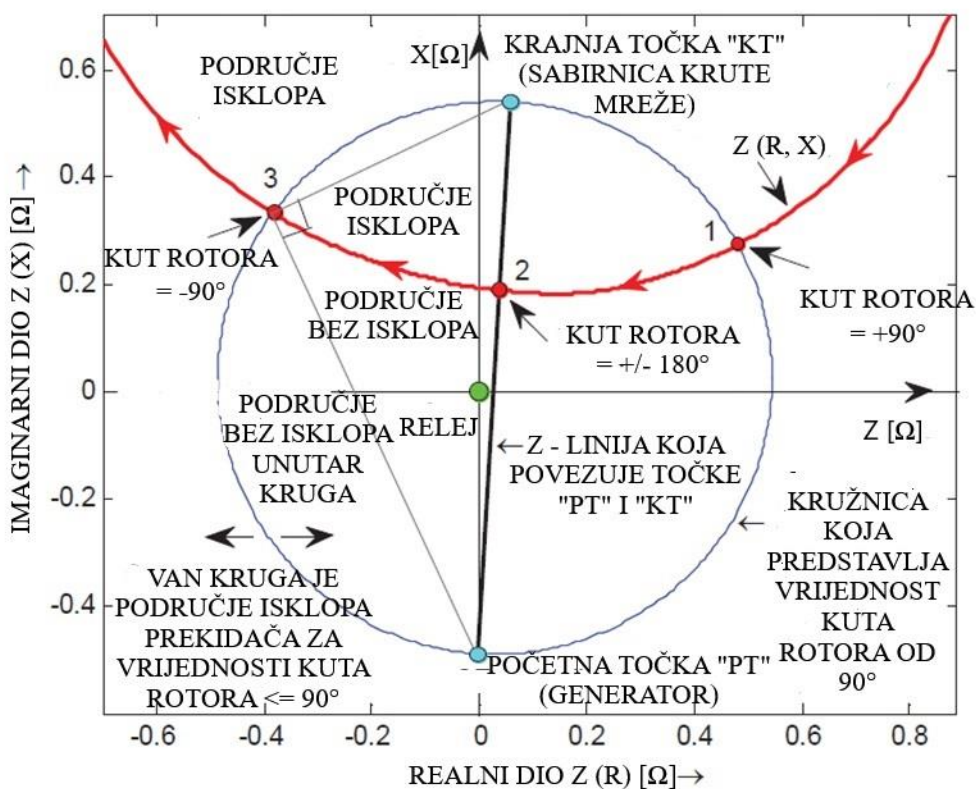
### 3.1.6. Štićenje prekidača prilikom gubitka sinkronizma

Iako su pojave gubitka sinkronizma rijetke, funkcija prepoznavanje klizanja polova releja mora štititi i sam prekidač. Elektromehanička opterećenja stvaraju naprezanja na prekidaču, a cilj je minimizirati ta opterećenja. Maksimalna struja koja se može pojaviti kod gubitka sinkronizma, nekada može biti i veća nego ona koja se pojavi kada se kratki spoj, kao što je prikazano na slici 3.12 gdje je prikazano da je kvar nastao u 200 milisekundi, očišćen je na vrijednosti od 700 milisekundi, ali struja i dalje raste. Takve vrijednosti struja koje se mogu pojaviti, najveću vrijednost će imati kada je kut rotora 180 stupnjeva, a najmanju kada je kut rotora 0 stupnjeva, Otvaranje prekidača prilikom kuta rotora od 180 stupnjeva kada se radi o najvećoj struji, može biti kobno za sam prekidač. Postoje dvije metode kojima se naprezanje prekidača smanjuje.

#### **Prva metoda:**

Prekidaču je jedino dopušteno prekinuti struju kada je kut rotora manji od vrijednosti koja je postavljena u releju te kada se kut smanjuje prema 0 stupnjeva. Preporučena vrijednost postavljanja tripa unutar releja je ispod 90 stupnjeva (npr. 60 stupnjeva). Na slici 3.11 prikazan je

primjer gdje je taj kut unutar releja postavljen na 90 stupnjeva. Mho krug predstavlja površinu u kompleksnoj ravnini impedancije  $Z$ , gdje je kut rotora na spomenutih  $90^\circ$ . Ako se prekidač ne smije otvoriti prije nego kut rotora postigne vrijednost od  $90$  stupnjeva na putu prema  $0$  stupnjeva, onda je jasno da kružnica razdvaja ravninu na područja za isklon prekidača i područja gdje nema uvjeta za isklon prekidača. Ako je kut unutar releja postavljen na vrijednost  $90$  stupnjeva, jasno je da će nalog za isklonom prekidača biti poslan prekidaču u točki 3, kada točka impedancije  $Z$  izlazi van kruga. Do tada, logika releja je već utvrdila da je došlo do gubitka sinkronizma generatora i odluka o isključivanju generatora je već donešena.

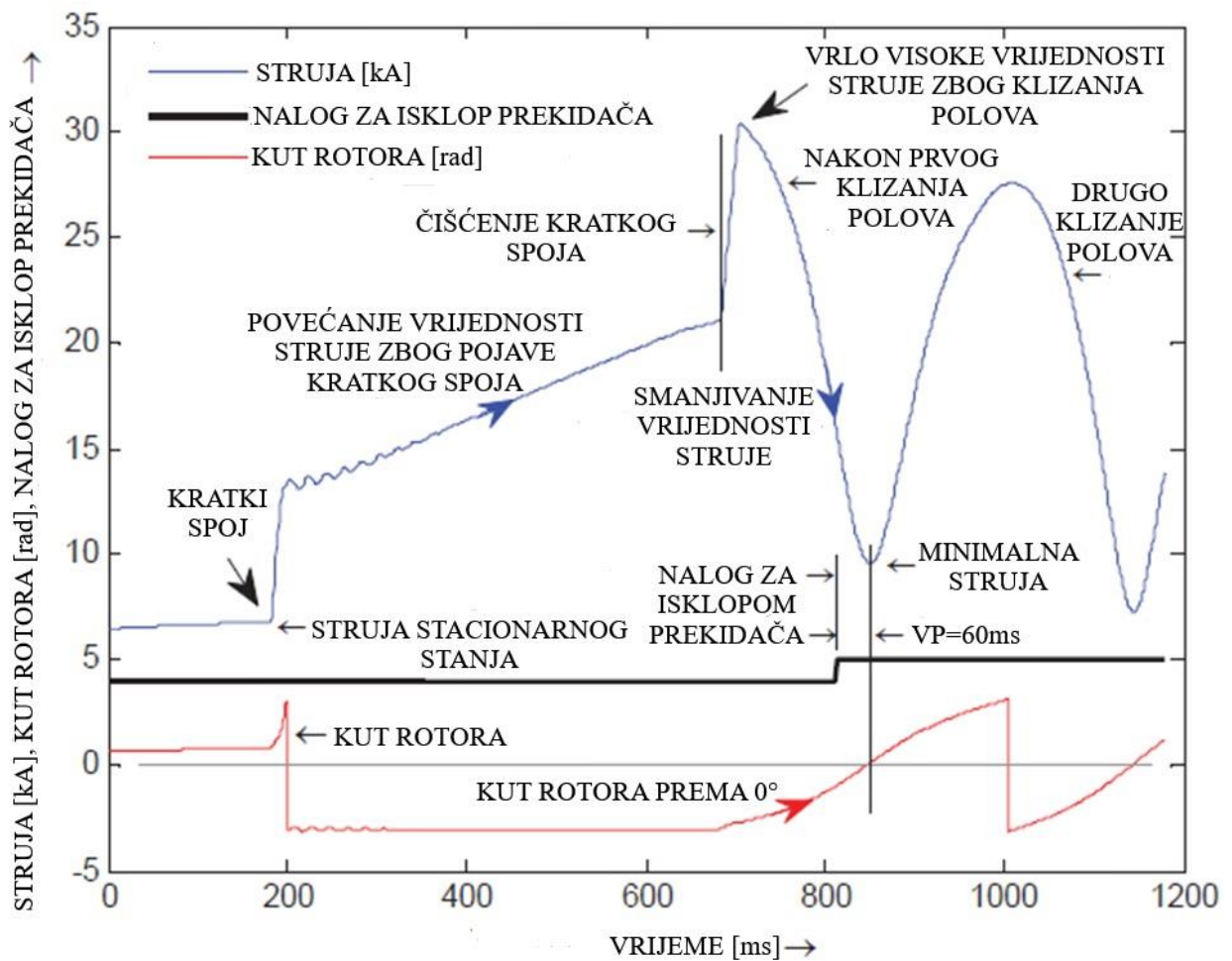


Sl. 3.11. Imaginarna pomaknuta MHO karakteristika [10]

### Druga metoda:

Ukoliko je poznato vrijeme koje je potrebno prekidaču da prekine struju kvara (te je u logici releja postavljeno kao „VP“ – vrijeme prekidača) onda je moguće pokrenuti nalog za isklonom prekidača približno „VP“ milisekundi prije nego kut rotora poprimi vrijednost  $0$  stupnjeva, gdje će vrijednost struje biti minimalna moguća. Na slici 3.12 kontakti prekidača se otvaraju na približno  $0$  stupnjeva za „VP“ podešenje od  $60$  milisekundi. Točno vrijeme kada će prekidač pokrenuti otvaranje

kontakta se određuje pomoću rješavanja takozvane „synchronizer“ diferencijalne jednačbe. Ukoliko je vrijednost „VP“ ostavljena na zadanim vrijednostima, što je nula, onda će alternativa metoda biti primijenjena, a to je prva metoda koja gleda kut rotora te ga uspoređuje sa postavkama unutar releja. Ukoliko je „VP“ vrijednost postavljena te je vrijednost veća od 0 milisekundi, primjer 20 milisekundi, tada relej automatski ignorira prvu metodu te primjenjuje drugu, tačniju metodu.



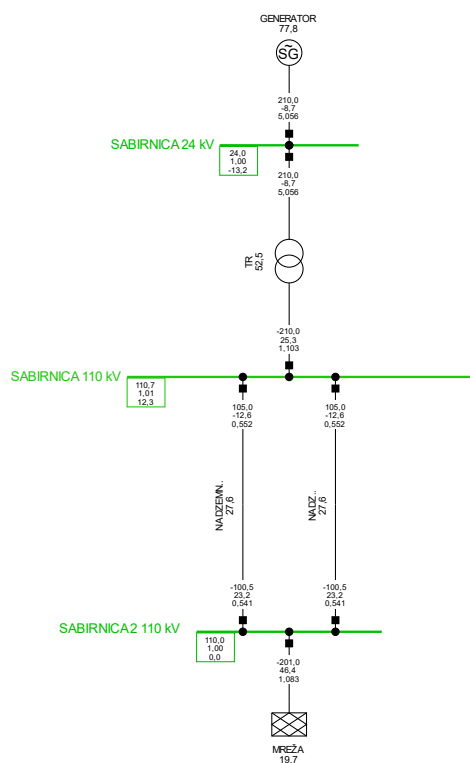
Sl. 3.12. Metoda kada je poznato vrijeme potrebno da prekidač prekine struju kratkog spoja [10]

## **4. ANALIZA STABILNOSTI GENERATORA**

U ovom poglavlju biti će opisan eksperimentalni dio rada. Analizirati će se stabilnost generatora u dva različita modela, jedan preuzet iz testnog sustava DIgSILENT PowerFactory, drugi kreiran na temelju prvog modela sa malim izmjenama. Umjesto naponskog izvora na kraju mreže postavljena je kruta mreža. Modeliranje mreže i simuliranje događaja unutar modelirane mreže odrađeno je u programskom paketu DIgSILENT PowerFactory. Simulacija je u ovom radu odrađena u dva dijela, prvi dio je naglasak samo na stabilnost sustava, određivanje kritičnog vremena isklopa generatora te kritičnog kuta. Unutar simulacije postavljena su dva događaja, nastup kratkoga spoja te čišćenje kratkoga spoja (simulacija prolaznog kvara), drugi dio je naglasak na zaštitu generatora prilikom nastupa kratkoga spoja, uloga releja distantne zaštite te algoritam za prepoznavanje da li se radi o stvarnom kratkom spoju, prolaznom kvaru ili se dogodio jedan od događaja promjene opterećenja u mreži, poput APU, uključivanja motora velikih snaga, odnosno uklapanje ili isklapanje velikih tereta[11].

### **4.1. Osnovni slučaj tranzijentne stabilnosti**

Na slici 4.1. prikazan je model mreže koji se sastoji od generatora, tri sabirnice, transformatora, paralelnih vodova te krute mreže. Tijekom ovih simulacija pozornost će biti na tranzijentnoj stabilnosti prilikom pojave kratkoga spoja na različitim udaljenostima od generatora. Oba nadzemna voda su bakreni vodiči te im je ukupna dužina 200 km. Na slici 4.2 prikazano je stacionarno stanje generatora. Kratki spoj će se simulirati na jednom od paralelnih vodova te će isti nastupiti 0.1 sekundu nakon početka simulacije. Simulirati će se tri slučaja, kratki spoj na 10% ukupne udaljenosti od generatora, 40% te 80% ukupne udaljenosti nadzemnog voda. U tablicama 4.1 i 4.2 prikazani su podaci generatora i transformatora korištenog u modelu za slučaj tranzijentne stabilnosti.



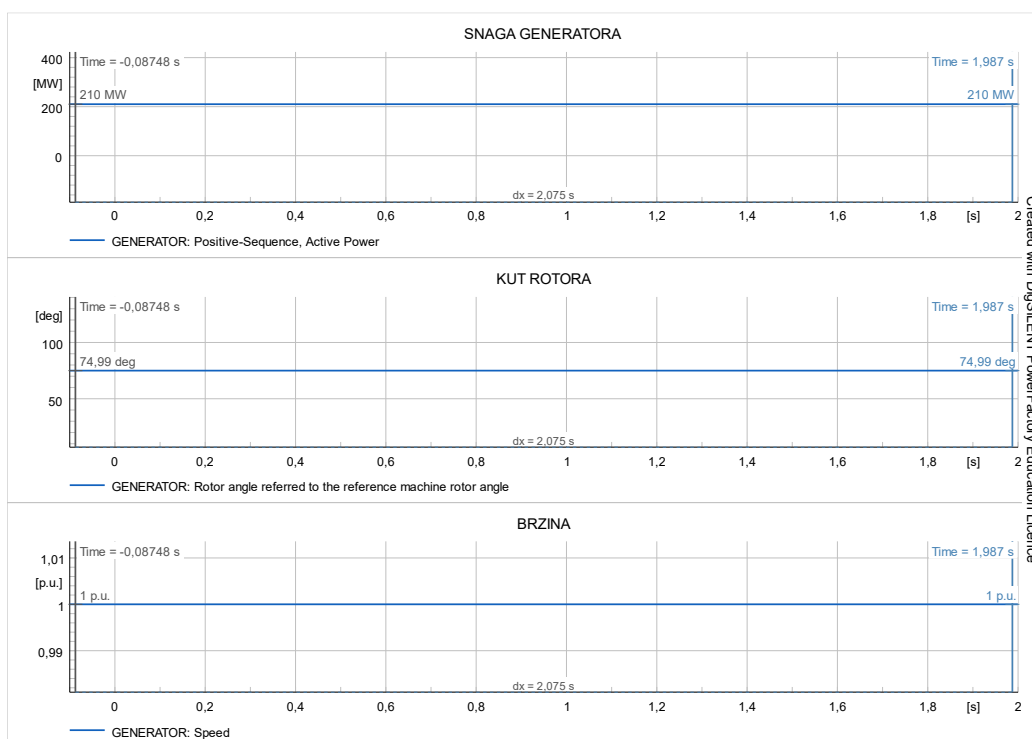
Sl. 4.1. Prikaz osnovnog modela u stacionarnom stanju

Tablica 4.1. Podaci generatora

|                              | <i>IZNOS</i> | <i>JEDINICA</i> |
|------------------------------|--------------|-----------------|
| <i>nazivna privdna snaga</i> | 270          | MVA             |
| <i>nazivni napon</i>         | 24           | kV              |
| <i>nazivna radna snaga</i>   | 210          | MW              |
| <i>cosφ</i>                  | 1            |                 |
| <i>grupa spoj</i>            | YN           |                 |

Tablica 4.2. Podaci transformatora

|                              | <i>IZNOS</i> | <i>JEDINICA</i> |
|------------------------------|--------------|-----------------|
| <i>nazivna privdna snaga</i> | 400          | MVA             |
| <i>niža naponska razina</i>  | 24           | kV              |
| <i>Viša naponska razina</i>  | 110          | kV              |
| <i>uk</i>                    | 15           | %               |
| <i>grupa spoj</i>            | Ynd5         |                 |

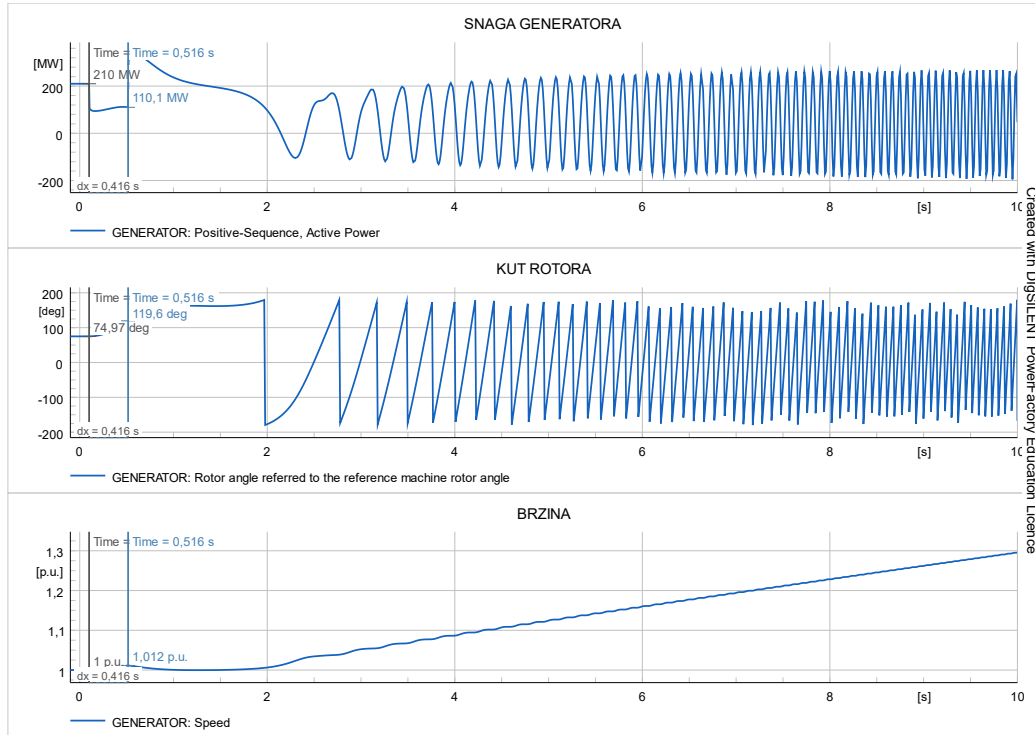


Sl. 4.2. Prikaz snage, brzine i kuta rotora generatora

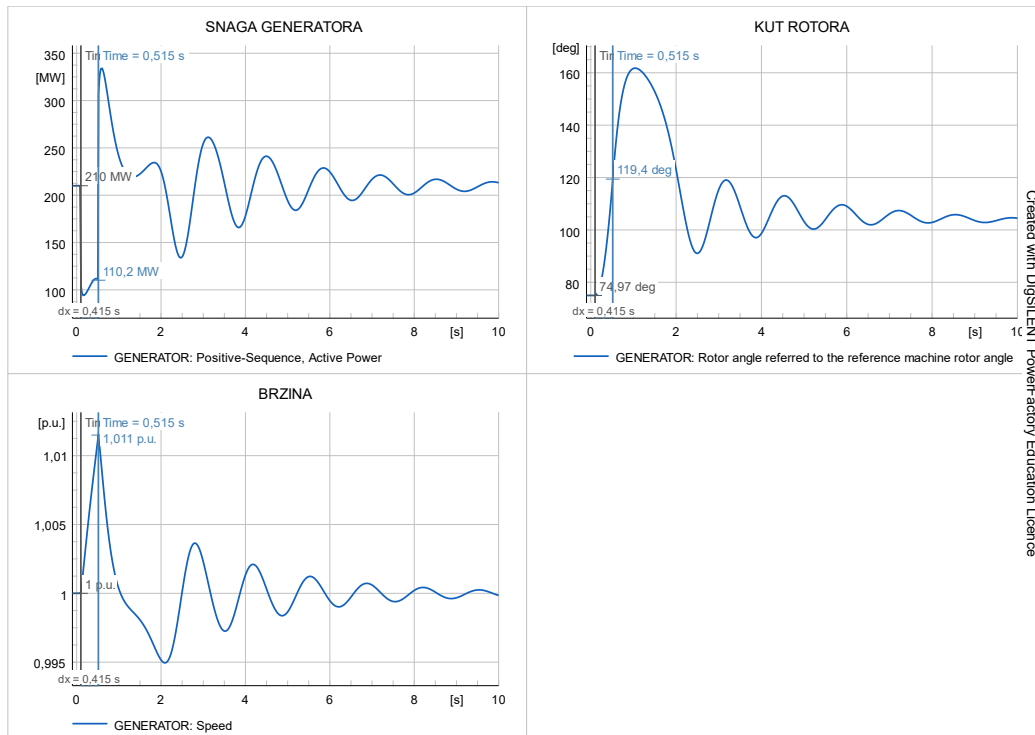


## 4.2. Prolazni kvar

Slučaj prolaznog kvara, kratkoga spoja koji se dogodio na prvom dalekovodu sa slike 4.1 na 40% ukupne dužine dalekovoda, kratki spoj je nastupio 0.1 sekundu nakon početka simulacije



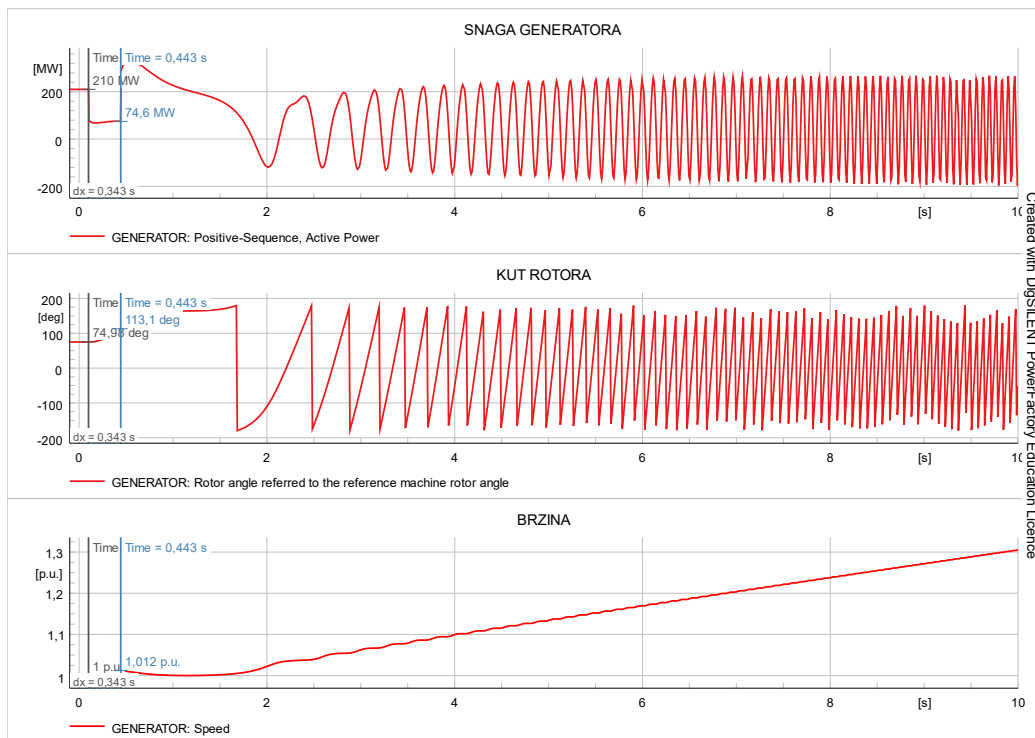
Sl. 4.3. Generator gubi sinkronizam sa mrežom, kvar na 40% dužine voda



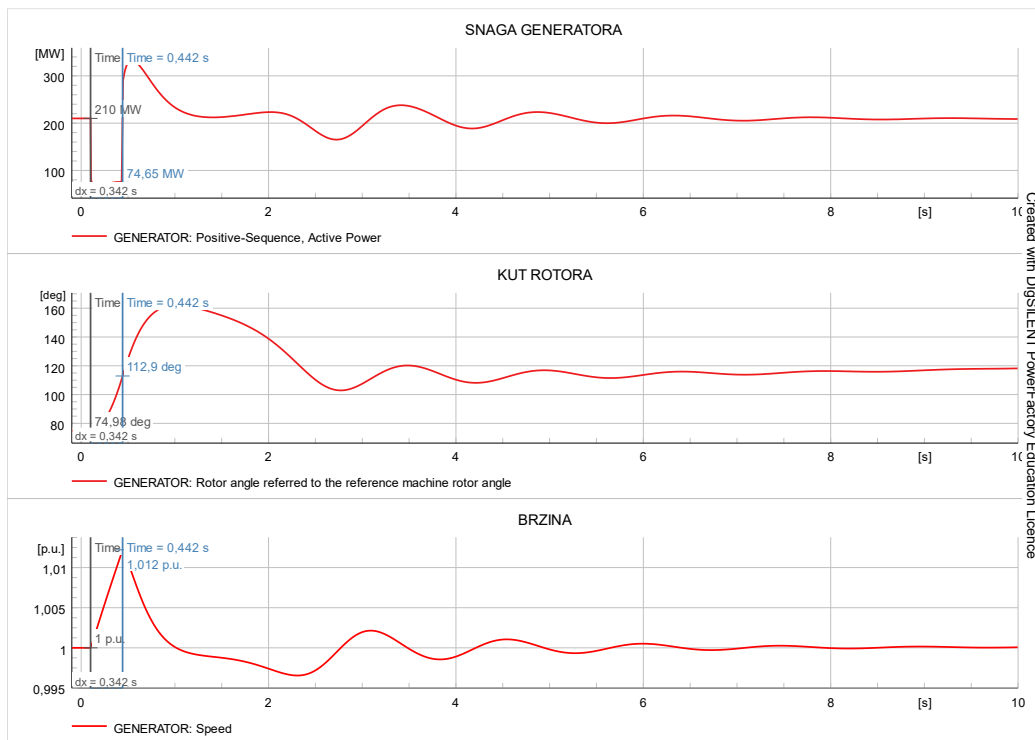
Sl. 4.4. Generator zadržava stabilno stanje, kvar na 40% dužine voda

Na gornjim grafovima prikazano je da nakon simulacije kvara na 40% ukupne dužine dalekovoda, generator u prvom slučaju (slika 4.3.) ispada iz sinkronizma iz razloga što je vrijeme čišćenja kvara veće od kritičnog vremena čišćenja kvara za generator u primjeru. Na slici 4.4. prikazano je da generator nakon kvara ostaje u sinkronizmu sa mrežom te nakon određenog vremenskog perioda vraća se u stanje koje je imao prije nastanka kvara. Iz grafa je vidljivo kritično vrijeme u kojem treba isključiti generator, a ono iznosi 0.415 s, dok kritičan kut iznosi  $119,4^\circ$ .

U drugom i trećem primjeru radi boljeg razumijevanja utjecaja mjesta kvara na kritično vrijeme isključenja simulirao se kvar na 10%, odnosno 80% dužine dalekovoda.

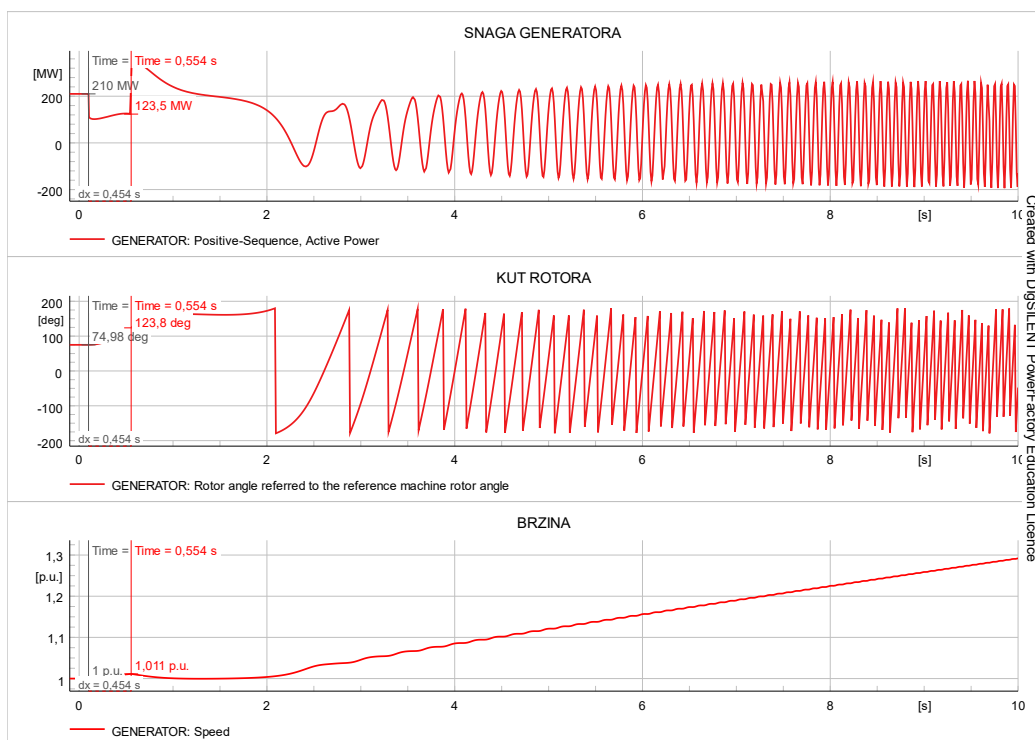


Sl. 4.5. Generator gubi sinkronizam sa mrežom, kvar na 10% dužine voda

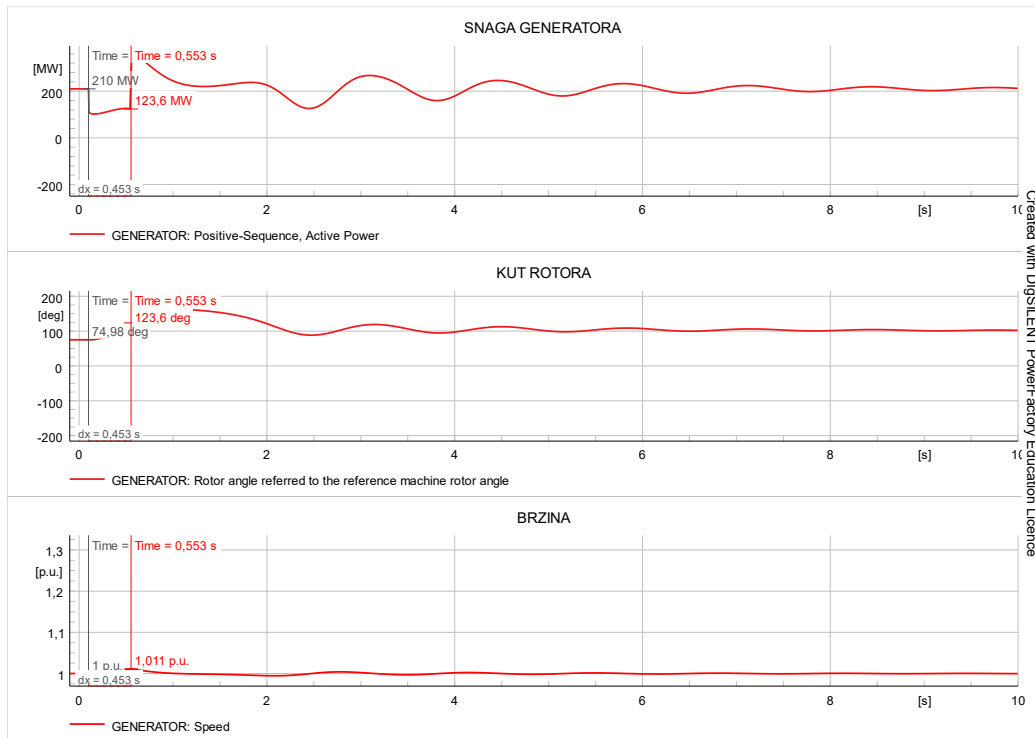


Sl. 4.6. Generator zadržava stabilno stanje, kvar na 10% dužine voda

U drugom primjeru (slike 4.5 i 4.6), kvar na 10% dužine dalekovoda prikazuje da je stabilno stanje generatora postignuto kada se kvar očisti nakon 0.342s, što daje kritičan kut od  $112,9^\circ$ . U usporedbi sa prvim slučajem vidimo da je kritično vrijeme manje nego u prvom slučaju.



Sl. 4.7. Generator gubi sinkronizam sa mrežom, kvar na 80% dužine voda

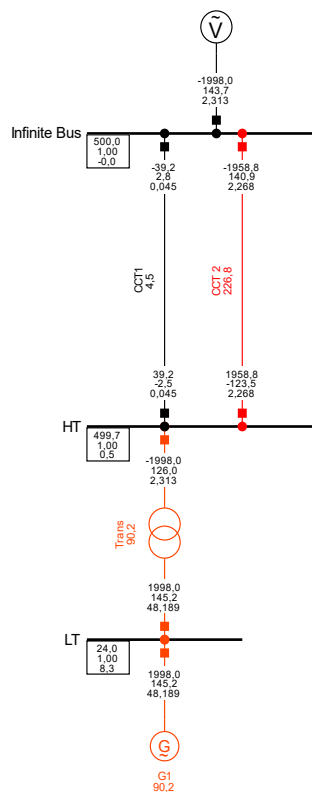


Sl. 4.8. Generator zadržava stabilno stanje, kvar na 80% dužine voda

U slučaju kvara na 80% dužine dalekovoda kritično vrijeme isključenja generatora iznosi 0.453s, a kritičan kut 123,6°. Iz čega je jasno vidljivo da mjesto nastanka kratkoga spoja igra veliku ulogu u vremenu potrebnom za isključivanje generatora kako ne bi došlo do gubitka sinkronizma ili nastanka kvara na generatoru.

### 4.3. Osnovni slučaj njihanja snage

Unutar ovog poglavlja razmatrat će se situacija stacionarnog stanja. Prikaz modela prikazan je na slici 4.1. Generator daje snagu od 1998 MW prema mreži, transformator transformira napon sa 24 kV razine na 500 kV razinu te od HT sabirnice paralelnim dalekovodima snaga ide prema sabirnici krute mreže. Prema slici 4.1. vidljivo je da je desni vod CCT2 opterećen više nego vod CCT1. U stacionarnom stanju na slici 4.10. prikazano je da snaga generatora konstanto ima vrijednost 1998 MW kao što je i postavljeno u simulacijskom modelu, kut rotora iznosi približno  $60.4^\circ$ , a slika 4.11. prikazuje samo jednu vrijednost impedancije viđenu od strane releja, zbog stacionarnog stanja, tijekom cijelog trajanja simulacije vrijednost impedancije se ne mijenja te je na grafu prikazana kao jedna točka, dok sa slike 4.12. može primijetiti da relej nije dao nikakav nalog za isključenjem prekidača te da se u mreži tijekom trajanja simulacije nije dogodio nikakav poremećaj. Tablice 4.3. i 4.4 prikazuju podatke generatora i transformatora korištenih u ovom simulacijskom modelu.



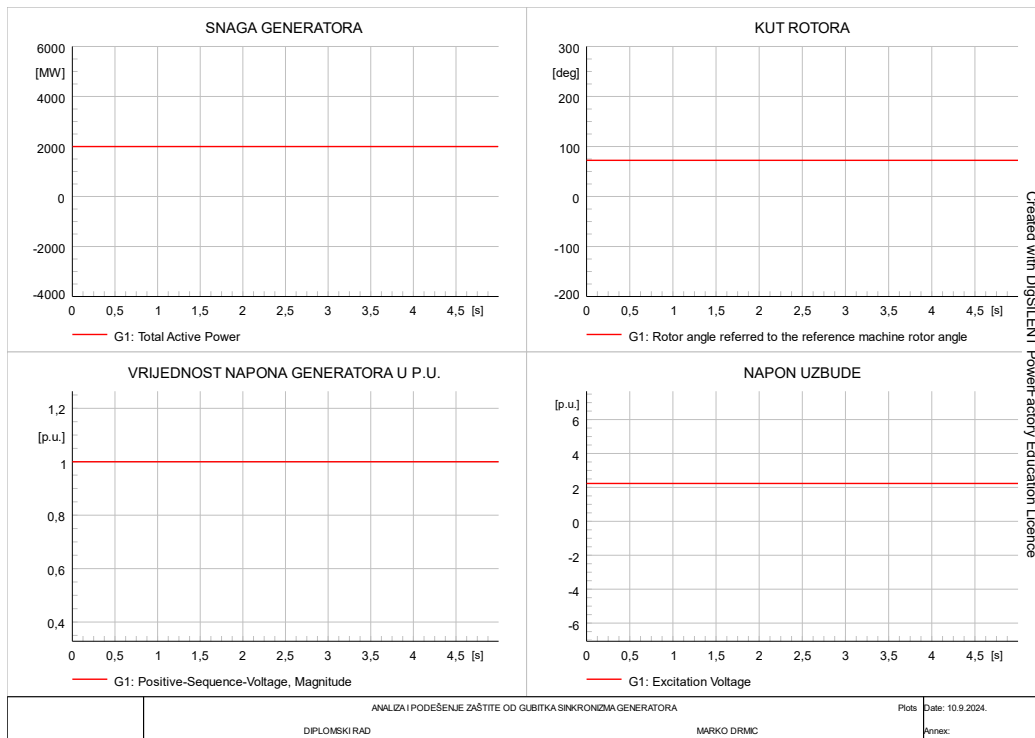
Sl. 4.9. Prikaz osnovnog modela u stacionarnom stanju

Tablica 4.3. Podaci generatora

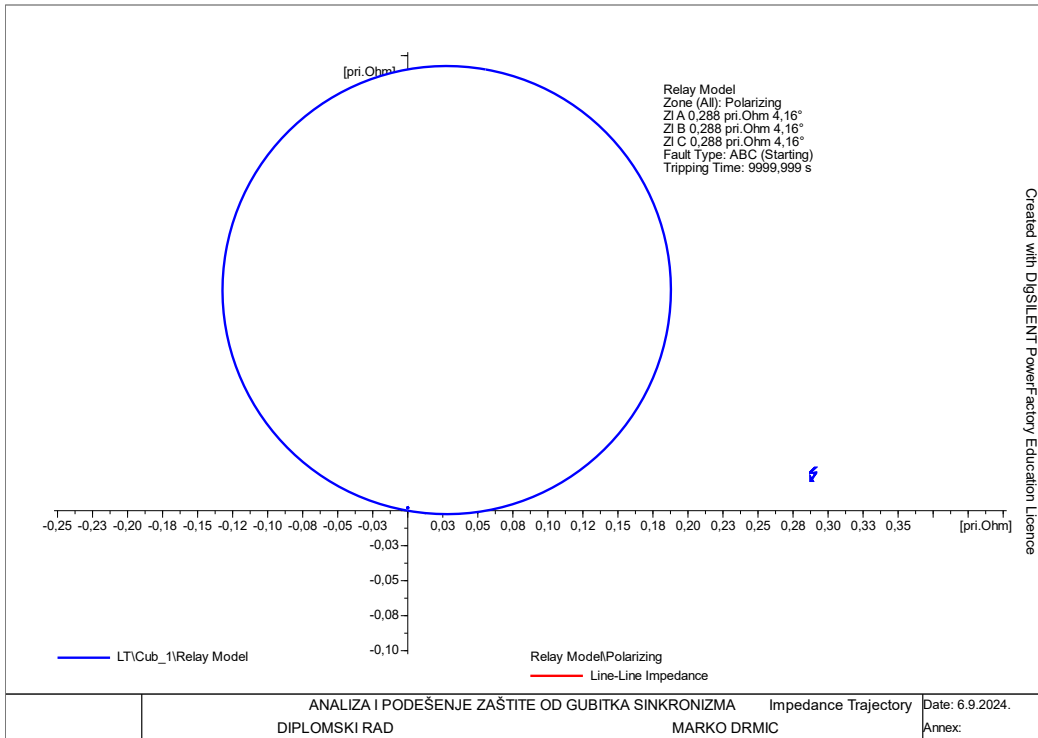
|                               | <i>IZNOS</i> | <i>JEDINICA</i> |
|-------------------------------|--------------|-----------------|
| <i>Nazivna prividna snaga</i> | 2220         | MVA             |
| <i>Nazivna radna snaga</i>    | 1998         | MW              |
| <i>Napon generatora</i>       | 24           | kV              |
| <i>Grupa spoja</i>            | YN           |                 |
| <i>cosφ</i>                   | 1            |                 |

Tablica 4.4. Podaci transformatora

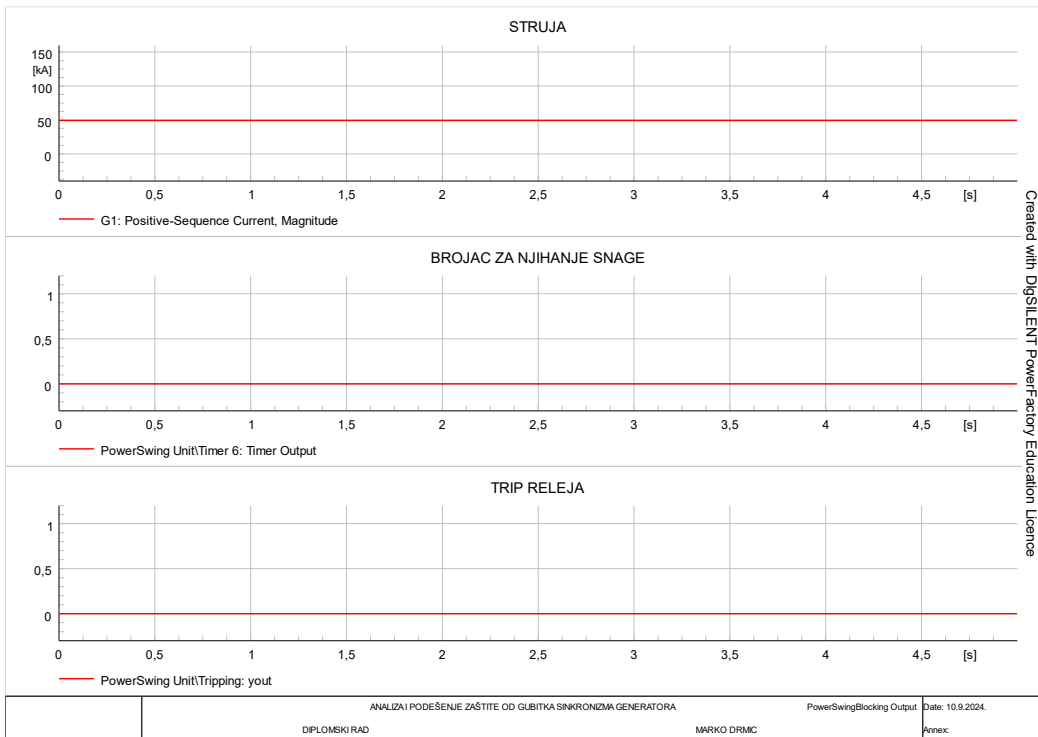
|                               | <i>IZNOS</i> | <i>JEDINICA</i> |
|-------------------------------|--------------|-----------------|
| <i>Nazivna prividna snaga</i> | 2220         | MVA             |
| <i>Prijenosni omjer</i>       | 500/24       | kV              |
| <i>uk%</i>                    | 15           | %               |
| <i>Grupa spoja</i>            | Yyn0         |                 |



Sl. 4.10. Prikaz snage i kuta generatora u stacionarnom stanju



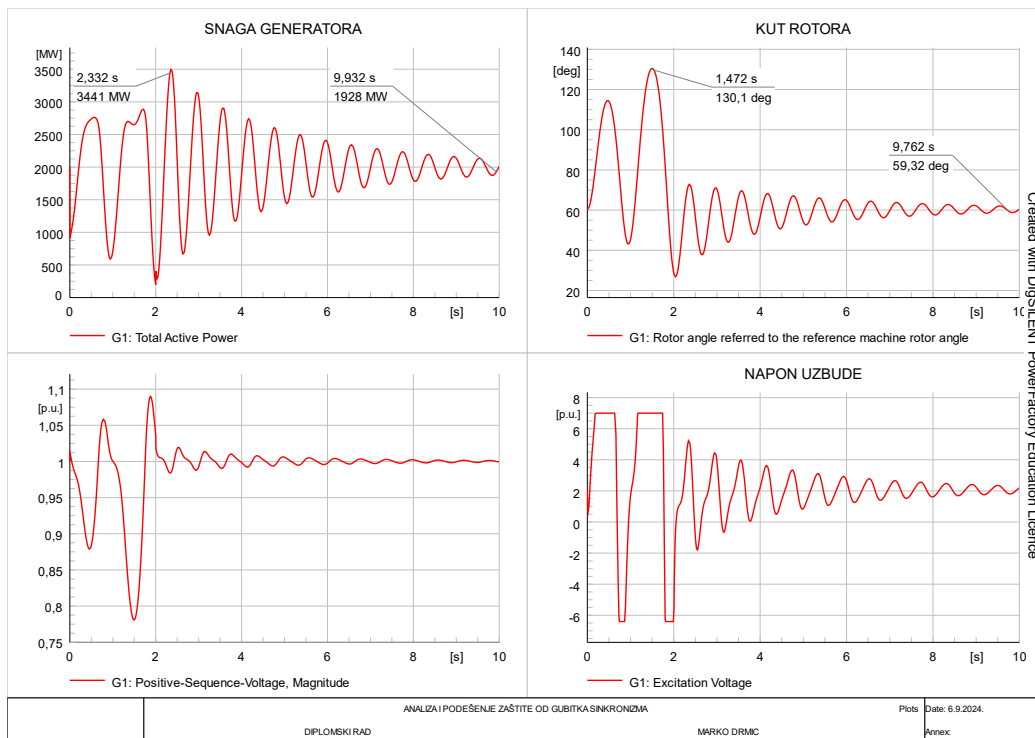
Sl. 4.11. Mjereni vektor impedancije



Sl. 4.12. Prikaz tripa i brojača njihanja snage releja

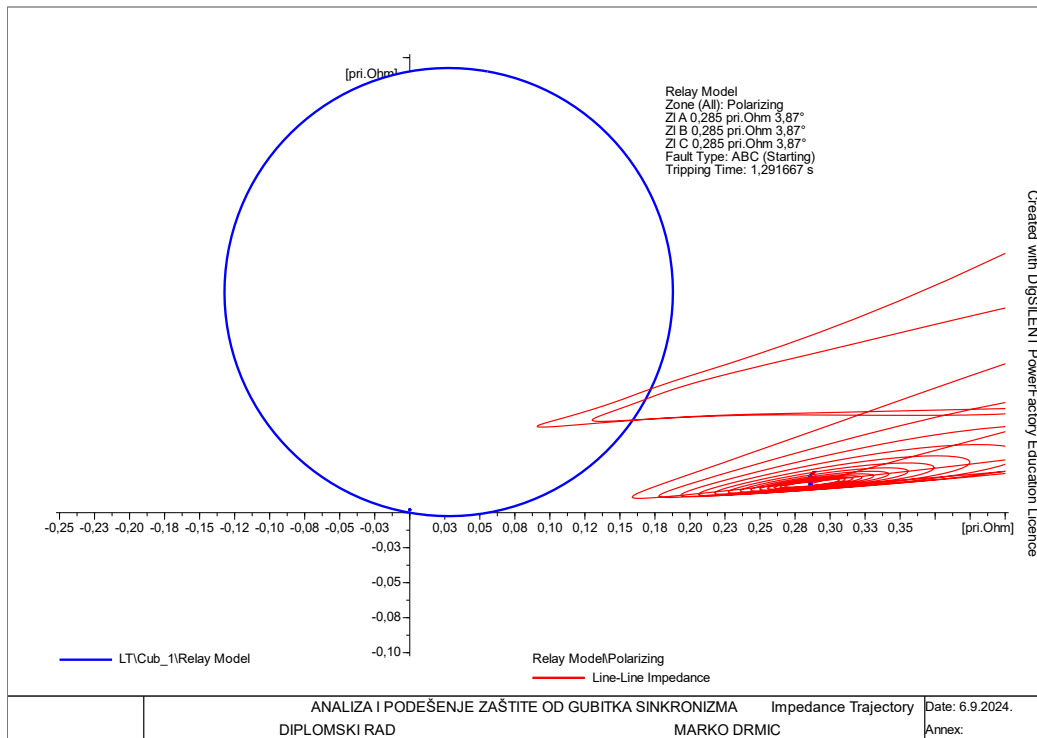
## 4.4. Slučaj uklopa tereta

U primjeru na početku same simulacije dogodio se isklon jednog od paralelnih vodova dugačkog 200 km koji ima vrijednost otpora od  $0.1 \Omega/\text{km}$  te nakon 2 sekunde uklop istog voda. Tijekom cijelog trajanja simulacije, nastali poremećaj u mreži dovodi do povećanja snage i kuta rotora generatora što je prikazano na slici 4.5. isto tako može se uočiti da se nakon određenog vremenskog perioda generator polako vraća u stanje koje je imao prije poremećaja te da se vrijednosti snage i kuta generatora vraćaju prema vrijednostima koje su imale u prethodnom primjeru. Na slici 4.6. prikazane su velike promjene u iznosu impedancije, vektor impedancije mijenja smjer i iznos zbog naglih promjena koje se događaju tijekom simulacije. Distantni relej je ovu pojavu dobro prepoznao te nije poslao nalog za isklonom prekidača budući da je vektor mjerenje impedancije dva puta ušao sa lijeve strane karakteristike te izašao na istu stranu, u tom trenutku relej je zabilježio vrijeme potrebno da oba puta vektor impedancije prođe kroz karakteristiku te je to vrijeme protumačio kao njihanje snage što savršeno odgovara opisanom slučaju sa slike 3.14. Generator nije ispao iz sinkronizma već je ostao u pogonu i vratio se u stanje koje je imao prije kvara.

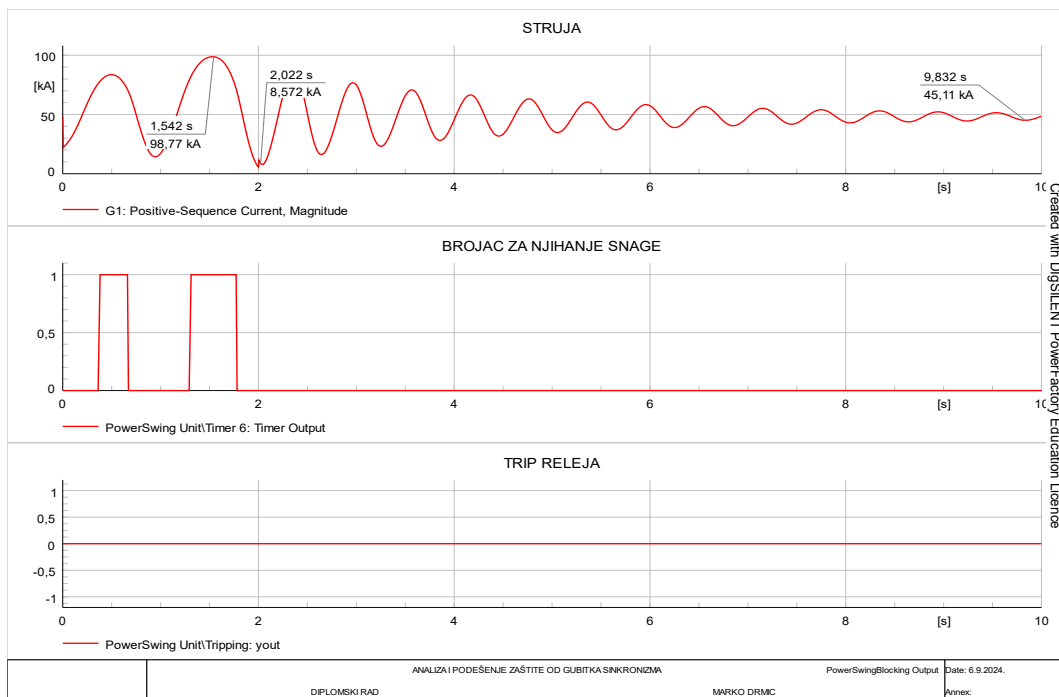


Sl. 4.13. Snaga generatora prilikom promjene impedancije mreže





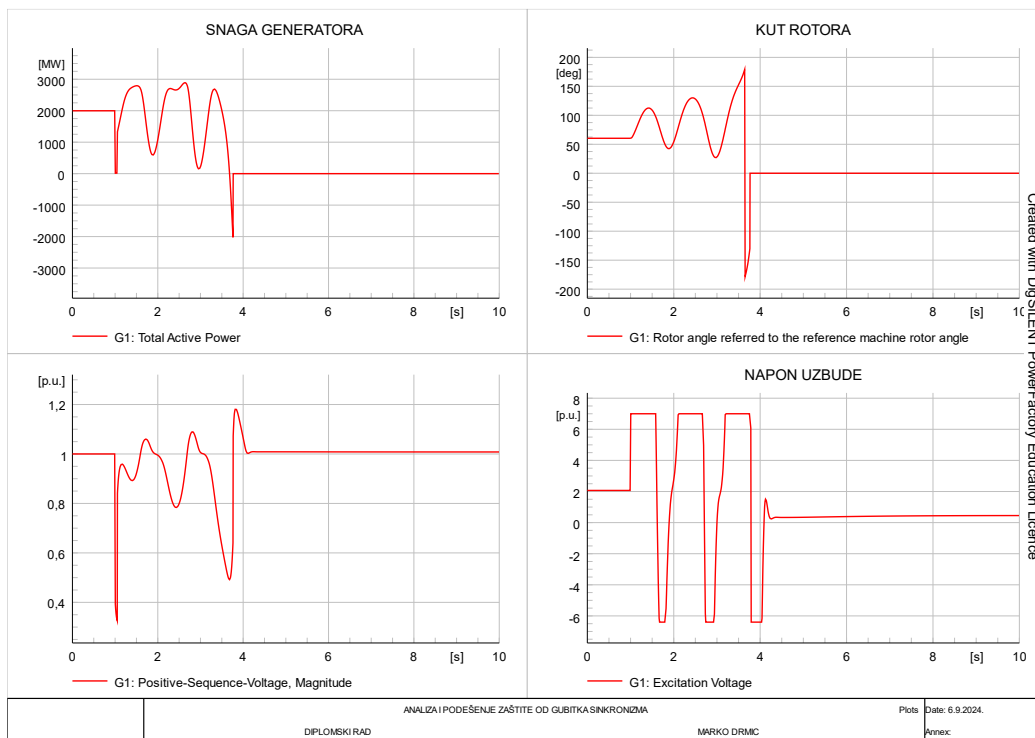
Sl. 4.14. Promjena vektora impedancije



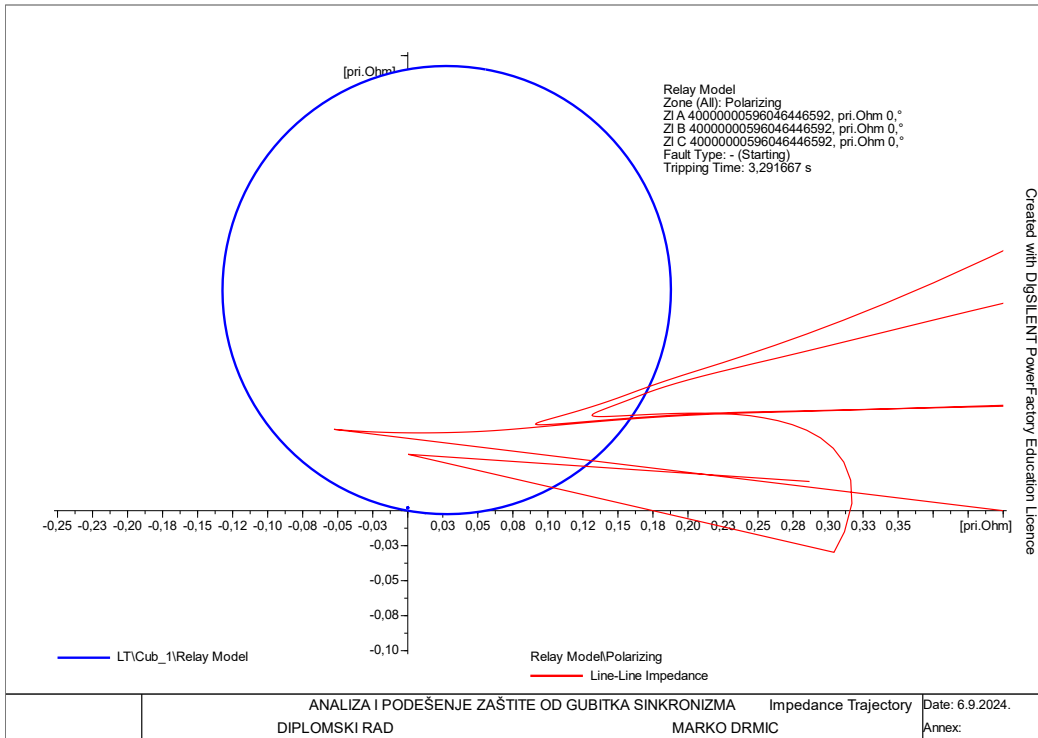
Sl. 4.15. Algoritam releja prepoznaje njihanje snage

## 4.5. Slučaj nastupa kratkog spoja

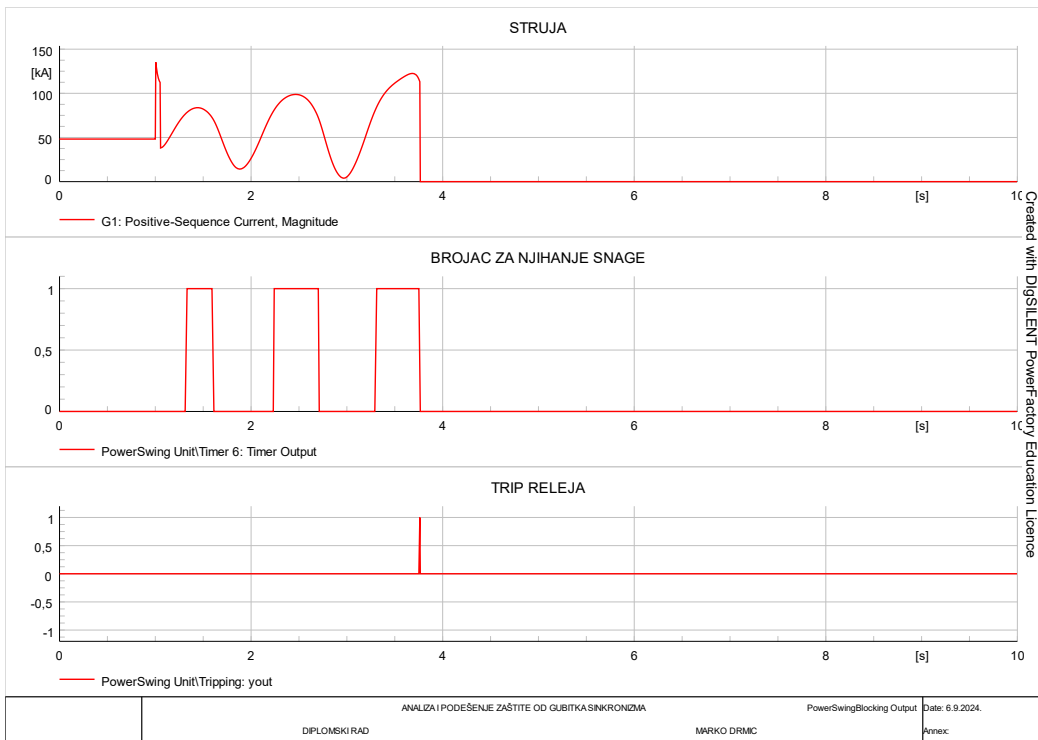
U ovom primjeru simuliran je kratki spoj, unutar modela postavljen je distantni relej, njegov algoritam uspješno vidi brzu promjenu vektora mjerene impedancije, prepoznaje ju kao kvar te nakon određenog vremena šalje nalog za isklon prekidaču, a generator se zaustavlja. Zaustavljanje generatora prikazano je na slici 4.16. nakon 4 sekunde simulacije, snaga generatora pada na nulu, a na slici 4.17. prikazana je promjena vektora ukupne impedancije, vektor siječe karakteristiku tri puta prije nego relej da nalog za isklonom prekidačana slici 4.18. jasno je vidljiv nalog za isklon prekidača od strane distatnog releja.



Sl. 4.16. Generator nakon tripa releja



Sl. 4.17. Mjerenje vektora impedancije tijekom kratkog spoja



Sl. 4.18. Prorada releja nakon nastanka kratkog spoja

## 4.6. Kratki spoj – prolazni kvar (APU)

Budući da je velik broj nastalih kvarova u mreži prolaznog karaktera, simuliran je i događaj nastanka kratkog spoja koji je očišćen nakon određenog vremena, automatski ponovni uklop vraća vod u kvaru nazad u pogon nakon beznaponske pauze. U ovom primjeru koristi se skripta za izračunavanje kritičnog vremena isključenja za generator, kratki spoj je napravljen na samome kraju voda, točnije na 99% od ukupne dužine voda te je nakon 7 iteracija izračunato kritično vrijeme za isključenje generatora od 0.421 s. Model korišten u ovoj simulaciji je model sa slike 4.9. ali je iznos snage generatora smanjen sa 2000MW na iznos od 500MW. Kratki spoj je simuliran na vodu CCT 2, desni vod sa slike 4.9.

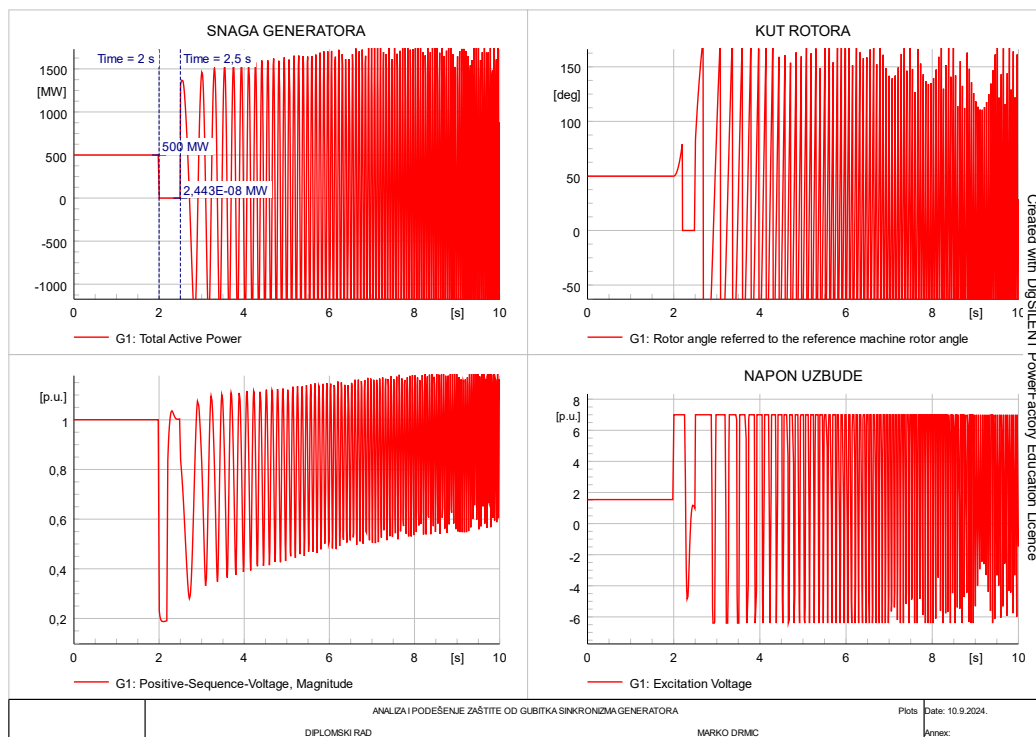
```

-----
Starting calculation for Line CCT 2 at 99 %
Iteration 0 for clearing time 0,0500 s.
Iteration 0 for clearing time 1,0000 s.
Iteration 1 for clearing time 0,5250 s.
Iteration 2 for clearing time 0,2875 s.
Iteration 3 for clearing time 0,4062 s.
Iteration 4 for clearing time 0,4656 s.
Iteration 5 for clearing time 0,4359 s.
Iteration 6 for clearing time 0,4211 s.
Iteration 7 for clearing time 0,4285 s.
Critical Fault Clearing Time after 7 iterations: 0,4211 s

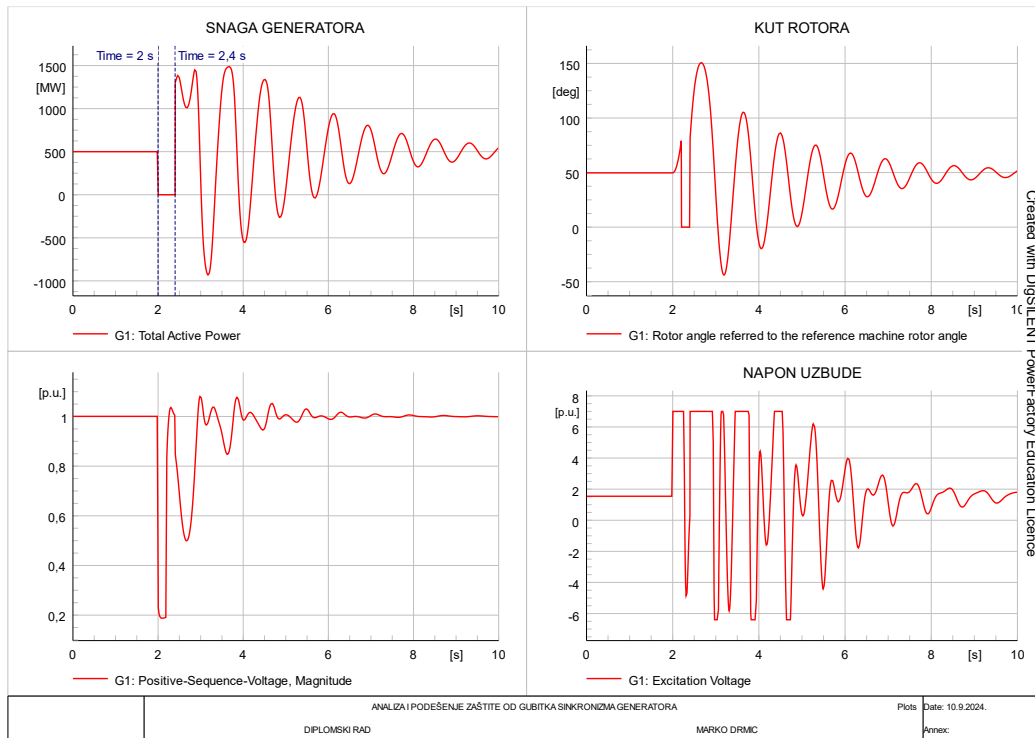
-----
RESULTS FOR LINES AND BRANCHES
-----
Critical Fault Clearing Times at 99 %
-----
CCT 2 tcrit= 0,421 s
-----

```

Sl. 4.19. Iteracije za kritično vrijeme isključenja unutar programa PowerFactory



Sl. 4.20. Generator gubi sinkronizam nakon APU



SI. 4.21. Generator zadržava stabilno stanje nakon APU

Iz grafova na slikama 4.20 i 4.21, može se primijetiti utjecaj trajanja beznaponske pauze, ako je ono duže od kritičnog vremena isključenja, generator ispada iz sinkronizma, suprotno generator će se vratiti u stanje stabilnosti.

## 4.7. Diskusija rezultata

Tablica 4.5. Prikaz rezultata simulacija

| UTJECAJ MJESTA NASTANKA KRATKOG SPOJA NA STABILNOST GENERATORA |                            |  |
|--|----------------------------|--|
| MJESTO KVARA NA VODU   | KRITIČNO VRIJEME           | KRITIČAN KUT                             |
| 10% ukupne dužine voda   | 0.342 s                    | 112,9°                                   |
| 40% ukupne dužine voda   | 0.415 s                    | 119.4°                                   |
| 80% ukupne dužine voda   | 0.453 s                    | 123.6°                                   |
| UTJECAJ APU NA STABILNOST GENERATORA                           |                            |  |
| BEZNAPONSKA PAUZA  | $>t_{crit}$                | $<t_{crit}$                              |
|  | generator gubi sinkronizam | generator ostaje u sinkronizmu sa mrežom |
| DISTANTNI RELEJ (21)   | PSB (block trip)           | OOS (trip)                               |
| njihanje snaga   | blokiranje isklopa         |  |
| kratki spoj  |                            | isklop                                   |

Na temelju tablice 4.5, može se doći do zaključka da mjesto nastanka kratkoga spoja igra veliku ulogu u „lakšem“ odražavanju sinkronizma generatora sa mrežom, zato što je kritično vrijeme isključenja veće kada je poremećaj nastao dalje od generatora. Najnepovoljniji slučaj je slučaj kada se dogodi kratki spoj blizu generatora, budući da iznosu struje kratkoga spoja dodatno pridonosi i istosmjerna komponenta struje te manje vrijeme za isključenje i manji kritični kut.

Automatski ponovni uklop koji proradi nakon nekog vremena vratit će mrežu u stanje prije kvara ukoliko je kvar prolaznog karaktera, vrijeme potrebno prekidačima da se ponovno uklupe i samo vrijeme čišćenja kratkoga spoja te gašenja strujnoga luka također igraju veliku ulogu u održavanju sinkronizma generatora. U primjeru sa slučajem prolaznog kvara i APU-a jasno je vidljivo da je vrijeme beznaponske pauze ključno, odnosno, ako je ono veće od kritičnog vremena generator će ispasti iz sinkronizma, suprotno generator se vraća u sinkronizam sa mrežom.

Prepoznavanje radi li se o njihanju snaga ili o kratkome spoju, vrlo je važna funkcija zaštitnog releja. U primjeru 4.4 i 4.5 prikazano je da zaštitna funkcija releja, na temelju MHO karakteristike prati smjer vektora mjerene impedancije te na temelju brzine prolaska tog vektora kroz karakteristiku odlučuje hoće li poslati nalog za isklupom prekidača ili će blokirati njegovu proradu, što je vrlo bitna razlika između navedenih zaštitnih funkcija releja.

## 5. ZAKLJUČAK

Cilj diplomskog rada bio je analizirati stabilnost generatora prilikom različitih poremećaja u mreži te kakvu funkciju u svemu tome ima distantna zaštita. Kroz simulacije koje su odrađene u programskom paketu DIgSILENT Power Factory, prikazani su i opisani rezultati raznim simulacijama, i kojima su postavljeni razni poremećaji u sustavu. U prvom dijelu simulacija može se doći do zaključka kakvu ulogu na kritično vrijeme i kritičan kut isključenja ima mjesto nastanka kratkoga spoja te ukupna impedancija mreže u drugom dijelu simulacije iz kojih se jasno vidi važnost ispravnog podešavanja zaštite kako bi generator ne samo ostao zaštićen od strane poremećaja u mreži već i od krivog tripanja releja koji se može dogoditi ukoliko algoritam za očitavanje njihovih snaga nije dobro postavljen. Izvođenjem simulacija, ispravno podešavanje zaštite dolazi do izražaja. Distantni relej tijekom poremećaja u mreži prati što se događa sa ukupnom impedancijom mreže, „gleda“ vektor impedancije te ga pomoću algoritma analizira. Na temelju brzine promjene vektora impedancije i njegov prolaz preko karakteristika koje relej ima spremljene unutar algoritma raspoznaje da li se dogodio kratki spoj ili se radi o APU, promjeni impedancije mreže zbog uklapanja strojeva velikih snaga ili nekakvog dodatnog tereta. Na temelju podataka odlučuje da li će poslati nalog za isklop prekidača ili ne. APU također može izbaciti generator van sinkronizma, a ovisi o vremenu potrebnom za čišćenjem kratkoga spoja te ponovnog uklopa prekidača, ukoliko je beznaponska pauza manja od kritičnog vremena isključenja, generator će ostati u sinkronizmu sa mrežom, u suprotnom, generator ispada iz sinkronizma. Zaštitne funkcije blokiranja isklopa prekidača prilikom njihovih snaga i isklopa prekidača prilikom klizanja polova igraju veliku ulogu za očuvanje stabilnosti generatora. Mjerenjem vektora impedancije i njegovim prolaskom kroz zadanu karakteristiku relej donosi odluku o nalogu za isklop ukoliko se radi o kratkom spoju ili blokiranju naloga za isklop prekidača ukoliko je nastupilo njihanje snage. Upravo je to glavna razlika između dvije funkcije distantnog releja koji su tema ovog diplomskog rada.

## LITERATURA

- [1] Tamotsu Minikawa, Yoshinori Ichikawa, Masahiro Sato, Yuji Ishihara, *A new method for detecting loss of synchronism using power and current measured on a line*, IEEE transaction on power delivery, vol 14. No. 1 1999.
- [2] R. Grondin, A. Heniche, M. Dobrescu, G. Trudel, M. Rousseau, B. Kirby, S. Richards, A. Apostolov, *Loss of synchronism detection, a strategic function for power system protection*.
- [3] M. Takaoka, T. Kiuchi, M.Sato, *Study on method to detect loss of synchronism using bus voltage and line current measured on a line using power system simulator*, Electrical Engineering in Japan, Vol. 155, No.4, 2006
- [4] Nitesh Singh, Saikat Chakrabarti, Ankush Sharma, *Real time detection and control of loss of synchronism using energy function criterion and phase sequence exchange technique*, Department of Electrical Engineering Indian Institute of technology Kanpur, India, 2022.
- [5] A. Kubis and C.Rehtanz, *About the Relationship of Line Overload Cascading and Loss of Synchronism in Electric Power Systems*, Institute of Energy Systems, Energy Economics and Energy Efficiency, TU Dortmund University, Dortmund, Germany, 2015.
- [6] I. Sarajčev, *Zaštita u elektroenergetskom sustavu, zabilješke s predavanja*, Sveučilište u Splitu, FESB, Split, 2008.
- [7] Siemens Siprotec 5 Relay Manual, dostupno na: [SIEMENS SIPROTEC 5 7SA82](#) pristupljeno 3.8.2024.
- [8] Network Protection & Automation Guide, ALSTOM GRID; May 2011.
- [9] R. Muminović, A. Muminović, *Power Swing Detection and Prevention*, B&H Electrical Engineering, Volumes 17, issue 2, 2023:32-41.
- [10]Hitachi, Generator protection manual, REG 670, Version 2.2 IEC, Technical manual, March 2024. Revision S
- [11]DIgSILENT PowerFactory, dostupno na: <https://www.digsilent.de/en/powerfactory.html> pristupljeno 20.8.2024



## SAŽETAK

Unutar ovog diplomskog rada analizirana je stabilnost generatora i podešavanje zaštite prilikom pojave njihanja snaga i kratkoga spoja. U prvom dijelu ovoga rada sagledano je područje rada, par znanstvenih radova koji su obrađivali sličnu temu. Nakon toga je opisana zaštita elektroenergetskog sustava sa naglaskom na distantnu zaštitu, budući da je to zaštita koja mjeri impedanciju te promjenu brzine vektora impedancije što koristi algoritam numeričkog releja kao jedan od podatak pomoću kojega može odrediti radi li se o njihanju snaga ili kratkome spoju, na temelju čega odlučuje da li će poslati naredbu za isključenje prekidaču. Glavna tema ovoga rada su funkcije distantnog releja koje donose odluku radi li se o njihanju snaga ili klizanju polova, dvije pojave koje mogu dovesti do nestabilnosti sustava. Objašnjeno je par metoda pomoću kojih relej određuje da li se radi o njihanju snaga ili je riječ o kratkome spoju. Kod klizanja polova opisan je način na koji relej može prepoznati radi li se o klizanju polova te dva načina na koji se štiti prekidač. Slična situacija je opisana i u slučaju releja koji prepoznaje njihanje snaga u sustavu. Jasno je pokazano da iako su ove dvije funkcije povezane, razlikuju se upravo o tome, što će jedna funkcija pokrenuti naredbu za isklopom dok će ju druga blokirati. Na kraju ovoga rada napravljeno je više simulacija. Primjeri tranzijentne stabilnosti gdje se poremećaj događa na točno određenoj udaljenosti od generatora te primjeri stabilnosti sustava prilikom pojave njihanja snaga u sustavu. Prilikom simulacija tranzijentne stabilnosti vidi se utjecaj mjesta nastanka kratkoga spoja, ukupne impedancije sustava na kritično vrijeme te kritičan kut, u drugom dijelu simulacije do izražaja dolazi važnost ispravnog podešavanja zaštite. Distantna zaštita ispravno prepoznaje radi li se o kratkome spoju ili o njihanju snaga koristeći MHO karakteristiku te šalje funkciju blokiranja naloga za isklop prekidača, ako se radi o njihanju snage ili nalog za isklop prekidača u slučaju kratkoga spoja.

**Ključne riječi:** APU, distantna zaštita, generator, klizanje polova, kratki spoj, kritičan kut isključenja, kritično vrijeme isključenja, MHO karakteristika, njihanje snage, stabilnost.

## ABSTRACT

This thesis analyzes the stability of generator and protection adjustments during power swings and short circuits. In the first part of this work, the area of work was examined, along with some scientific papers that addressed similar topics. The protection of the power system was described, with an emphasis on distance protection, as it measures impedance and the rate of change of impedance vectors. This uses a numerical relay algorithm to differentiate between power swings and short circuits, deciding whether to send a trip command to the circuit breaker based on this information. The main topic of this work was power swings and pole slipping. Both phenomena that can lead to system instability. Various methods were explained for how the relay determines whether the event that happened in a grid is a power swing or a short circuit. The detection of pole slipping by the relay was described, along with two methods for protecting the circuit breaker in such cases. A similar situation was described for relays detecting power swings in the system. It was clearly shown that although these two functions are related, they differ in that one function will trigger a trip command while the other will block it.

Finally, several simulations were conducted. Examples of transient stability where fault is simulated on specific distance from generator and system stability during disturbances with properly adjusted distance protection were analyzed. The simulations highlighted the impact of the location of a short circuit, the total impedance of the system on critical time and angles, and the importance of correct protection settings of the relay. Distance protection accurately identifies whether the issue is a short circuit or a power swing using the MHO characteristic and will either issue a blocking command for the breaker if it is a power swing or a trip command if it detects a short circuit.

**Keywords:** automatic reset, distance protection, generator, pole slip, short circuit, critical angle, critical clearing time, MHO characteristic, power swing, stability.