

Univerzitet Crne Gore Elektrotehnički  
fakultet, Podgorica



KRISTINA BAKIĆ

**ANALIZA UTICAJA FACTS UREĐAJA NA  
TRANZIJENTNU STABILNOST  
ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA**

-MASTER RAD-

Podgorica, 2024. godine

## **PODACI I INFORMACIJE O KANDIDATU**

**Ime i prezime:** Kristina Bakić

**Datum i mjesto rođenja:** 25.10.2000. godine, Nikšić, Crna Gora

**Naziv završenog studijskog programa i godina diplomiranja:** Energetika i automatika, 2022. godine

## **INFORMACIJE O MASTER RADU**

**Naziv osnovnih studija:** Energetika i automatika, smjer Elektroenergetski sistemi

**Naslov master rad:** Analiza uticaja FACTS uređaja na tranzijentnu stabilnost elektroenergetskog sistema

**Fakultet/Akademija na kojem je rad odbranjen:** Elektrotehnički fakultet, Podgorica

## **OCJENA I ODBRANA MASTER RADA**

Datum prijave master rada: 15.04.2024.

Datum sjednice Vijeća univerzitetske jedinice na kojoj je prihvaćena tema: 16.05.2024.

### **Komisija za ocjenu/odbranu rada:**

**Predsjednik komisije:** Prof. dr Vladan Vujičić

Univerzitet Crne Gore

Elektrotehnički fakultet Podgorica

**Član komisije:** Prof. dr Vladan Radulović

Univerzitet Crne Gore

Elektrotehnički fakultet Podgorica

**Mentor:** Prof. dr Martin Ćalasan

Univerzitet Crne Gore

Elektrotehnički fakultet Podgorica

Datum odbrane: \_\_\_\_\_

Datum promocije: \_\_\_\_\_

Ime i prezime autora: Kristina Bakić, BSc EiA

## ETIČKA IZJAVA

U skladu sa članom 22 Zakona o akademskom integritetu i članom 20 Pravila studiranja na master studijama, pod krivičnom i materijalnom odgovornošću, izjavljujem da je master rad pod naslovom

**“Analiza uticaja FACTS uređaja na tranzijentnu stabilnost  
elektroenergetskog sistema“**

moje originalno djelo.

Podnositelj izjave,

Kristina Bakić, BSc EiA

Kristina Bakić

## Predgovor

Istraživanje ovog master rada je motivisano nizom problema sa kojima se suočavaju savremene prenosne mreže a koji su najčešće prouzrokovani neprekidnim povećavanjem konzuma uslijed čega je potrebno posvetiti veću pažnju održavanju stabilnog i pouzdanog rada sistema. Poremećaj tranzijentne stabilnosti je jedan od glavnih faktora koji može izazvati velike havarije elektroenergetskih sistema (EES). Samim tim, kako u nauci tako i u praksi, izuzetno je važno procijeniti granice i obezbijediti očuvanje tranzijentne stabilnosti.

Prethodno navedeni problem efikasno je moguće riješiti upotrebom fleksibilnih sistema za prenos naizmjenične struje (eng. *Flexible Alternating Current Transmission System - FACTS*) isključivo baziranih na energetskoj elektronici. Ovi uređaji predstavljaju kompenzatore reaktivne energije kod kojih se kontrola izlazne reaktivne snage zasniva na kontroli uključivanja energetskih poluprovodničkih komponenti (tiristori, *Gate-TurnOff thyristors - GTO*, *Insulated Gate Bipolar Transistor - IGBT*, *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor - MOSFET*, itd). FACTS uređaji služe za regulisanje napona i tokova snage. Sve se češće koriste u prenosnim mrežama jer omogućavaju povećanje prenosne moći sistema i na taj se način povećava sposobnost sistema za očuvanjem tranzijentne stabilnosti i maksimalnim iskorišćavanjem postojećeg prenosnog sistema, odnosno nema potrebe za izgradnjom novih vodova, što predstavlja znatnu uštedu investicija. Međutim, potpuni potencijal navedenih uređaja može se ostvariti jedino ako se pronadu njihove optimalne lokacije priključivanja na mrežu, kao i optimalno podešenje parametara uređaja.

Cilj istraživanja ovog rada sastoji se iz dva dijela. Prvi je baziran na opisu metoda i razvoju algoritma za procjenu tranzijentne stabilnosti EES kao i na prikazu i analizi uticaja odabranih FACTS uređaja na istu u različitim scenarijima. Drugi se sastoji od kreiranje algoritma za pronalazak optimalne lokacije i parametara ovih uređaja u prenosnoj mreži. Takođe, osvrt je napravljen i na analizi pojedinačnog i zbirnog uticaja koji navedeni uređaji imaju. Štaviše, cilj je razvoj *JavaScript website-a* koji će se bazirati na gore pomenutom algoritmu za analizu tranzijentne stabilnosti a krajnjim korisnicima će omogućiti brzu i jednostavnu analizu u savremenim elektroenergetskim sistemima.

## Izvod rada

Ovaj rad se bavi razvojem metoda za procjenu tranzijentne stabilnosti jednomašinskog i višemašinskog EES u slučaju nekompenzovanog sistema i sistema kompenzovanog primjenom uređaja za fleksibilan prenos električne energije (eng. *Flexible Alternating Current Transmission System -FACTS*). Iz grupe FACTS uređaja razmatraju se statički kompenzator reaktivne snage (eng. *Static VAR Compensator - SVC*), serijska kapacitivna kompenzacija (eng. *Series Capacitive Compensation - SCC*) i statički sinhroni kompenzator (eng. *STATIC synchronous COMPensator – STATCOM*). Glavni cilj priključivanja prethodno navedenih uređaja je poboljšanje tranzijentne stabilnosti EES adekvatnim odabirom lokacije i karakteristika pomenutih uređaja na osnovu kriterijumske funkcije formirane u vidu minimizacije gubitaka aktivne snage u sistemu.

Konkretno, problem optimalne lokacije FACTS uređaja biće realizovan primjenom genetskog algoritma (eng. *Genetic Algorithm – GA*), pri čemu se do zadovoljavajućih rezultata dolazi upotrebom kriterijumske funkcije formirane u vidu minimizacije aktivnih gubitaka u sistemu. GA algoritam se koristi za različite probleme optimizacije, pri čemu će obzirom na kompleksnost posmatranog problema, njegova jednostavna implementacija i efikasnost biti od velikog značaja.

Eksperimentalni rezultati, koji će se koristiti za ocjenjivanje uticaja FACTS uređaja, biće dobijeni analizom stanja nekompenzovanog i kompenzovanog sistema na primjeru jednomašinskog sistema (sistem koji se sastoji od bloka generator - transformator koji je preko dva paralelna voda povezan sa beskonačno jakom mrežom) i na IEEE testnim mrežama sa 11 i 30 čvorova. Prikazan je uticaj pojedinačne alokacije pomenutih uređaja kao i efekat njihovog združenog dejstva.

Analiza rezultata dovela je do zaključka da ugradnja FACTS uređaja ima pozitivan uticaj na očuvanje tranzijentne stabilnosti EES. Optimalna alokacija i dimenzionisanje odabranih FACTS uređaja doprinosi značajnom smanjenju aktivnih gubitaka, pri čemu koordinisana alokacija i dimenzionisanje pokazuje bolje rezultate. Iako optimalno priključivanje navedenih uređaja kroz kriterijumu funkciju u vidu minimizacije aktivnih gubitaka ima pozitivan uticaj na naponske prilike i tokove snaga u sistemu, ovakav odabir mjesta ugradnje i dimenzija FACTS uređaja različito utiče na tranzijentnu stabilnost, što zavisi od karakteristika i dimenzije samog sistema. Tako je kod sistema manjih dimenzija uvek primjetan pozitivan uticaj svakog od razmatranih FACTS uređaja, postavljenog prema navedenoj kriterijumskoj funkciji na očuvanje tranzijentne stabilnosti, dok je kod sistema većih gabarita potrebno izabrati kako adekvatnu kombinaciju uređaja, tako i njihovo optimalno podešenje.

**Ključne riječi:** FACTS, prenosna mreža, SCC, STATCOM, SVC, tranzijentna stabilnost.

## Abstract

This paper addresses the problem of assessment of transient stability of single-machine and multi-machine power systems in the case of uncompensated systems and systems compensated by the application of *Flexible Alternating Current Transmission System* (FACTS) devices. From the FACTS device group, static reactive power compensators (SVC), series capacitive compensation (SCC), and static synchronous compensator (STATCOM) are considered. The main goal of the installation of the previously mentioned devices is to improve the transient stability of the power system by adequately selecting the location and characteristics of the mentioned devices based on the criterion function formed in the form of minimizing the active power in the system.

In particular, the problem of the optimal location of the FACTS device will be realized by applying a genetic algorithm (GA), whereby satisfactory results are obtained by the use of criterion functions formed in the form of minimization of active losses in the system.

Experimental results, which will be used to evaluate the impact of FACTS devices, will be obtained by analyzing the conditions of uncompensated and compensated systems using the example of a single-machine system (a system consisting of a generator block - transformer connected to an infinite bus via two parallel lines) and on IEEE test networks with 11 and 30 nodes. The impact of individual allocation of these devices is shown, as well as the effect of their combined action.

The analysis of the results led to the conclusion that the installation of FACTS devices has a positive impact on the preservation of transient stability of the power system. Optimal allocation and sizing of the selected FACTS devices contribute to a significant reduction in active losses, with coordinated allocation and sizing showing better results. Although the optimal installation of the mentioned devices through the criterion function in the form of minimization of active losses has a positive effect on voltage profile and power flows in the system, this selection of the installation location and dimensions of FACTS devices has a different effect on transient stability, which depends on the characteristics and dimensions of the system itself. Thus, with systems of smaller dimensions, the positive influence of each of the considered FACTS devices, set according to the specified criterion function, on the preservation of transient stability is always noticeable, while with systems of larger dimensions, it is necessary to choose both an adequate combination of devices and their optimal setting.

**Keywords:** FACTS, SCC, STATCOM, SVC, transient stability, transmission network.

*Neizmjernu zahvalnost dužna sam svojim roditeljima bez čije zajedničke podrške i odricanja ne bih bila u prilici da slijedim svoj akademski put.*

*Veliku zahvalnost dužna sam i svom mentoru Prof. dr Martinu Ćalasanu na izdvojenom vremenu, nesebičnoj pomoći i prije svega velikom interesovanju prilikom izrade ovog rada.*

*Kristina Bakić*

# Sadržaj

<b>1. UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2. TRANZIJENTNA STABILNOST ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA</b>	<b>5</b>
2.1. Definicije i podjela stabilnosti	5
2.2. Jednačina kretanja rotora sinhronne mašine	7
2.2.1. Kriva snaga – ugao sinhronog generatora	12
2.3. Jednomašinski sistem	16
2.3.1. Metode za procjenu tranzijentne stabilnosti jednomašinskog sistema	17
2.3.1.1. Metod jednakih površina	17
2.3.1.2. Metod numeričke integracije	23
2.3.2. Transfer impedansa	25
2.4. Višemašinski sistem	29
2.4.1. Metod za procjenu tranzijentne stabilnosti višemašinskog sistema	30
2.4.1.1. Formiranje matrice $Y_b$ i Newton – Raphson metod za proračun tokova snage	33
<b>3. FACTS UREĐAJI</b>	<b>36</b>
3.1. Definicija i razvoj FACTS uređaja	36
3.2. Statički kompenzator reaktivne snage	37
3.2.1. Princip rada SVC uređaja	38
3.2.2. $I-V$ kriva SVC uređaja	40
3.2.3. Uticaj SVC uređaja na tranzijentnu stabilnost EES	42
3.3. Serijska kapacitivna kompenzacija	44
3.3.1. Tiristorski kontrolisan redni kompenzator	46
3.3.2. Uticaj SCC na tranzijentnu stabilnost EES	49
3.4. Statički sinhroni kompenzator	50
3.4.2. $I-V$ karakteristika STATCOM-a	51
<b>4. WEBSITE ZA PROCVJENU TRANZIJENTNE STABILNOSTI</b>	<b>53</b>
4.1. Opis website-a	53
4.1.1. Website – jednomašinski sistem	54
Metod jednakih površina	55
Metod numeričke integracije	57
4.1.2. Website – višemašinski sistem	57

<b>5. REZULTATI SIMULACIJE</b>	<b>59</b>
5.1. Rezultati simulacije – jednomašinski sistem	59
5.2. Rezultati simulacije – višemašinski sistem	73
5.2.1. Optimalna alokacija i dimenzionisanje FACTS uređaja	73
5.2.2. Rezultati simulacije – IEEE sistem od 11 čvorova	77
5.2.3. Rezultati simulacije – IEEE sistem od 30 čvorova	80
<b>7. ZAKLJUČAK</b>	<b>87</b>
<b>Literatura</b>	<b>89</b>
<b>Prilog 1. Osnovni podaci jednomašinskom sistemu</b>	<b>95</b>
<b>Prilog 2. Osnovni podaci o IEEE testnoj mreži od 11 čvorova</b>	<b>96</b>
<b>Prilog 3. Osnovni podaci o IEEE testnoj mreži od 30 čvorova</b>	<b>98</b>

## 1. UVOD

Elektroenergetski sistemi predstavljaju značajnu infrastrukturu u savremenom društvu. Električna snaga proizvedena u elektranama prenosi se prenosom, a potom i distributivnom mrežom ka krajnjim korisnicima. Stabilnost ugla rotora je pitanje od fundamentalnog značaja za planiranje, rad i kontrolu elektroenergetskog sistema uslijed posljedica koje je prate [1-3]. Tradicionalno, procjena tranzijentne stabilnosti ograničena je na stadijume planiranja i projektovanja energetskih sistema, međutim sada je sve važnije procijeniti njene granice u operativnom planiranju i radu u realnom vremenu.

U radovima [4 - 8] detaljno je opisan pojam stabilnosti EES, njena podjela i pojam tranzijentne stabilnosti EES. Kako ugaona stabilnost sistema zavisi od položaja ugla rotora sinrone mašine prije i nakon nastanka poremećaja, za procjenu tranzijentne stabilnosti potrebno je znati položaj ugla rotora u svakom trenutku. Detaljan opis kretanja ugla rotora, zavisnost isporučene aktivne snage generatora od ugla opterećenja i pojmove vezanih za isto opisano je u radovima [9 - 21]. Uslijed izrazitog značaja procjene tranzijentne stabilnosti na rad EES autori širom svijeta su predložili veliki broj metoda. Problematika tranzijente stabilnosti, brza procjena iste, na primjeru jednomašinskog sistema [22], upotrebom direktnih metoda: metoda jednakih površina i metoda Ljapunova opisana je u radovima [23 - 24] i [25] respektivno, dok je u [26 - 28] opisan jedan od načina procjene tranzijentne stabilnosti numeričkim rješavanjem jednačine kretanja sinhrone mašine. Predlog metoda analize tranzijentne stabilnosti proširen na složeniji ali realniji slučaj višemašinskog sistema [29] obrađen je u radovima [30 - 31]. U radu [32] prikazan je način određivanja tranzijetne stabilnosti upotrebom simulacije *Hybrid Electromagnetic Transient (EMT) - Transient Stability (TS)* metoda u MATLAB/Simulink okruženju. Paket Simulink korišćen je u i u radu [33] kako bi se odredila tranzijentna stabilnost EES korišćenjem metoda *Single Machine Equivalent (SIME)*. Često korišćene metode za rješavanje jednačine kretanja rotora – tačka po tačka (eng. *Point by Point*), modifikovani Ojler (eng. *Modified Euler's*) i *Runge-Kutta* objašnjene su u radu [34]. Pored numeričkih metoda, u ovom radu su istražene i dvije druge metode, metoda optimizacije roja čestica (eng. *Particle Swarm Optimization - PSO*) zasnovana na evolucionom algoritmu i analitička metoda maksimalnog Ljapunovljevog eksponenta (eng. *Maximum Lyapunov Exponent method*). Studija [35] pokazuje da se koncept najvećeg eksponenta Ljapunova (eng. *Largest Lyapunov Exponent – LLE*) može koristiti kao nova metoda za određivanje da li je nova radna tačka sistema nakon kvara unutar regiona tranzijentne stabilnosti.

FACTS uređaji su savremeni sistemi energetske elektronike koji se sve više koriste u EES za rješavanje različitih problema. Upotreba ovih uređaja je u posljednje vrijeme privukla značajno interesovanje kao sredstvo za kontrolu tokova snaga, poboljšanje naponskih prilika, povećanje prenosnog kapaciteta i granica stabilnosti sistema [36 - 39]. Istoriski razvoj ovih uređaja opisan je u radu [40]. U radovima [41 - 47] izložena je zamjenska šema, principi rada, radna karakteristika i matematički model paralelnog uređaja statičkog kompenzatora reaktivne snage (eng. *Static Var Compensator* – SVC). Pregled teorijskog uticaja SVC uređaja na prenos aktivne snage predstavljen je od strane autora [48]. Metod redne kompenzacije je poznat i široko zastupljen metod. Njegove prednosti i upotreba u EES date su u radovima [49 - 51]. Osnovna konstrukcija jednog ovakvog FACTS uređaja opisana je u [52]. Tiristorski uklopljiva serijska kapacitivnost (eng. *Thyristor-Switched Series Capacitor* – TCSC) je uređaj iz grupe serijske kapacitivne kompenzacije (eng. *Series Capacitive Compensation* - SCC) koji se izdvaja po svojoj mogućnosti skoro kontinualne redne kompenzacije. Princip rada, radna karakteristika i uticaj na prenos aktivne snage u vod teme su radova [53 - 55]. Najsavremenija tehnologija šant kompetacije statički sinhroni kompenzator (eng. *STATIC Synchronous COMpensator* – STATCOM), njegova konstrukcija i prednosti u odnosu na tradicionalni SVC uređaj opisani su u radovima [56 - 61]. Autori [62] ilustruju uticaj FACTS uređaja na prenos aktivne i reaktivne snage prenosnim vodovima. Upotrebom MATLAB /Simulink-a prikazan je efekat TSSC [63], SVC [64] i STATCOM [65] uređaja na tranzijentnu stabilnost EES. Međutim rad u MATLAB/Simulink okruženju, naročito u slučaju sistema velikih dimenzija, komplikuje realizaciju problema zbog potrebe tofazne interpretacije svakog pojedinačnog elementa sistema.

Potpun potencijal prethodno navedenih uređaja jedino može biti iskorišćen ako se pronađe njihovo optimalno mjesto priključivanja, optimalna vrijednost podešavanja i optimalan izbor broja odabranih uređaja. U dostupnoj literaturi može se primjetiti da je konkretna problematika u fokusu naučne javnosti i da autori za rješavanje ovog optimizacionog problema najčešće predlažu metaheurističke i hibridne algoritme. Optimalno alociranje SVC uređaja u prenosnoj mreži sa ciljem popravljanja naponskog profila i smanjenja gubitaka aktivne snage predstavljeno je u [66], pri čemu je problem modelovan kao MINLP i riješen primjenom KNITRO solvera. U [67] predstavljene su dvije tehnike heurističke optimizacije, *Particle Swarm Optimization* (PSO) i *Teaching Learning Based Optimization* (TLBO) koje se koriste za određivanje optimalne lokacije i vrijednosti SVC-a pri čemu vrijednost ugradnje uređaja i gubici u prenosu predstavljaju kriterijumske funkcije. Pored SVC uređaja u [68] predstavljeno je optimalno alociranje, dimenzionisanje tiristorski kontrolisane serijske kapacitivnosti i univerzalnog kontrolera tokova snage (eng. *Unified Power Flow Controller*

- UPFC) primjenom *Whale Optimization Algorithm* (WOA). U radu [69] je *Quantum behaved Particle Swarm Optimization* (QPSO) u kombinaciji sa *Newton Raphson* metodom za procjenu naponskih prilika upotrijebljena za određivanje podešenja i lokacije STATCOM uređaja sa ciljem poboljšanja tranzijentne stabilnosti. Proračun je odraćen korišćenjem MATLAB-ovog toolbox-a PSAT. U radovima [70 - 72] opisan je postupak primjene jednog od najčešće primjenljivih metoda za optimizaciju i pretraživanje - genetskog algoritma (eng. *Genetic Algorithm* – GA), koji će biti korišćen i u ovom radu prilikom odabira optimalne lokacije i podešenja FACTS uređaja.

Iz predstavljenog pregleda literature mogu se izvesti sljedeći zaključci:

- Veliki broj autora kao sredstvo za rješavanje prethodno navedenih problema, kako procjene tranzijentne stabilnosti EES tako i uticaja FACTS uređaja na rad sistema, kao softversko okruženje za simulaciju i testiranje predloženih metoda koristi MATLAB/Simulink,
- Kao alat za optimalnu pojedinačnu ili koordinisaniu alokaciju FACTS uređaja od strane velikog broja autora su najčešće predlagane metaheuristični i hibridni algoritmi,
- Vrlo mali broj radova targetira istovremenu optimizaciju profila gubitaka i tranzijentne stabilnosti EES, kako pojedinačnom tako i koordinisanom ugradnjom različitih vrsta FACTS uređaja.

Predmet istraživanja ovog rada sastoji se iz dva dijela. Prvi je baziran na opisu metoda i razvoju algoritma za procjenu tranzijentne stabilnosti EES kao i na prikazu i analizi uticaja odabranih FACTS uređaja na istu u različitim scenarijima. Drugi se sastoji od kreiranje algoritma za pronađak optimalne lokacije i parametara ovih uređaja u prenosnoj mreži. Takođe, osvrt je napravljen i na analizi pojedinačnog i zbirnog uticaja koji navedeni uređaji imaju. Štaviše, cilj je razvoj *JavaScript* website-a koji će se bazirati na gore pomenutom algoritmu za analizu tranzijentne stabilnosti a krajnjim korisnicima će omogućiti brzu i jednostavnu analizu u savremenim elektroenergetskim sistemima.

Ovaj rad se sastoji od šest Poglavlja, Literature i tri Priloga:

- U drugom poglavlju izloženi su osnovni pojmovi i definicije vezani za tranzijentnu stabilnost EES. Izložene su i objasnjene metode za procjenu tranzijentne stabilnosti jednomašinskog i višemašinskog sistema koje su primjenjene u radu.

- U trećem poglavlju definisan je pojam FACTS uređaja kao i istorijat razvoja ove tehnologije. Pored toga, opisani su principi rada, zamjenske šeme, radne karakteristike i matematički modeli SCC, SVC i STATCOM uređaja. Takođe, dat je pregled njihovog uticaja na tranzijentnu stabilnost elektroenergetskog sistema.
- U četvrtom poglavlju predstavljen je i objašnjem *website* za proračun tranzijentne stabilnosti EES. Objasnjena je njegova upotreba i funkcionalnost primjene kod jednomašinskog i višemašinskog sistema, kao i prije i nakon ugradnje odabranih FACTS uređaja.
- U petom poglavlju izloženi su rezultati simulaciju. U prvom dijelu predstavljeni su i analizirani graficki i numerički rezultati brojnih proračuna na primjeru jednomašinskog sistema. Nakon toga izložena je formulacija problema optimalne alokacije i dimenzionisanja FACTS uređaja u slušaju višemašinskih IEEE testnih mreža koristeći GA sa kriterijumskom funkcijom u obliku minimizacije aktivnih gubitaka snage u sistemu. Potom je upotrebom dobijenih rezultata izvršena procjena tranzijentne stabilnosti višemašinskog sistema i izvedeni su zaključci o uticaju odabranih uređaja na istu.
- U šestom poglavlju su predstavljeni glavni zaključci istraživanja, nakon čega je izložen popis korišćene literature. U Prilogu 1 dati su osnovni podaci o jednomašinskoj testnoj mreži, dok su u Prilogu 2 i Prilogu 3 dati podaci o IEEE testnim mrežama od 11 i 30 čvorova respektivno.

## 2. TRANZIJENTNA STABILNOST ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA

Savremeni elektroenergetski sistemi (ESS) susreću se sa nizom problema koji su posljedica neprekidnog povećanja konzuma koji dovodi do velikog naprezanja prenosnih vodova i povećanja gubitaka u prenosu. Uslijed toga je potrebno posvetiti sve veću pažnju održavanju stabilnog i pouzdanog rada elektroenergetskog sistema. Od gore navedenih problema poremećaj tranzijentne stabilnosti EES izdvaja se kao jedan od najkritičnijih događaja uslijed katastrofalnih posljedica koje ga prate. Posljedice mogu biti ispad iz sinhronizma, oštećenje opreme, uticaj na očuvanje naponske stabilnosti [1] a samim tim i na smanjenje pouzdanosti sistema [2], kaskadni ispad i u najgorem slučaju totalni *blackout* [3] što direktno dovodi i do povećanja troškova uslijed neisporučene električne energije i oštećene opreme. Pored toga svjedoci smo rapidnog prelaska s konvencionalne proizvodnje energije upotrebom sinhronih generatora na proizvodnju iz distribuiranih izvora poput solarnih panela i vjetrogeneratora. Ova velika penetracijom obnovljivih izvora, njihovo dinamičko ponašanje i niska inercija mogu dovesti u pitanje očuvanje tranzijentne stabilnosti sistema [73]. Zbog svega navedenog je izuzetno važno procijeniti granice i obezbijediti očuvanje tranzijentne stabilnosti EES.

Ovo poglavlje je posvećeno definisanju pojma tranzijentne stabilnosti EES. Najprije su predstavljene osnovne metode za procjenu tranzijentne stabilnosti jednomašinskog EES, sa fokusom na metod za direktnu analizu - metod jednakih površina i metod za indirektnu analizu u koji spada metod numeričke integracije diferencijalnih jednačina kretanja rotora. Takođe, pored jednomašinskog sistema, problematika tranzijentne stabilnosti proširena je na složeniji, ali inženjerski pogodniji, višemašinski sistem.

### 2.1. Definicije i podjela stabilnosti

Stabilnost elektroenergetskog sistema je sposobnost sistema da ostane u uravnoteženom stanju tokom normalnog rada sistema i da vrati uravnotežene uslove rada u minimalnom mogućem vremenu nakon pojave poremećaja [4]. U teoriji stabilnost se dijeli na (Slika 1) [5 - 6]:

- *naponsku stabilnost*
- *stabilnost frekvencije*
- *rezonantnu stabilnost*
- *stabilnost vođenu pretvaračem*
- *stabilnost ugla rotora*

*Naponska stabilnost*, takođe poznata i kao naponsko-reaktivna stabilnost, predstavlja sposobnost EES-a da održava prihvatljive vrijednosti napona u svim čvorovima sistema. Za sistem se kaže da je naponski nestabilan ako je koeficijent  $U - Q$  osjetljivosti negativan, odnosno ako se u makar jednom čvoru napon smanjuje kada u istom čvoru reaktivna snaga raste. U ovakvim slučajevima, sistem ne može održavati stabilne i odgovarajuće nivoe napona, što može dovesti do ozbiljnih problema u radu elektroenergetske mreže, pa i do prekida u snabdijevanju električnom energijom.

*Stabilnost frekvencije* je sposobnost EES da održava frekvenciju u dozvoljenom opsegu nakon ozbiljnog poremećaja sistema koji rezultira značajnom neravnotežom između proizvodnje i potrošnje.

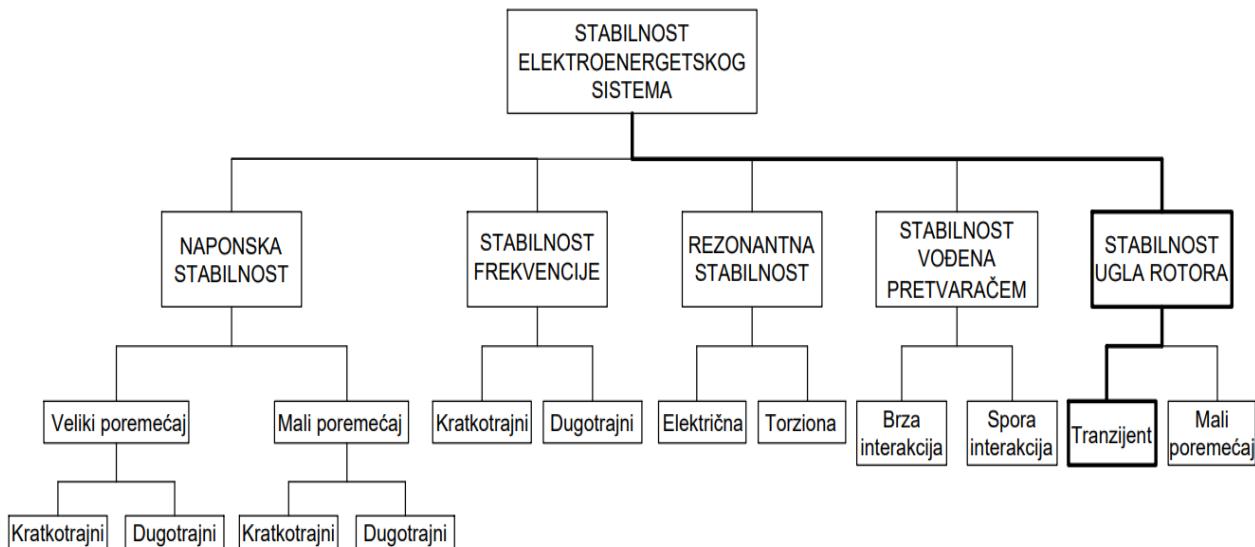
*Rezonantna stabilnost* predstavlja relativno noviju oblast stabilnosti koja se inkorporirala među dosadašnju ustaljenu podjelu. Rezonanca uopšteno nastaje kada se periodično odvija razmjena energije na oscilatoran način. Ukoliko se ove oscilacije povećavaju u slučaju nedovoljnog rasipanja energije na putu protoka to se manifestuje povećanjem magnituda napona, struje, momenta itd. Kada ove magnituda premaši određene pragove, kaže se da je došlo do nestabilnosti rezonance.

*Stabilnost vođena pretvaračem* je takođe nova kategorija stabilnosti koja je uvedena da pokrije brze elektromagnetne tipove fenomena uzrokovane reakcijom energetske elektronike u EES na dinamičke fenomene i njihove povezane šeme upravljanja.

*Stabilnost ugla rotora* predstavlja sposobnost sinhronih mašina u EES da ostanu u sinhronizmu pod normalnim radnim uslovima i da povrate sinhronizam nakon što su izložene poremećaju [7]. Ugaona stabilnost se garantuje ako se nakon poremećaja uglovi rotora mašina stabilizuju u nekoj konačnoj vrijednosti u dozvoljenom opsegu. Pomenuta vrijednost zavisi od ravnoteže mehaničkog momenta/snage turbine koji pokreće generator i električnog (otpornog) momenta/snage generatora [5]. Vremenski okvir od interesa za proučavanje ove vrste stabilnosti je kratkoročan i obično je od 3s do 10s nakon nastanka poremećaja.

Prema prirodi poremećaja, stabilnost ugla rotora se dalje može razložiti na: stabilnost ugla rotora pri malim poremećajima i tranzijentnu stabilnost. Prva grupa odnosi se na male i spore poremećaje koji pod izvjesnim uslovima mogu biti uzrok nestabilnosti sistema. Navedeno se može objasniti na primjeru jednog proizvodnog i jednog potrošačkog područja povezanih prenosnim vodom. Snaga razmjene između dvije oblasti nije neograničena već postoji određena vrijednost granične snage koja se može prenijeti a da sistem ne izgubi sinhronizam. Pri graničnom iznosu snage za sistem se kaže da je u stanju labilne ravnoteže. Pri ovim uslovima, priraštaj opterećenja doveo bi do ispada iz ravnotežnog položaja, odnosno sistem bi postao nestabilan.

Termin „*tranzijentne stabilnosti*“ je ekvivalentan „*stabilnosti ugla rotora pri velikim poremećajima*“, ali se prvi termin češće koristi u zajednici elektroenergetskih sistema [31]. Prilikom velikih poremećaja u EES mogu se desiti velika njihanja rotora sinhrone mašine, kao i gubitak sinhronizma. Gubitak sinhronizma se događa za nekoliko sekundi nakon početka poremećaja. Uzroci potencijalnog narušavanja tranzijentne stabilnosti elektroenergetskog sistema uključuju kratki spoj, kao najčešći slučaj, ili iznenadno isključenje elemenata EES poput generatora, vodova itd. Za razliku od stabilnosti ugla rotora pri malim poremećajima, koja se može posmatrati kao linearni problem uslijed malih perturbacija radne tačke oko ravnotežnog stanja, u slučaju problema tranzijentne stabilnosti nelinearnost se mora uzeti u obzir jer stanja sistema mogu ozbiljno odstupati od tačke ravnoteže ili se ravnotežna tačka može promijeniti nakon velikih poremećaja [8]. Ovaj rad analizira tranzijentnu stabilnost EES pri kratkim spojevima kao najčešćom klasom velikih poremećaja u EES.

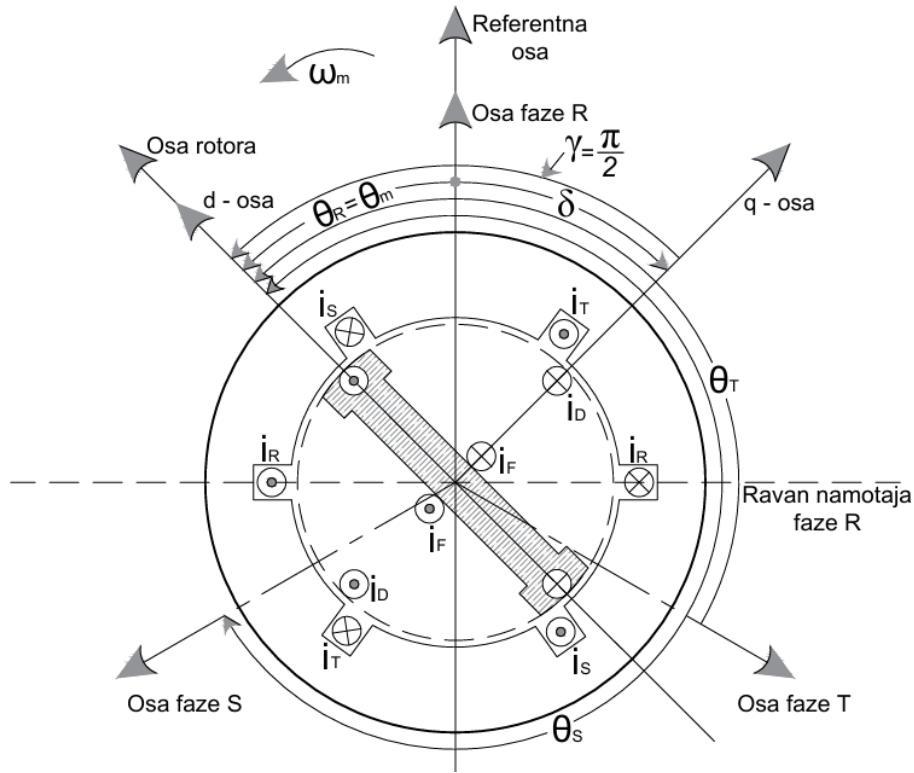


Slika 1. Podjela stabilnosti EES

## 2.2. Jednačina kretanja rotora sinhrone mašine

Kako ugaona stabilnost sistema zavisi od položaja ugla rotora sinhrone mašine prije i nakon nastanka poremećaja, kriterijum stabilosti bi se mogao izvesti rješavanjem diferencijalne jednačine kretanja rotora sinhronih mašina u sistemu [9]. U normalnom stacionarnom radnom režimu relativni položaj ose rotora i rezultujuće ose magnetnog polja je fiksiran. Ugao između njih  $\theta_R$  je poznat kao ugao snage, ugao obrtnog momenta ili ugao rotora [10]. Tokom bilo kakvog poremećaja, rotor usporava ili ubrzava u odnosu na sinhrono rotirajuću magnetomotornu silu u međugvožđu, čime

počinje relativno kretanje. Jednačina koja opisuje relativno kretanje poznata je kao *jednačina njihanja* odnosno *jednačina kretanja rotora sinhronne mašine*, koja je nelinearna diferencijalna jednačina drugog reda. Ako rotor postigne sinhronu brzinu nakon oscilatornog prelaznog procesa izazvanog poremećajem, mašina ostaje stabilna [11].



Slika 2. Dvopolni sinhroni generator – položaj osa i namotaja

Zakon relativnog kretanja rotora u slučaju mašine sa 2 pola ( $p = 1$ ), u skladu sa oznakama na Slici 2, je oblika [12]:

$$\theta_m = \omega_m t + \delta + \frac{\pi}{2} \quad [\text{rad}] \quad (2.2.1)$$

gdje je:

$\theta_m$  – mehanički ugao (ugao između ose faze R i d – ose)

$\omega_m$  – sinhrona mehanička ugaona brzina [rad/s],

$\delta$  – električni ugao snage (ugao između R – ose i q – ose).

U slučaju višepolne mašine, prethodna relacija se generalizuje i dobija oblik:

$$\theta = p\theta_m = p\omega_m t + \delta + \gamma \quad [\text{rad}] \quad (2.2.2)$$

odakle je:

$$\delta = p\theta_m - \omega_s t - \gamma \quad [rad] \quad (2.2.3)$$

gdje je:

$\omega_s = p\omega_m$  – nazivna električna sinhrona ugaona brzina [ $rad/s$ ],

$$\gamma = \frac{\pi}{2},$$

$N_n$  – nazivna brzina obrtanja u [ $obr/min$ ],

$f$  – nazivna učestanost naizmjeničnog napona (50 Hz u Evropi).

Matematički je relativno kretanja rotora sinhronog generatora moguće je zapisati u obliku diferencijalne jednačine drugog reda [13] :

$$J \frac{d^2\theta_m}{dt^2} + D_1 \frac{d\theta_m}{dt} + D_2 \left( \frac{d\theta_m}{dt} - \omega_s \right) = M_m - M_e \quad (2.2.4)$$

gdje je:

$J$  – aksijalni moment inercije svih obrtnih masa na zajedničkoj osovini (rotori generatora i turbine, obrtna pobudnica itd.) [ $kgm^2$ ],

$M_m$  – mehanički moment primarne mašine (turbine) koji pokreće generator [ $Nm$ ],

$M_e$  – električni (otporni) moment generatora [ $Nm$ ],

$D_1$  – koeficijent viskoznog prigušenja osovine rotora generatora,

$D_2$  – koeficijent prigušenja namotaja amortizera.

Zanemarujući koeficijente prigušenja, jednačina (2.2.4.) dobija oblik :

$$J \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = M_m - M_e \quad (2.2.5)$$

S obzirom na (2.2.2) i (2.2.3), relacija (2.2.5) dobija oblik:

$$\frac{J}{p} \frac{d^2\delta}{dt^2} = J \frac{d\omega_m}{dt} = M_m - M_e \quad (2.2.6)$$

Razlika momenata iz prethodne jednačine predstavlja momenat ubrzanja  $M_a$  pa je jednačinu (2.2.6.) moguće zapisati i u obliku:

$$\frac{J}{p} \frac{d^2\delta}{dt^2} = M_a \quad (2.2.7)$$

Uvažavajući da je mehanička snaga koju turbina predaje generatoru  $P_m = \omega_m M_m$ , a električna snaga koju generator predaje mreži  $P_e = \omega_m M_e$  i množeći jednačinu (2.2.7) sa  $\omega_m$  dobija se:

$$\omega_m \frac{J}{p} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e = P_a \quad (2.2.8)$$

U relaciji (2.2.8.) veličina  $J\omega_m$  naziva se *konstanta inercije* i dobija se iz kinetičke energije obrtnih masa [15]:

$$W_k = \frac{J\omega_m^2}{2} \quad (2.2.9)$$

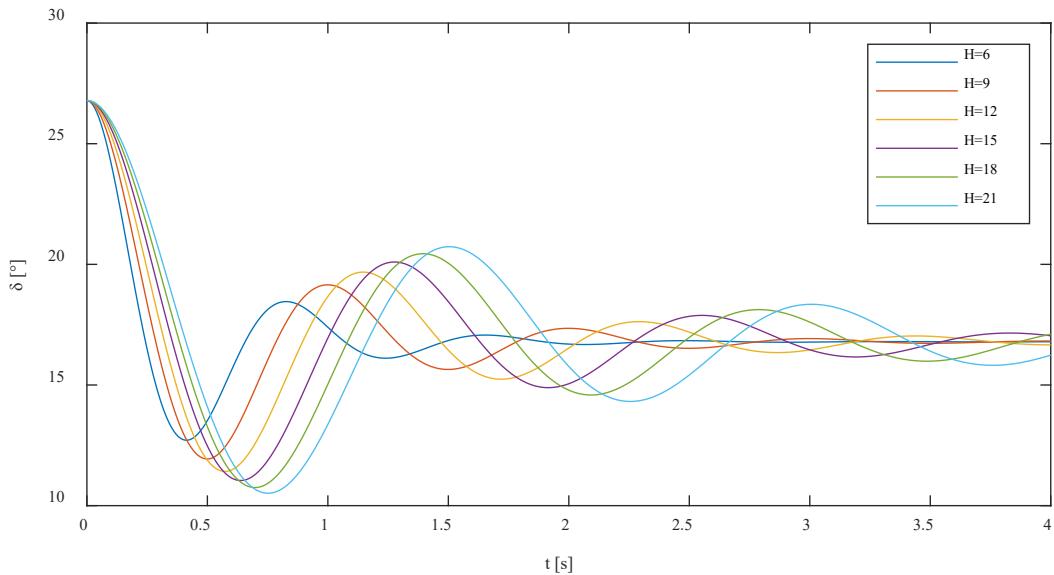
Sada je relacija (2.2.8.):

$$\frac{2W_k}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.2.10)$$

Odnos između kinetičke energije  $W_k$  [MWs] i nominalne prividne snage  $S_n$  [MVA] u literaturi je poznat po nazivom *mehanička konstanta mašine H* ili *inerciona konstanta*. Ona predstavlja sposobnost mašine da se nosi sa poremećajem [15]:

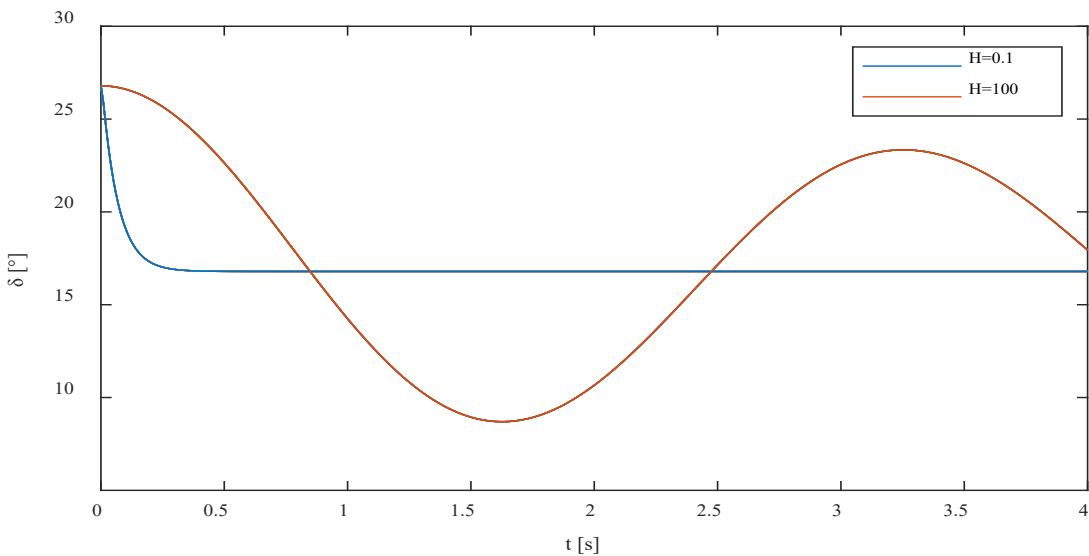
$$H = \frac{W_k}{S_n} \left[ \frac{\text{MWs}}{\text{MVA}} \right] \quad (2.2.11)$$

Analizom rada generatora u dvomašinskom sistemu [16] moguće je doći do talasnog oblika ugla rotora prikazanog na Slici 3. Može se zaključiti da su vrijeme prigušenja i maksimalno prekoračenje proporcionalni vrijednostima konstante inercije (unutar određenog opsega). Veća vrijednost konstante inercije rezultira dužim vremenom prigušenja i naravno, većim maksimalnim prekoračenjem [17].



Slika 3. Zavisnost ugla  $\delta$  od promjene vrijednosti konstante  $H$

Na Slici 4 prikazan je slučaj veoma velike i vrlo male vrijednosti konstante  $H$ . Može se zaključiti da će talasni oblik ugla opterećenja generatora biti potpuno sinusoidan pri beskonačno velikim vrijednostima konstante  $H$ . S druge strane, pri veoma malim vrijednostima konstante  $H$ , talasni oblik će biti eksponencijalno opadajuća funkcija.



Slika 4. Zavisnost ugla  $\delta$  od karakterističnih vrijednosti konstante  $H$

S obzirom na (2.2.11), i nakon množenja i dijeljenja jednačine (2.2.10) sa  $S_n$  dobija se:

$$\frac{2HS_n}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.2.12)$$

Uzimajući za baznu snagu  $S_B = S_n$  i uvažavajući da je  $\omega_s = 2\pi f$ , jednačina (2.2.12) postaje:

$$\frac{H}{\pi f} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad [r.j.] \quad (2.2.13)$$

gdje se  $\delta$  izražava u [rad],  $H$  u  $\left[\frac{MWs}{MVA}\right]$ , a  $P_m$  i  $P_e$  u [r.j.].

U literaturi se često umjesto inercione konstante  $H$  koristi konstanta inercije  $T$  [s] koja je jednaka dvostrukoj vrijednosti  $H$  pa se jednačina (2.2.13) može zapisati i u obliku [18]:

$$\frac{T}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad [r.j.] \quad (2.2.14)$$

Ako se ugao  $\delta$  u relaciji (2.2.12) izrazi u električnim stepenima umjesto u radijanima i ako se stavi [19]:

$$M = \frac{HS_n}{180f} \left[ \frac{MWs^2}{^\circ el} \right] \quad (2.2.16)$$

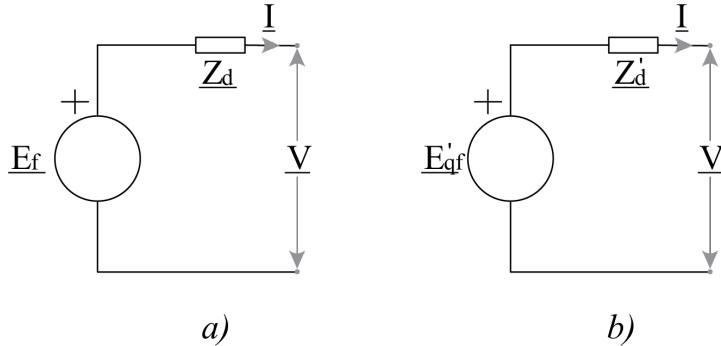
gdje je  $M$  konstanta inercije agregata, dobija se jednačina njihanja u obliku:

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.2.17)$$

Rješavanjem diferencijalne jednačine (2.2.13) ili (2.2.17) dobija se zavisnost vrijednost promjene ugla  $\delta$  rotora sinhrone mašine u funkciji vremena. Kriva  $\delta = f(t)$  naziva se *kriva oscilovanja* ili *kriva njihanja rotora* sinhrone mašine.

### 2.2.1. Kriva snaga – ugao sinhronog generatora

Na Slici 5 prestavljen je osnovni način modelovanja sinhrone mašine sa cilindričnim rotorom koristeći *Theveninov ekvivalent* [20]. Zavisno od posmatranog perioda koristi se odgovarajuća vrijednost impedanse u tranzijentnom (prelaznom) ili sinhronom (stacionarnom) periodu.



Slika 5. Theveninov ekvivalent sinhronog generatora sa cilindričnim rotorom

a) Stacionarno stanje, b) Tranzijentno stanje stanje

Prema Slici 5 struja generatora u stacionarnom stanju je:

$$\underline{I} = \frac{\underline{E_f} - \underline{V}}{\underline{Z_d}} = \frac{\underline{E} - \underline{V}}{\sqrt{3} \cdot \underline{Z_d}} = \frac{\underline{E_f} \angle \delta - \underline{V} \angle 0}{\underline{Z_d} \angle \beta} = \frac{\underline{E} \angle \delta - \underline{U} \angle 0}{\sqrt{3} \cdot \underline{Z_d} \angle \beta} \quad (2.2.1.1)$$

$$\text{gdje je: } V = \frac{U}{\sqrt{3}}, \quad E_f = \frac{E}{\sqrt{3}}, \quad Z_d = Z_d \angle \beta = R + jX_d .$$

Kompleksna snaga na izlazu generatora je:

$$\underline{S} = P + jQ = 3 \cdot \underline{V} \cdot \underline{I}^* = \sqrt{3} \cdot \underline{U} \cdot \frac{\underline{E}^* - \underline{U}^*}{\sqrt{3} \cdot \underline{Z}_d} = \frac{\underline{E} \cdot U \angle -\delta}{Z_d \angle -\beta} - \frac{U^2}{Z_d \angle -\beta} = \frac{\underline{E} \cdot U}{Z_d} \angle (\beta - \delta) - \frac{U^2}{Z_d} \angle \beta \quad (2.2.1.2)$$

odakle je aktivna snaga:

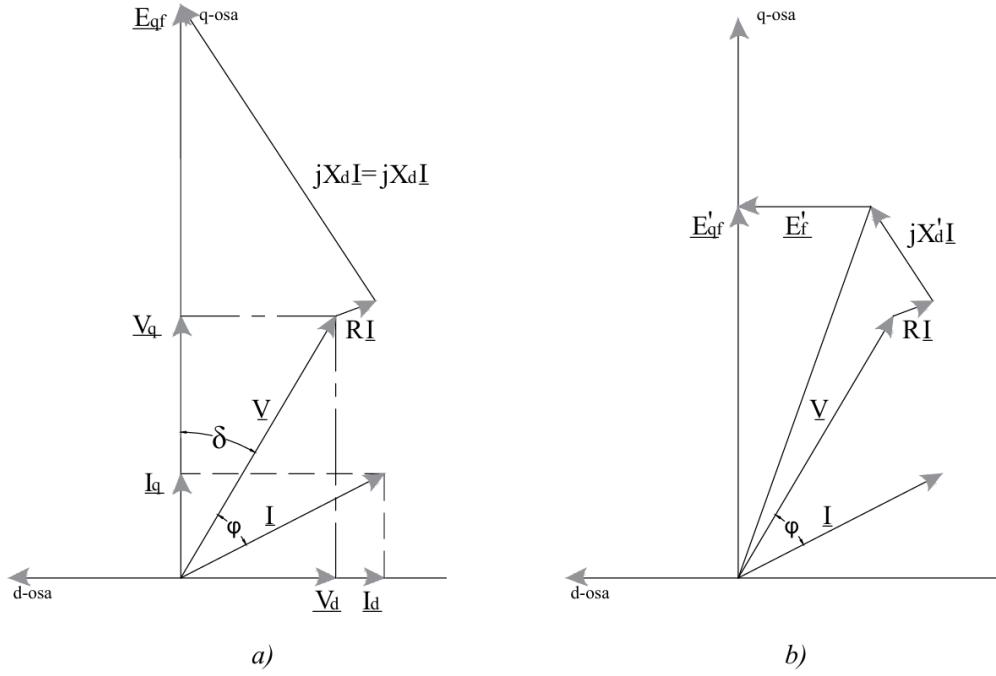
$$P = \operatorname{Re}\{S\} = \frac{E \cdot U}{Z_d} \cos(\beta - \delta) - \frac{U^2}{Z_d} \cos \beta = \frac{E \cdot U}{Z_d} \sin(\delta + \psi) - \frac{U^2}{Z_d} \sin \psi \quad (2.2.1.3)$$

i reaktivna snaga:

$$Q = \text{Im}\{S\} = \frac{E \cdot U}{Z_d} \sin(\beta - \delta) - \frac{U^2}{Z_d} \sin \beta = \frac{E \cdot U}{Z_d} \cos(\delta + \psi) - \frac{U^2}{Z_d} \cos \psi \quad (2.2.1.4)$$

gdje je  $\psi = \frac{\pi}{2} - \beta$  komplementarni ugao sinhrone impedanse  $Z_d$ .

Fazorski dijagram sinhronog generatora sa svim veličinama u stacionarnom i tranzijentnom stanju prikazan je na Slici 6.



Slika 6. Fazorski dijagram sinhronog generatora sa cilindričnim rotorom

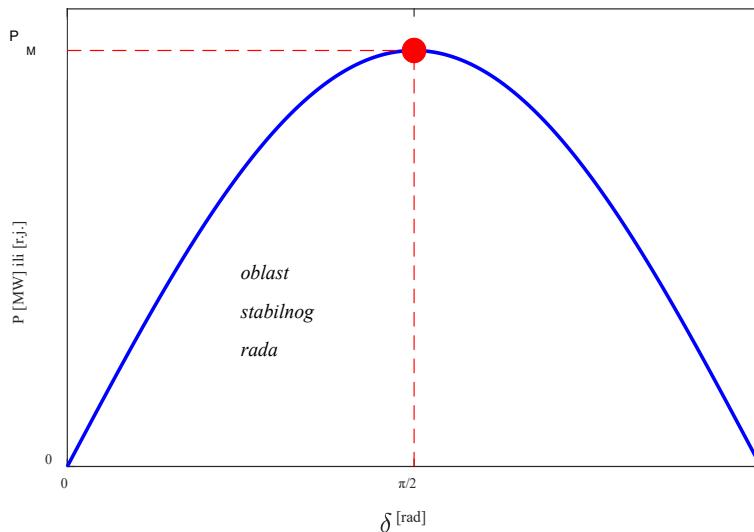
a) Stacionarno stanje, b) Tranzijentno stanje stanje

S obzirom da za sinhrone mašine važi  $Z_d \approx jX_d$ , odnosno  $\beta \approx \frac{\pi}{2}$  i  $\psi \approx 0$ , onda se izrazi (2.2.1.3.) i (2.2.1.4.) mogu uprostiti u oblike [21]:

$$P = \frac{E \cdot U}{X_d} \sin \delta = P_M \sin \delta \quad (2.2.1.5)$$

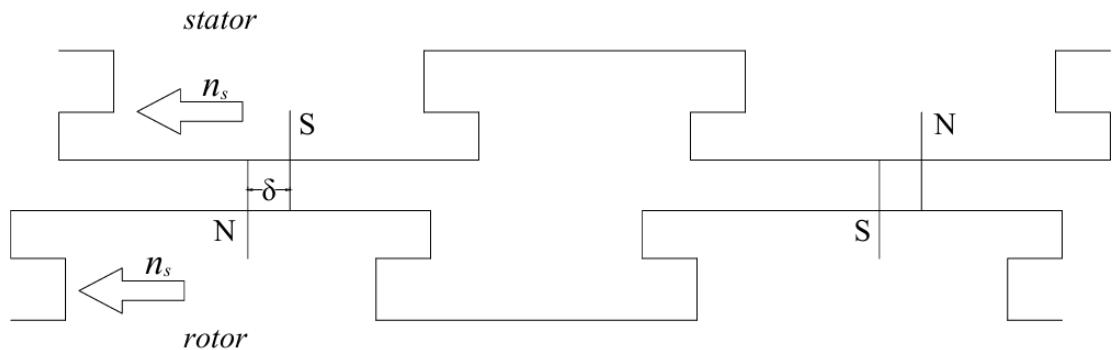
$$Q = \frac{E \cdot U}{X_d} \cos \delta - \frac{U^2}{X_d} = P_M \cos \delta - \frac{U^2}{X_d} \quad (2.2.1.6)$$

Iz dobijenog izraza za aktivnu snagu (2.2.1.5) uočava se da je razvijena snaga proporcionalna sinusu ugla opterećenja  $\delta$ , naponu na krajevima generatora  $U$  i elektromotornoj sili generatora  $E$ . Dijagrami  $P(\delta)$  i  $Q(\delta)$  nazivaju se *krive snaga-ugao*, a kriva  $P(\delta)$  naziva se još i *kriva njihanja*. Kriva njihanja predstavljena je na Slici 7. Ona postiže svoj maksimum  $P_M = \frac{E \cdot U}{X_d}$  pri  $\delta = \frac{\pi}{2}$ . Tačka maksimuma prenosa aktivne snage predstavlja granicu statičke stabilnosti turbogeneratora, odnosno za sve uglove manje od  $\frac{\pi}{2}$  generator se nalazi u stabilnom režimu rada.



Slika 7. Kriva njihanja sinhronog generatora sa cilindričnim rotorom

Ugao  $\delta$  predstavlja kašnjenje rezultantnog magnetnog fluksa generatora u odnosu na magnetni fluks pobude. Drugim riječima, magnetno polje sa strane rotora „vuče” magnetno polje sa strane statora, ili još, magnetno polje statora usporava rotor - stvara se elektromagnetski moment koji se suprotstavlja momentu turbine koja pokreće rotor. Što je veće električno opterećenje generatora i što on razvija veću aktivnu snagu, ovo zaostajanje je veće, a samim tim raste i ugao opterećenja. Međutim, sve dok je ovaj ugao manji od  $\pi/2$  brzina rotora ostaje nepromijenjena, jednaka sinhronoj brzini. Ukoliko se ta granica prekorači, generator ispada iz sinhronizma, magnetna veza između statora i rotora „puca” i rotor pod uticajem momenta turbine počinje nekontrolisano ubrzavati. Fizički smisao ugla snage ilustruje dat je na Slici 8, pri čemu su magnetno polje sa strane rotora i sa strane statora prikazani ekvivalentnom dvopolnom konfiguracijom sa istaknutim polovima [21].

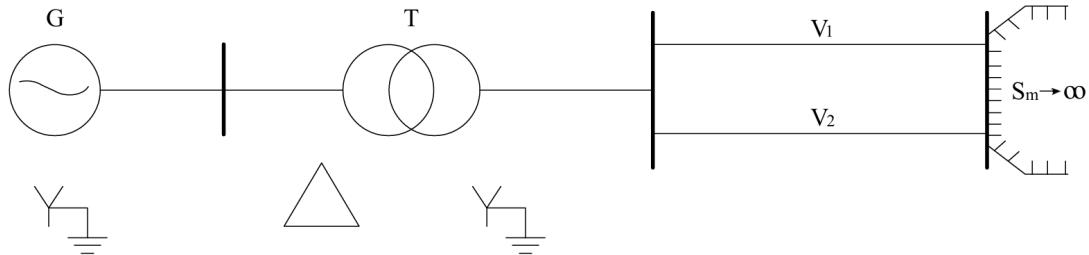


Slika 8. Fizička interpretacija ugla  $\delta$

Analogno, polazeći od Slike 5 b), došlo bi se do izraza za aktivnu i reaktivnu snagu sinhronog generatora sa cilindričnim rotorom u tranzijentnom stanju. Struktura izraza za  $P$  i  $Q$  bila bi identična izrazima (2.2.1.3) i (2.2.1.4), s tom razlikom što bi, umjesto veličina  $E$ ,  $Z_d$  i  $X_d$ , figurisale veličine iz tranzijentnog perioda  $E'$ ,  $Z'_d$  i  $X'_d$ .

### 2.3. Jednomašinski sistem

U nauci i literaturi koja se bavi ispitivanjem tranzijentne stabilnosti dominantno se pokazno koristi šema jednomašinskog sistema EES koja je prikazana na Slici 9 [22]. Jednomašinski sistem sastoji se od bloka generator – transformator koji je preko dva paralelna prenosna voda povezan sa beskonačno jakom mrežom. Kako je u savremenim EES snaga pojedinačne sinhronne mašine neuporedivo manja od ukupne snage ostatka sistema, smatra se da se sistem može aproksimirati jakom mrežom. Polazeći od ove pretpostavke mreža na koju je priključen generator može se tretirati kao mreža beskonačne snage čiji su naponi na mjestu priključenja i učestanost konstantni. Još jedna pretpostavka koja se uvodi jeste da su elektromotorna sila generatora  $E$  i napon jake mreže  $U$  konstantni, kao i da u mreži nema aktivnih gubitaka.



Slika 9. Jednomašinski sistem

Ovaj jednostavni sistem može se posmatrati kao sistem od dvije proizvodne stanice povezane preko linije sa reaktansom  $x$  (*transfer impedansa*). Vrijednost snage koja se prenosi sa jednog na drugi sistem može se izračunati na sledeći način [14]:

$$P_e = \frac{E U}{x} \sin \delta \quad (2.3.1)$$

### 2.3.1. Metode za procjenu tranzijentne stabilnosti jednomašinskog sistema

Uopšteno, metode za procjenu tranzijentne stabilnosti jednomašinskog sistema mogu se podijeliti na:

- *direktne*: metod jednakih površina [23 - 24], i metod Ljapunova [25] i
- *indirektne*: metod numeričke integracije [26]

Prethodno pomenute metode - metod jednakih površina i metod numeričke integracije biće upotrijebljene za procjenu tranzijente stabilnosti jednomašinskog sistema u ovom radu.

#### 2.3.1.1. Metod jednakih površina

Metod jednakih površina je metod koji se bazira na grafičkoj interpretaciji kinetičke energije obrtnih masa generatora i pogonske mašine na dijagramu zavisnosti aktivne snage koju generator isporučuje mreži  $P_e$  u funkciji ugla rotora sinhrone mašine  $\delta$ .

Ukoliko se jednačina (2.2.13) u kojoj su sve promjenjive ( $\delta$ ,  $\omega$ ,  $P_m$ ,  $P_e$ ,  $P_e$ ) u opštem slučaju nelinearne funkcije vremena preuredi u oblik [1]:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_e) \quad (2.3.1.1.1)$$

a potom i pomnoži sa  $2 \frac{d\delta}{dt}$ , dobija se jednakost:

$$2 \frac{d\delta}{dt} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{2\pi f}{H} (P_m - P_e) \frac{d\delta}{dt} \quad (2.3.1.1.2)$$

gdje  $\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s = \Delta\omega$  predstavlja odstupanje kružne od početne sinhrone učestanosti.

Prethodna jednačina se može preuređiti na sledeći način:

$$\frac{d}{dt} \left[ \left( \frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = \frac{2\pi f}{H} (P_m - P_e) \frac{d\delta}{dt} \quad (2.3.1.1.3)$$

ili

$$d \left[ \left( \frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = \frac{2\pi f}{H} (P_m - P_e) d\delta \quad (2.3.1.1.4)$$

Nakon integraljenja u granicama od početnog ugla  $\delta_0$  do trenutnog ugla  $\delta$  dobija se:

$$\left(\frac{d\delta}{dt}\right)^2 = \frac{2\pi f}{H} \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta \quad (2.3.1.1.5)$$

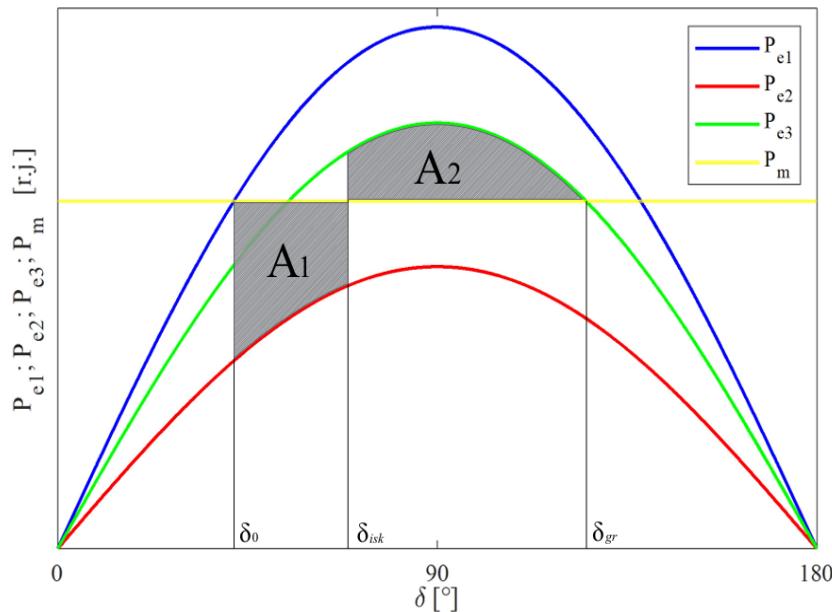
Odakle slijedi da je:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s = \sqrt{\frac{2\pi f}{H} \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta} \quad (2.3.1.1.6)$$

Da bi se nakon pojave poremećaja očuvala stabilnost neophodno je da, nakon određenog vremena, promjena kružne učestanosti (odnosno promjena brzine) bude jednaka nuli. Da bi taj uslov bio ispunjen, polazeći od jednačine (2.3.2.1.6), potrebno je da :

$$\int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (2.3.1.1.7)$$

Grafička interpretacija izraza (2.3.1.1.7) pri poremećaju izazvanim kratkim spojem data je na Slici 10. Uslov da generator ostane tranzijentno stabilan jeste da je površina ubrzanja  $A_1$  manja ili jednaka površini usporenja  $A_2$ . Ukoliko je površina usporenja veća od površine ubrzanja za sistem se kaze da je stabilan sa rezervom stabilnosti  $R = A_2 - A_1$ .



Slika 10. Ilustracija kriterijuma jednakih površina pri kratkom spoju

Na Slici 10. krive  $P_{e1}(\delta)$ ,  $P_{e2}(\delta)$  i  $P_{e3}(\delta)$  predstavljaju aktivne snage koje generator isporučuje mreži prije, tokom i nakon eliminacije kratkog spoja respektivno, sa upotrebom odgovarajućih vrijednosti parametra rektanse mreže  $x$ , dok prava  $P_m$  prestavlja mehaničku snagu na vratilu turbine. Ugao  $\delta_0$  je ugao opterećenja prije poremećaja, ugao  $\delta_{gr}$  predstavlja granični ugao isključenja kvara, dok  $\delta_{isk}$  predstavlja kritični ugao isključenja kvara.

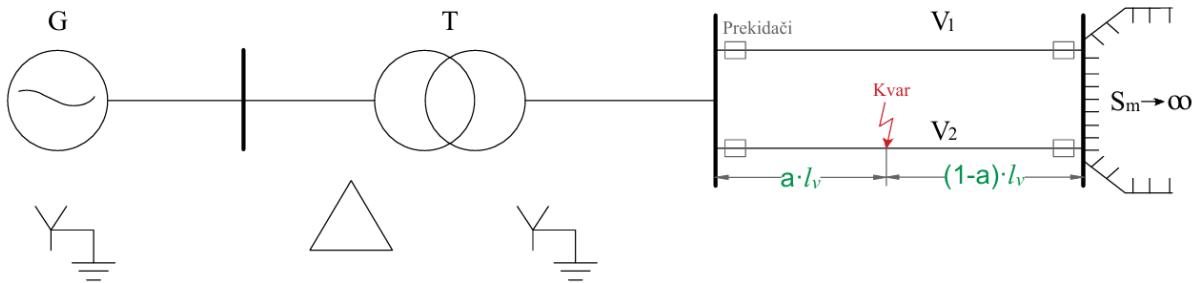
Kao što je već naglašeno, kratki spojevi (KS) su najčešći tip velikih poremećaja u elektroenergetskom sistemu. Praćeni su isključenjem komponente pogodjene kvarom (najčešće vod), što se takođe ubraja u drugu kategoriju velikih poremećaja. Definicija kratkih spojeva prema standardu IEC 909 [74]: „kratak spoj se javlja pri slučajnom ili namjernom kontaktu provodnika, preko malog otpora ili impedanse, između dvije ili više tačaka koje se nalaze pod različitim naponom“. Razlikuju se četiri tipa kratkog spoja:

- *trofazni kratki spoj (3ks)*
- *dvoфazni kratki spoj (2ks)*
- *dvoфazni kratki spoj sa zemljom (2ksz)*
- *jednofazni kratki spoj (1ks)*

Trofazni kratki spoj spada u grupu simetričnih poremećaja, dok dvoфazni, dvoфazni sa zemljom i jednofazni KS pripadaju nesimetričnim (neuravnoteženim) poremećajima. Kratki spoj se može ostvariti preko neke konačne impedanse, najčešće električnog luka na mjestu kvara. Električni luk, u zavisnosti od vremena trajanja, može ozbiljno oštetiti okolnu opremu i ugroziti život ljudi i životinja u njegovoj blizini uslijed visoke temperature i velike količine toplove koja se razvija u njemu. Ako je kratki spoj nastao neposrednim kontaktom provodnih djelova na različitim potencijalima, onda je u pitanju takozvani „metalni“ kratki spoj [75].

Statistički, na trofazni kratki spoj otpada 5% svih kratkih spojeva, na dvoфazni 10%, na jednofazni 80% i na dvoфazni sa istovremenim spojem sa zemljom 5% [76]. Iako je tropski kratki spoj najprije kvar od gore navedenih, njega prate najteže posljedice iz kog razloga on upravo i služi kao najreprezentativniji primjer u analizama vezanim za kvarove u EES.

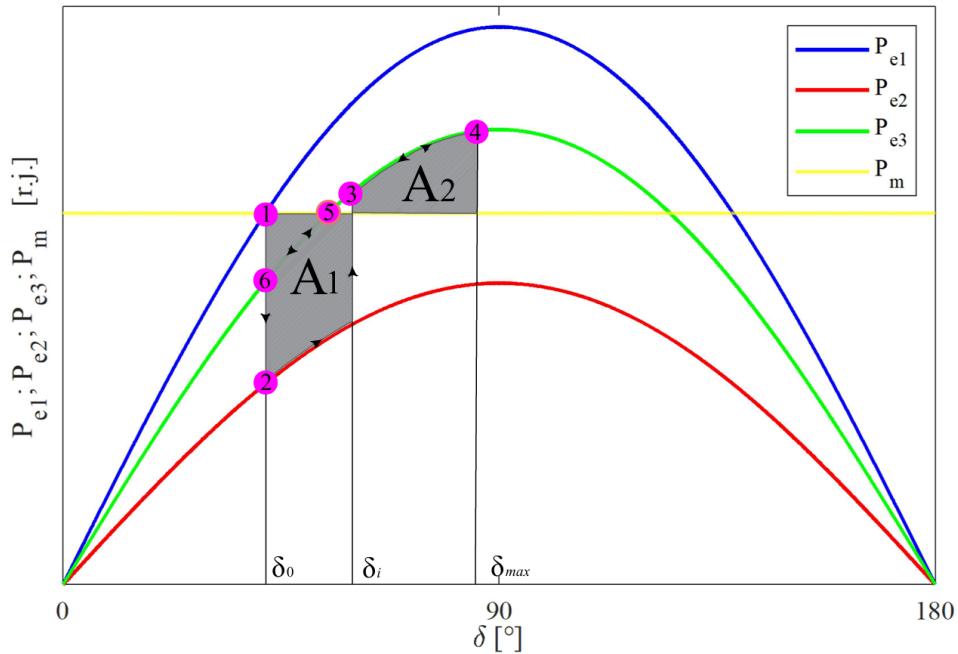
Neka je u proizvoljnoj tački na paralelnom vodu  $V_2$ , došlo do pojave „metalnog“ trofaznog kratkog spoja na udaljenosti  $a \cdot l_v$  ( $a \in [0-1]$ ) od početka voda (Slika 11). Ako se trofazni KS dogodi na početku voda (tj. na udaljenosti  $a = 0$ ), zbog pada napona sabirnice na nulu nema prenosa snage u beskonačno jaku mrežu (pogledati jednačinu (2.3.1)). Međutim, kada se kvar dogodi na udaljenosti  $a \cdot l_v$  od početka voda, koja je različita od nule, postojiće određeni prenos snage preko ispravnog voda  $V_1$ . Vrijednost prenijete snage će zavisiti od udaljenosti mesta kvara, tj. od vrijednosti koeficijenta  $a$ .



Slika 11. Tropolni metalni kratki spoj u jednomašinskom sistemu

Nakon određenog vremena, koje zavisi od vremena reagovanja reljene zaštite i sopstvenog vremena isključenja prekidača, doći će do dvostranog isključenja voda u kvaru. Nakon toga će sistem, iako oslabljen, preko voda  $V_1$  koji je ostao u pogonu, nastaviti da u jaku mrežu isporučuje određenu (manju) snagu. Zbog toga je pri procjeni tranzijentne stabilnosti sistema potrebno posmatrati tri režima (Slika 12) :

- prije kvara (normalni pogon), kriva  $P_{e1}(\delta)$
- tokom trajanja kvara, kriva  $P_{e2}(\delta)$
- nakon eliminacije kvara, kriva  $P_{e3}(\delta)$



Slika 12. Krive snaga – ugao pri 3ks na jednom od vodova u jednomašinskom sistemu

U trenutku neposredno prije nastanka KS ( $\delta = \delta_0$  - radna tačka 1) mehanička i električna snaga su jednake. Zbog nemogućnosti trenutne promjene ugla rotora, što je inercije mašine, nova radna tačka nalazi se u tački 2 a vrijednost ugla ostaje  $\delta_0$ . Tako dolazi do suficita mehaničke snage na vratilu generatora ( $P_m > P_{e2}(\delta_0)$ ) uslijed čega je snaga ubrzanja rotora  $P_a > 0$  pa zbog pozitivne vrijednosti snage ubrzanja dolazi do ubrzavanja rotora mašine i do povećanja ugla  $\delta$ . U generatoru dolazi do akumuliranja kinetičke energije tokom perioda akceleracije što je reprezentovano površinom  $A_1$ . U određenom trenutku ( $\delta = \delta_i$ ) dešava se istovremeno dvostrano isključenja voda u kvaru i trenutnog prelaza na karakteristiku  $P_{e3}(\delta)$ . U ovoj radnoj tački (tačka 3) važi da je  $P_{e3}(\delta_i) > P_m$ , odnosno snaga akceleracije mašine je negativna uslijed čega dolazi do postepenog usporavanja rotora. Površinom usporenja  $A_2$  vizuelno je prikazana količina kinetičke energije koju mašina troši tokom perioda kada je  $P_e > P_m$ . Pošto ne može doći do trenutne promjene ugaone brzine rotora, ugao  $\delta$  će i dalje rasti jer će ugaona brzina biti i dalje veća od sinhronе. Promjenu režima karakteriše dio krive  $P_{e3}(\delta)$  u opsegu  $\delta_i \leq \delta \leq \delta_{max}$ . U ovom opsegu ugaona brzina mašine će konstantno opadati. U tački 4 se pretpostavlja da je ugaona brzina sinhrona, međutim pošto u njoj važi da je  $P_{e3}(\delta_{max}) > P_m$  doći će do daljeg smanjenja brzine ispod sinhronе, a samim tim i do smanjenja ugla opterećenja. Ugao  $\delta$  će se postepeno smanjivati i doći do tačke 5 u kojoj je  $P_{e3}(\delta) = P_m$ . Nakon toga će ponovo doći do ubrzavanja rotora, ali pošto je u ovom trenutku ugaona brzina manja od sinhronе, uslijed njenog konstantnog opadanja, ugao opterećenja će nastaviti da opada dok ugaona brzina ne dostigne sinhronu (tačka 6). Pošto je u ovom trenutku  $P_{e3}(\delta) < P_m$  ugao  $\delta$  ponovo raste. Ukoliko je efekat prigušenja uvažen, doći će do stabilizacije procesa u tački presjeka  $P_{e3}(\delta)$  i  $P_m$  (tačka 5). Ukoliko to ne bi bio slučaj, radna tačka bi oscilovala oko tačke 5 [1].

Kriterijum za određivanje granica tranzijentne stabilnosti po metodi jednakih površina polazeći od graničnog uslova stabilnosti  $A_1 = A_2$  je:

$$\begin{aligned} P_m(\delta_{isk} - \delta_0) - \int_{\delta_0}^{\delta_{isk}} P_{m2} \sin \delta \, d\delta \\ = \int_{\delta_{isk}}^{\delta_{gr}} P_{m3} \sin \delta \, d\delta - P_m(\delta_{gr} - \delta_{isk}) \end{aligned} \quad (2.3.1.1.8)$$

pa je:

$$\cos \delta_{isk} = \frac{P_m(\delta_{gr} - \delta_0) + P_{e3} \cos \delta_{gr} - P_{e2} \cos \delta_0}{P_{e3max} - P_{e2max}} \quad (2.3.1.1.9)$$

Jednačinom (2.3.1.1.9) određen je *kritični ugao isključenja kvara*. Ovo je maksimalni ugao opterećenja pri kome se vrši isključenje kvara, a da se pri tome ne naruši tranzijentna stabilnost generatora [24].

Na osnovu određene vrijednosti kritičnog ugla isključenja  $\delta_{isk}$  moguće je dalje odrediti i *kritično vrijeme isključenja kvara*  $t_{isk}$ . Potrebno je poći od uslova da je snaga akceleracije konstantna. Ovaj uslov je ispunjen ukoliko je  $P_{e2} = 0$ , što je situacija pri kvaru na lokaciji a = 0 [24]. Odavde slijedi da je jednačina njihanja (2.2.13.):

$$\frac{H}{\pi f} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m \quad (2.3.1.1.10)$$

odnosno:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\pi f}{H} \cdot P_m \quad (2.3.1.1.11)$$

Integraljenjem izraza (2.3.1.1.11) u granicama od 0 do  $t$  za početni uslov,  $\left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{t=0} = \omega - \omega_s = 0$ , dobija se:

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{\pi f P_m}{H} \cdot t \quad (2.3.1.1.12)$$

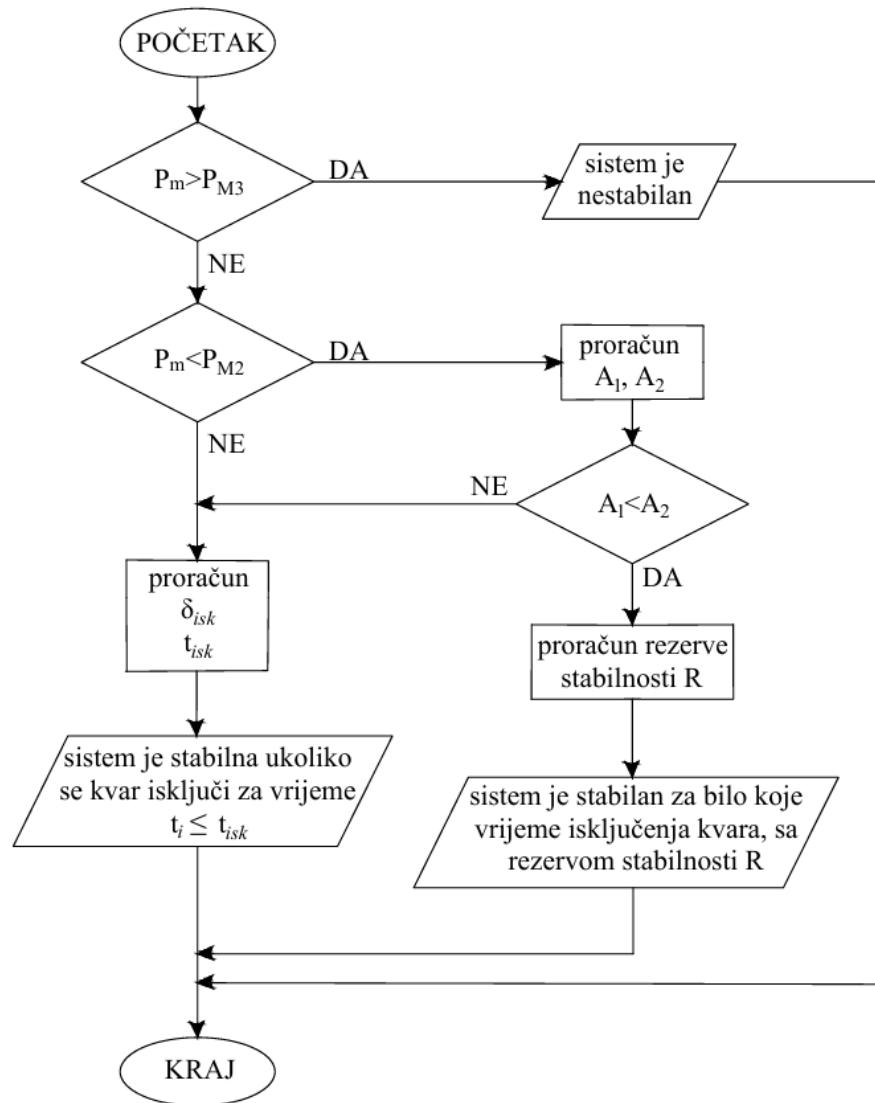
Nakon ponovnog integraljenja, za početni i krajnji uslov  $\delta|_{t=t_0} = \delta_0$  i  $\delta|_{t=t_{isk}} = \delta_{isk}$  respektivno, slijedi da je:

$$\delta_{isk} = \frac{\pi f P_m}{2H} \cdot t_{isk}^2 + \delta_0 \quad (2.3.1.1.13)$$

odakle je:

$$t_{isk} = \sqrt{\frac{2H(\delta_{isk} - \delta_0)}{\pi f P_m}} = \sqrt{\frac{4H(\delta_{isk} - \delta_0)}{\omega_s P_m}} \quad (2.3.1.1.14)$$

Na Slici 13 prikazan je dijagram toka (eng. *flowchart*) algoritma za proračun tranzijentne stabilnosti jednomašinskog EES upotreboom metoda jednakih površina.



Slika 13. Dijagram toka metoda jednakih površina

### 2.3.1.2. Metod numeričke integracije

Metod numeričke integracije je metod koji se zasniva se na rješavanju diferencijalne jednačine kretanja rotora sinhrone mašine (2.2.14) [26]. Ova diferencijalna jednačina drugog reda može se zapisati kao sistem dvije diferencijalne jednačine prvog reda:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s = \frac{\omega - \omega_s}{\omega_s} \omega_s = \omega_s \cdot \Delta\omega \quad (2.3.1.2.1)$$

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{T} (P_m - P_e) \quad (2.3.1.2.2)$$

Jednačine (2.3.1.2.1) i (2.3.1.2.2) rješavaju se koristeći jednu od numeričkih metoda za rješavanje diferencijalnih jednačina. Konkretno, u ovom radu korišćen je Runge-Kuta metod drugog reda [27]. Vrijeme  $t$  dijeli se na  $k$  jednakih djelova, pri čemu se zadovoljavajuća tačnost postiže pri vrijednosti koraka integracije  $\Delta t = 0.001$  (što je korak integracije manji to je tačnost proračuna veća). Ideja ovog metoda bazira se na procjeni nove vrijednosti  $\Delta\omega$  i  $\delta$  u tački  $n$  na osnovu informacija o prethodnoj vrijednosti pomenutih promjenjivih (tačka  $n-1$ ).

$$\Delta\omega_n = \Delta\omega_{n-1} + \frac{k'_1 + k'_2}{2} \quad (2.3.1.2.3)$$

$$\delta_n = \delta_{n-1} + \frac{k''_1 + k''_2}{2} \quad (2.3.1.2.4)$$

gdje su:

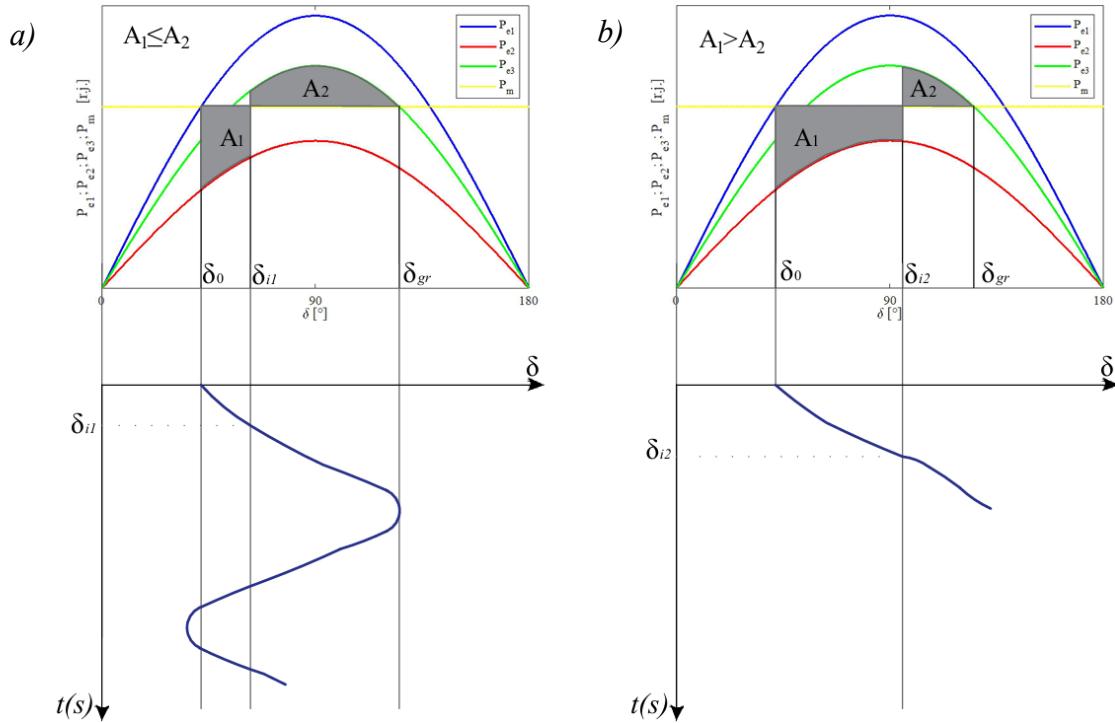
$$k'_1 = \left[ \frac{1}{T} (P_m - P_M \sin \delta_n) \right] \Delta t \quad (2.3.1.2.5)$$

$$k''_1 = [\omega_s \cdot \Delta\omega_n] \Delta t \quad (2.3.1.2.6)$$

$$k'_2 = \left[ \frac{1}{T} (P_m - P_M \sin(\delta_n + k''_1)) \right] \Delta t \quad (2.3.1.2.7)$$

$$k''_2 = [\omega_s \cdot (\Delta\omega_n + k'_1)] \Delta t \quad (2.3.1.2.8)$$

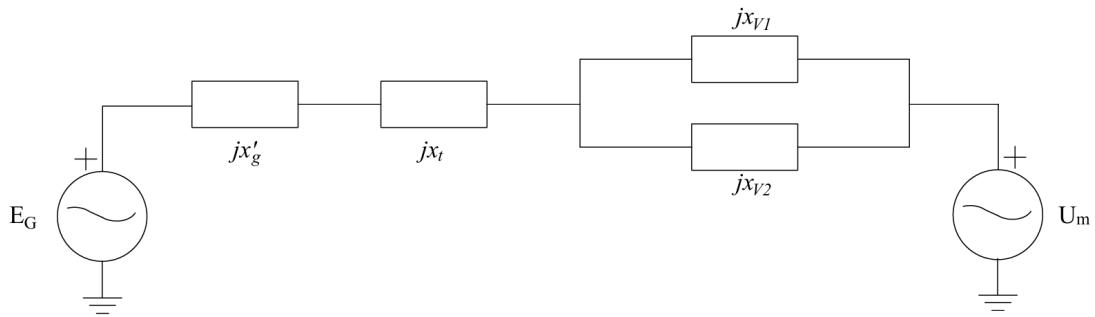
Vrijednost ugla  $\delta$  u trenutku  $t = 0$  određuje se na osnovu stanja sistema u trenutku neposredno prije pojave kvara (presjek krive  $P_m$  i  $P_{e1}$ ), dok je početna vrijednost promjene  $\Delta\omega$  ugaone brzine 0. Rješavanjem ovog seta jednačina dobija se promjena ugla opterećenja u vremenu. Periodična promjena  $\delta = f(t)$  znači da je sistem, tj. generator tranzijentno stabilan, dok aperiodična promjena znači ispad generatora iz sinhronizma (Slika 14) [28].



Slika 14. Analogija metoda jednakih površina i metoda numeričke integracije:  
a) slučaj kada je očuvana tranzijentna stabilnost, b) slučaj kada je narušena tranzijentna stabilnost.

### 2.3.2. Transfer impedansa

Kako bi se odredile krive snaga – ugao (2.3.1), neophodno je odrediti transfer impedansu jednomašinskog sistema u svim radnim režimima. Na Slici 15 data je zamjenska šema jednomašinskog sistema prije kvara potrebna za proračun transfer impedanse između generatora i jake mreže prije nastanka poremećaja.

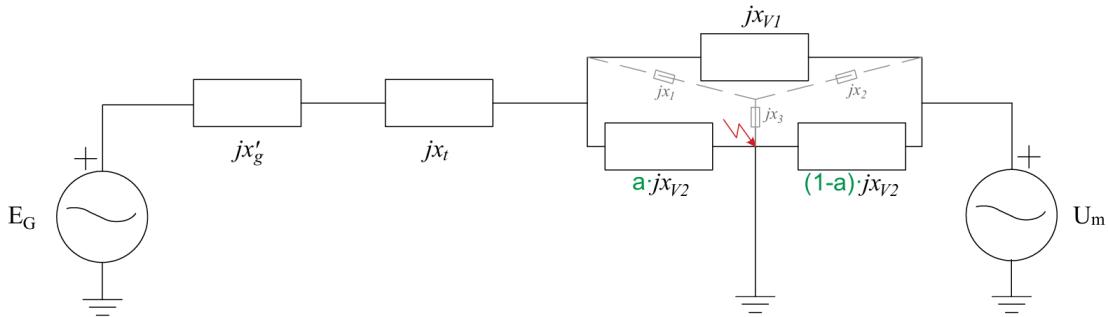


Slika 15. Zamjenska šema jednomašinskog sistema prije kvara

Vrijednost transfer impedanse prije pojave kvara, u skladu sa Slikom 15, je:

$$\underline{Z_{pk}} = jx'_g + jx_t + \frac{jx_{v1} \cdot jx_{v2}}{jx_{v1} + jx_{v2}} = jx_{pk} \quad (2.3.2.1)$$

Zamjenska šema za vrijeme trajanja kvara (simetričnog „metalnog” tropolnog kratkog spoja) data je na Slici 16.



Slika 16. Zamjenska šema jednomašinskog sistema tokom kvara

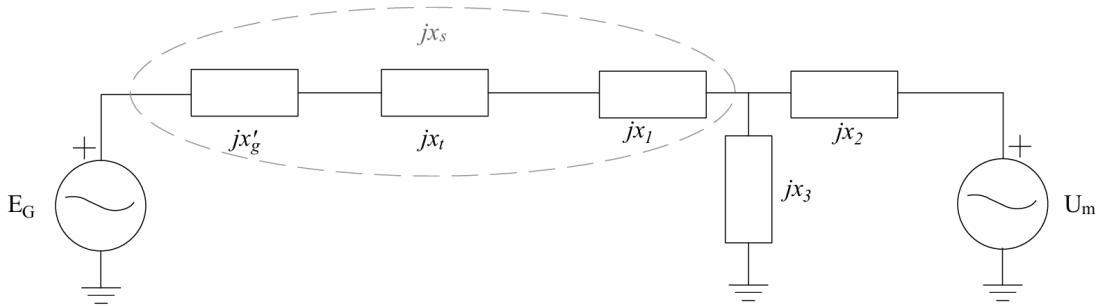
Prvo je, u skladu sa Slikom 16 potrebno izvršiti transformaciju trougao – zvijezda:

$$\underline{Z_1} = \frac{jx_{v1} \cdot a \cdot jx_{v2}}{jx_{v1} + jx_{v2}} = jx_1 \quad (2.3.2.2)$$

$$\underline{Z_2} = \frac{jx_{v1} \cdot (1 - a) \cdot jx_{v2}}{jx_{v1} + jx_{v2}} = jx_2 \quad (2.3.2.3)$$

$$\underline{Z_3} = \frac{jx_{v1} \cdot (1 - a) \cdot jx_{v2}}{jx_{v1} + jx_{v2}} = jx_3 \quad (2.3.2.4)$$

nakon čega se dolazi do zamjenske šeme sa Slike 17:



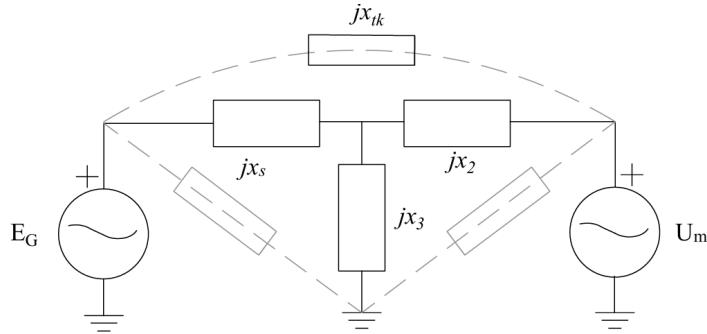
Slika 17. Zamjenska šema jednomašinskog sistema tokom kvara nakon transformacije trougao - zvijezda

gdje je:

$$jx_s = j(x'_q + x_t + x_1) \quad (2.3.2.5)$$

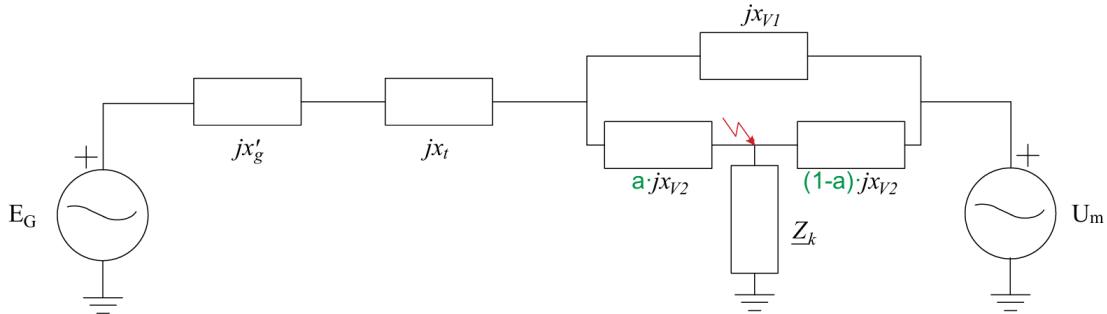
Odavde se dolazi do zamjenske šeme prikazanoj na Slici 18. Daljom transformacijom zvijezda – trougao moguće je konačno doći do vrijednosti transfer impedanse sistema za vrijeme trajanja kvara:

$$\underline{Z}_{tk} = jx_s + jx_2 + \frac{jx_s \cdot jx_2}{jx_3} = jx_{tk} \quad (2.3.2.6)$$



Slika 18. Zamjenska šema jednomašinskog sistema tokom kvara nakon sređivanja

Prethodno izvedene relacije za proračun transfer impedanse tokom kvara važe isključivo za slučaj „metalnog“ tropolnog kratkog spoja kod koga je impedansa kvara  $\underline{Z}_k = 0$ . Kada je proračunom potrebno uvrstiti i impedansu kvara (npr. elekričnog luka) onda zamjenska šema dobija oblik sa Slike 19. Dalji postupak je analogan prethodnom proračunu.



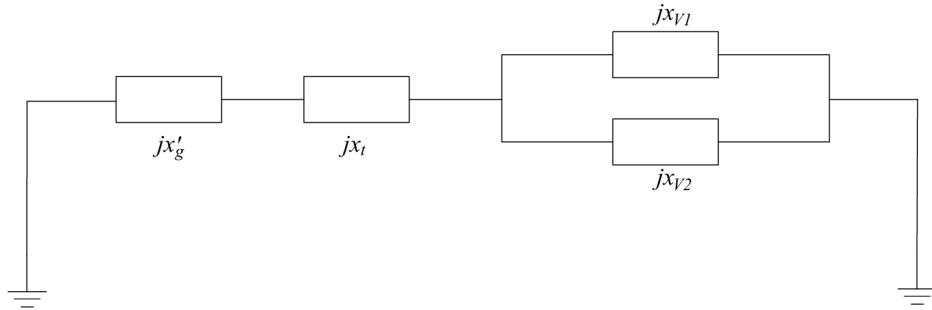
Slika 19. Zamjenska šema jednomašinskog sistema tokom kvara sa uračunatom vrijednošću impedanse  $\underline{Z}_k$

U slučaju nesimetričnih kratkih spojeva, pored zamjenske šeme direktnog redoslijeda, potrebno je, primjenom simetričnih komponenti [77], obuhvatiti i zamjenske šeme inverznog (Slika 20) i nultog (Slika 21) redoslijeda otočnim priključenjem u skladu sa Slikom 19. Vrijednosti impedanse kvara u ovom slučaju su:

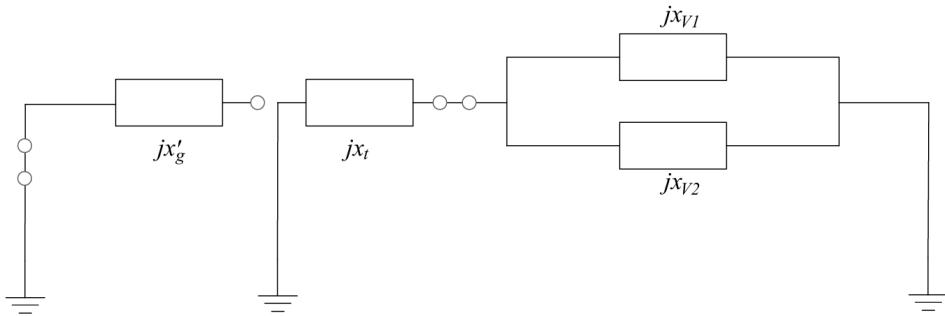
$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_{eq}^{(2)} = jx_k \quad (2.3.2.7)$$

$$\underline{Z}_k = \frac{\underline{Z}_{eq}^{(2)} \cdot \underline{Z}_{eq}^{(0)}}{\underline{Z}_{eq}^{(2)} + \underline{Z}_{eq}^{(0)}} = jx_k \quad (2.3.2.8)$$

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_{eq}^{(2)} + \underline{Z}_{eq}^{(0)} = jx_k \quad (2.3.2.9)$$

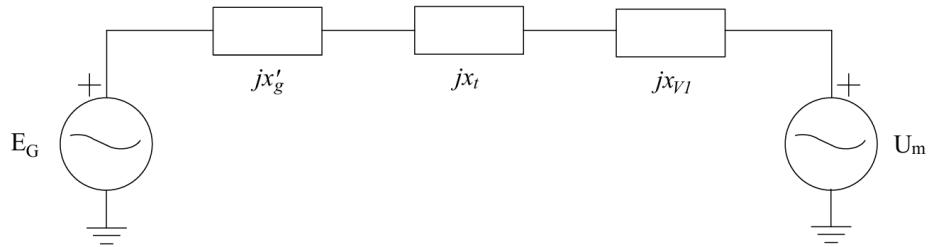


Slika 20. Zamjenska šema jednomašinskog sistema – inverzni redosled



Slika 21. Zamjenska šema jednomašinskog sistema – nulti redosled

Zamjenska šema sistema za slučaj nakon eliminacije kvara data je na Slici 22.



Slika 22. Zamjenska šema jednomašinskog sistema nakon eliminacije kvara

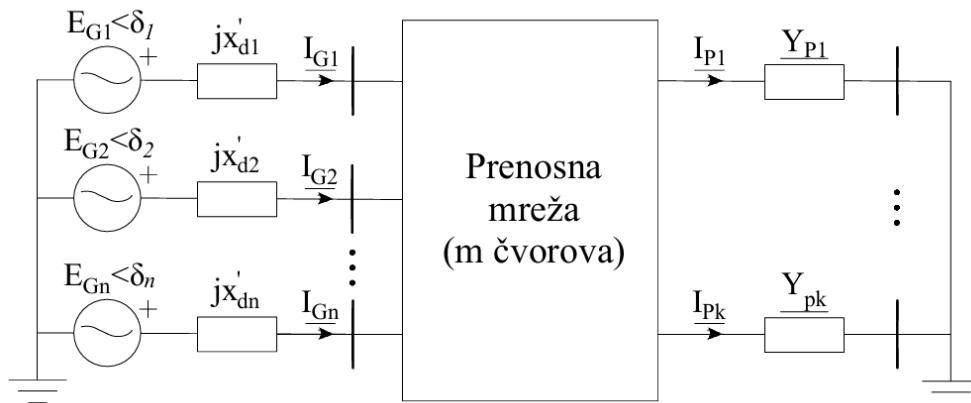
U ovom režimu dolazi do dvostranog isključenja voda u kvaru (vod  $V_2$ ), pa u pogonu ostaje samo vod  $V_1$ , čime je transfer imedansa data izrazom:

$$\underline{Z}_{nk} = jx'_g + jx_t + jx_{V1} = jx_{nk} \quad (2.3.2.10)$$

## 2.4. Višemašinski sistem

Problematika tranzijentne stabilnosti u ovom poglavlju biće proširena na složeniji ali realniji slučaj, a to je višemašinski sistem (Slika 23) [29]. Za procjenu tranzijentne stabilnosti ovog sistema, nakon nastanka kratkog spoja na nekom od vodova prenosne mreže, nije moguće koristiti metod jednakih površina izložen u poglavlju 2.3.1.1. Metod numeričke integracije, odnosno rješavanje diferencijalne jednačine kretanja rotora sinhronih mašina u sistemu, moguće je primijeniti, s tim što je sada potrebno odrediti relativno kretanje ugla svih generatora u sistemu.

Prepostavke koje se uvode jesu da je, kao i u slučaju jednomašinskog sistema, prigušenje zanemareno i da su svi potrošači (opterećenja) modelovani konstantnom impedansom. Prepostavka ovakvog modelovanja potrošača uvodi sa sobom određeno smanjenje tačnosti proračuna uslijed zavisnosti opterećenja od devijacije napona i frekvencije na različite načine [78 - 79]. Stoga će ovako dobijeni rezultati biti optimističniji od realnih. Međutim ovo smanjenje tačnosti kompenzovano je na taj način što se pri proučavanju tranzijentne stabilnosti višemašinskog EES posmatra slučaj pojave trofaznog kratkog spoja u blizini jedne od sabirnica sistema. Kao što je već rečeno,  $3ks$  dovodi do najvećeg pada napona u sistemu čime stvara havarijske uslove rada sa najtežim posljedicama za sistem. Na taj način, radeći analizu samo za ovu vrstu kvara uzima se koeficijent sigurnosti koji daje kritičnije rezultate u odnosu na prilike koje bi važile u realnom sistemu. Tako će gornja prepostavka o povoljnijim rezultatima biti u izvjesnom mjeri kompenzovana i približena realnim prilikama.



Slika 23. Višemašinski sistem

### 2.4.1. Metod za procjenu tranzijentne stabilnosti višemašinskog sistema

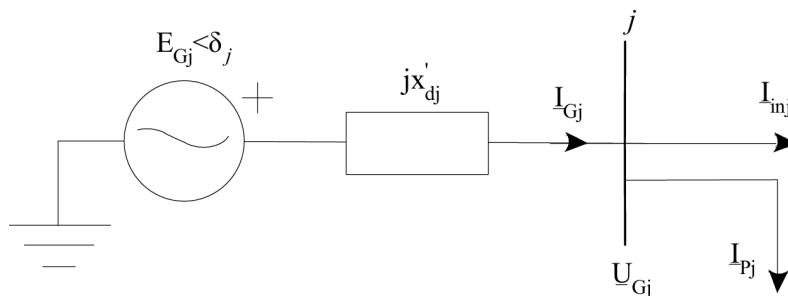
Kao što je već rečeno, da bi se došlo do zaključka da li je sistem ostao tranzijentno stabilan nakon poremećaja potrebno je odrediti relativno kretanje ugla rotora svih sinhronih mašina u sistemu za vrijeme velikih poremećaja. Zbog toga je potrebno koristiti kompletan matematički model generatora predstavljen u poglavlju 2.2. Algoritam prati sljedeće korake:

1. Za režim neposredno prije pojave kvara potrebno je odrediti napone svih čvorova u sistemu  $\underline{U}_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) koristeći neku od metoda za proračun tokova snaga. Konkretno u ovom radu korišćen je *Newton-Raphson* metod. U okviru metoda za proračun tokova snaga određena je i vrijednost matrice admitansi nezavisnih čvorova prenosne mreže  $Y_b$  dimenzije  $[m \times m]$  gdje je  $m$  broj čvorova sistema. Nakon toga potrebno je odrediti struje injektiranja svih generatora  $\underline{I}_{Gj}$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) i električne snage generatora  $P_{ej}$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) kao:

$$\underline{I}_{Gj} = \underline{I}_{inj} + \underline{I}_{Pj} \quad (2.4.1.1)$$

$$P_{ej} = P_{inj} + P_{Pj} \quad (2.4.1.2)$$

gdje su  $\underline{I}_{Pj}/P_{ej}$  struja/aktivna snaga koja se isporučuje potrošaču u čvoru  $j$ , a  $\underline{I}_{inj}/P_{inj}$  struja/aktivna snaga injektiranja od čvora  $j$  proračunata u sklopu Newton-Raphson metoda (Slika 24).



Slika 24. Zamjenska šema generatora na sabirnici  $j$

U trenutku prije nastanka kvara mehaničke snage generatora  $P_m$  jednake su električnoj snazi, vrijednost ugaone brzine  $\omega$  jednaka je sinhronoj (odnosno odstupanje ugaone brzine je 0), a vrijednost ugla  $\delta_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) svakog generatora određena je na osnovu vrijednosti elektromotorne sile generatora  $E_{Gj}$  i to kao:

$$\underline{E}_{Gj} = \underline{U}_j + j\sqrt{3}x'_{dj} \cdot \underline{I}_{Gj} \quad (2.4.1.3)$$

$$\delta_j = \arg\{\underline{E}_{Gj}\} \quad (2.4.1.4)$$

2. Potrošači se predstavljaju modelom konstantne admitanse kao:

$$y_{pl} = \frac{S_{pl}}{U_l^2} \quad (2.4.1.5)$$

gdje je  $l = (1, 2, \dots, k)$ .

Sada je potrebno odrediti novu matricu  $Y_b$  modifikacijom stare tako što će u njoj biti uključene i vrijednosti admitansi potrošnje i admitansi generatora.

3. Inicijalizacija vremena,  $t = 0$ . Određivanje koraka integracije  $\Delta t$  i vremenskog okvira koji se posmatra  $T$ . Kao što je već rečeno, vremenski okvir od interesa za proučavanje ove stabilnosti je kratkoročan pa je dovoljno uzeti da je  $T = 4s$ .

4. - Ukoliko je  $t < t_{isk}$ , gdje je  $t_{isk}$  vrijeme isključenja kvara, odnosno elementa (voda) u kvaru potrebno je napon sabirnice u čijoj se blizini kvar desio postaviti na 0.

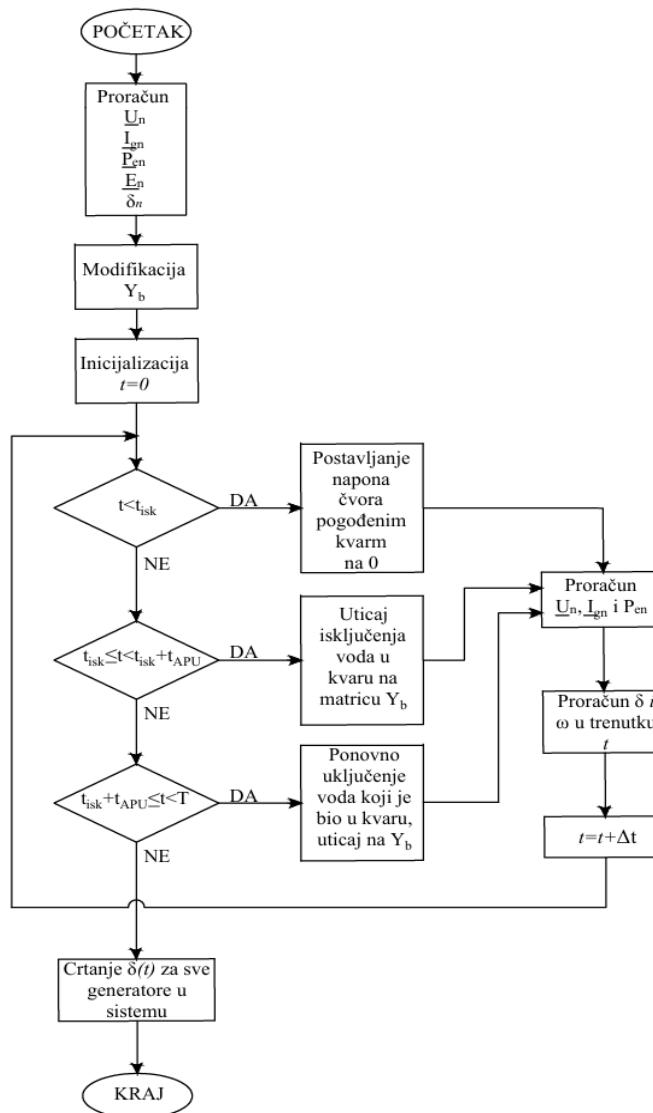
- Ukoliko  $t_{isk} \leq t < t_{isk} + t_{APU}$  gdje je  $t_{APU}$  vrijeme ponovnog uključenja voda u kvaru onda je vod koji je bio pogoden kvarom uklonjen iz sistema (dvostrano prekidačima isključen) sa ciljem eliminacije kvara. Ovim je potrebno modifikovati matricu  $Y_b$  u skladu sa novom konfiguracijom.

Većina kvarova na dalekovodima je prolaznog karaktera čime je kvarove na dalekovodima pogodno ukloniti korišćenjem tehnike automatskog ponovnog uključenja (APU) voda nakon što ga zaštita isključi. Prema dužini beznaponske pauze ( $t_{APU}$ ) APU se dijeli na: vrlo brzi ( $0.2s - 0.7s$ ), brzi ( $0.7s - 1.5s$ ), spori ( $1.5s - 10s$ ) i vrlo spori (do nekoliko minuta) [80].

- Ukoliko  $t_{isk} + t_{APU} \leq t$  smatra se da je došlo do ponovnog uključenja voda koji je bio pogoden kvarom u sistem. Matricu  $Y_b$  potrebno je vratiti na vrijednosti prije uklanjanja voda.

5. Vrši se proračun tokova snaga u trenutku  $t$ , čime se određuju naponi čvorova u sistemu  $\underline{U}_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ), a potom i struje i snage generatora  $I_{Gj}$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) i električne snage generatora  $P_{ej}$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ).
6. Proračun ugla  $\delta_j$  i brzine  $\omega_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) u trenutku  $t$ .
7. Promjena  $t = t + \Delta t$ . Ukoliko je  $t \geq T$  algoritam se zaustavlja i isertavaju se vrijednosti za  $\delta_j(t)$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ). U suprotnom potrebno je vratiti se na korak 5.

Uslijed visoke osjetljivosti proračuna moguće je smatrati da je generator uspio da očuva sinhronizam ukoliko odstupanje ugla njihanja  $\delta$  nije veće od 15% ranije spomenutog opsega od  $\pm 90^\circ$ . Dijagram toka prethodno opisanog metoda prikazan je na Slici 25.



Slika 25. Dijagram toka metoda za procjenu tranzijentne stabilnosti višemašinskog sistema

#### 2.4.1.1. Formiranje matrice $Y_b$ i Newton – Raphson metod za proračun tokova snage

*Formiranje matrice admitansi nezavisnih čvorova*

Za potrebe proračuna potrebno je odrediti matricu admitansi nezavisnih čvorova  $Y_b$  dimenzije  $[m \times m]$  gdje je  $m$  broj čvorova sistema. Matricu  $Y_b$  moguće je odrediti koristeći jednu od sljedećih metoda [79]:

a) Metod singularne transformacije:

$$Y_b = AYA^T \quad (2.4.1.1.1)$$

gdje su:

$Y$  - matrica admitansi grana dimenzija  $[b \times b]$ , gdje je  $b$  broj grana

$A$  - matrica incidencije grana i nezavisnih čvorova dimenzija  $[m \times b]$ .

b) Metod nesingularne transformacije:

$$Y_{bij} = \begin{cases} -\underline{Y}_{ij}, & i \neq j \\ \sum_{j=1}^n \underline{Y}_{ij}, & i = j \end{cases} \quad (2.4.1.1.2)$$

*Newton – Raphson metod*

Newton – Raphson metod za proračun tokova snaga je metod koji se zasniva na iterativnom rješavanju sistema nelinearnih jednačina gdje se aktivna i reaktivna snaga izražavaju u funkciji napona čvorova. Sastoji iz sljedećih koraka [79]:

1. Prepostavljuju se početne vrijednosti modula i faznih stavova napona generatorskih i potrošačkih čvorova ( $m-1$ ) u skladu sa sprovedenom klasifikacijom čvorova. Obično se prepostavlja *flat start*, odnosno da su naponi nominalni.
2. Proračun injektiranja aktivne i reaktivne snage u svim čvorovima sistema izuzev balansnog  $i=1, 2, \dots, (m-1)$  u  $q$ -toj iteraciji skladu sa formulama:

$$P_i^{(q)} = \sum U_i U_j [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] \quad (2.4.1.1.3)$$

$$Q_i^{(q)} = \sum U_i U_j [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (2.4.1.1.4)$$

gdje su  $G_{ij}$  i  $B_{ij}$  realni i imaginarni dio admitanse  $Y_{ij}$ .  $Y_{ij}$  je član matrice  $Y_b$  na poziciji  $(i, j)$ .

3. Pošto su vrijednosti  $P_i$  i  $Q_i$  za potrošačke čvorove  $PQ$  poznati, moguće je odrediti grešku snaga:

$$\Delta P_i = P_i^{poznato} - P_i^{(q)} \quad (2.4.1.1.5)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{poznato} - Q_i^{(q)} \quad (2.4.1.1.6)$$

4. Sad je potrebno formirati matrice Jakobijana primjenom relacije:

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial U} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial U} \end{bmatrix} \quad (2.4.1.1.7)$$

U relaciji (2.4.1.1.7) jakobijani predstavljaju:

$J_1$  - koeficijente osjetljivosti promjene aktivne snage u čvoru  $i$  sa promjenom faznog stava napona čvorova:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} = U_i U_j [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (2.4.1.1.8)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m U_i U_j [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (2.4.1.1.9)$$

$J_2$  - koeficijente osjetljivosti promjene aktivne snage u čvoru  $i$  sa promjenom modula napona čvorova:

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_j} = U_i [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] \quad (2.4.1.1.10)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_i} = 2G_{ii}U_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m U_j [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] \quad (2.4.1.1.11)$$

$J_3$  - koeficijente osjetljivosti promjene reaktivne snage u čvoru  $i$  sa promjenom faznog stava napona čvorova:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = -U_i U_j [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] \quad (2.4.1.1.12)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m U_j [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] \quad (2.4.1.1.13)$$

$J_4$  - koeficijente osjetljivosti promjene reaktivne snage u čvoru  $i$  sa promjenom faznog stava napona čvorova:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_j} = U_i [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (2.4.1.1.14)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_i} = -2B_{ij} U_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m U_j [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (2.4.1.1.15)$$

5. Rješavanje sistema jednačina:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (2.4.1.1.16)$$

6. Ažuriranje modula i faznih stavova napona:

$$U_i^{(q)} = U_i^{(q-1)} + \Delta U_i^{(q)} \quad (2.4.1.1.17)$$

$$\theta_i^{(q)} = \theta_i^{(q-1)} + \Delta \theta_i^{(q)} \quad (2.4.1.1.18)$$

7. Postupak opisan koracima 2. – 6. se ponavlja dok za sve čvorove u mreži nije zadovoljen uslov:

$$|\Delta P_i| < \varepsilon \quad i \quad |\Delta Q_i| < \varepsilon \quad (2.4.1.1.19)$$

gdje je  $\varepsilon$  usvojena tačnost, a  $\Delta P_i$  i  $\Delta Q_i$  su određeni koristeći izraze (2.4.1.1.5) i (2.4.1.1.6).

### 3. FACTS UREĐAJI

U cilju poboljšanja upravljanja i održavanja sigurnog i pouzdanog pogona modernih elektroenergetskih sistema fleksibilni uređaji za prenos naizmjenične struje (*eng. Flexible Alternating Current Transmission Systems – FACTS*), bazirani na savremenim uređajima energetske elektronike nalaze svoju primjenu. Uslijed prisutnog trenda razvoja EES veoma je važno posvetiti veću pažnju kontroli i upravljanju istog. Generalno, FACTS uređaji se u svrhu poboljšanja performansi sistema mogu koristiti na jedan od sljedećih načina: paralelna kompenzacija, redna kompenzacija, kompenzacija faznog ugla. Prednost FACTS uređaja u odnosu na konvencionalne uređaje za kompenzaciju dovele su do njihove ekspanzije. Ove prednosti ogledaju se u mogućnosti promjene stepena kompenzacije, brzini odziva, „fleksibilnoj prirodi“ koja čini ih pogodnim za aplikacije sa nepoznatim ili promenljivim zahtjevima. Još jedna od važnih mogućnosti koje pružaju ovi uređaji jeste njihova upotreba kao sredstvo za proširenje kapaciteta postojećih mreža, odnosno povećanje limita prenosa električne energije bez potrebe za dodavanjem novih dalekovoda. Ova mogućnost je od velike važnosti za elektroenergetsku industriju jer postaje sve teže izgraditi nove dalekovode zbog ekoloških ograničenja i imovinsko-pravnih odnosa.

U ovom poglavlju biće napravljen osvrt na tok razvoja FACTS uređaja, nakon čega će biti opisan princip rada redne i paralelne kompenzacije kao i detaljan opis FACTS uređaja čiji se uticaj na tranzijentnu stabilnost analizira u ovom radu – statickog kompenzatora reaktivne snage, serijske kapacitivne kompenzacije i statickog sinhronog kompenzatora.

#### 3.1. Definicija i razvoj FACTS uređaja

FACTS uređaji su savremeni uređaji energetske elektronike koji se sve više koriste u EES za rješavanje različitih problema. Upotreba ovih uređaja je u posljednje vrijeme privukla značajno interesovanje kao sredstvo za kontrolu tokova snaga, poboljšanje naponskih prilika, povećanje prenosnog kapaciteta i granica stabilnosti sistema [36 - 39]. Rapidni razvoj FACTS uređaja podstaknut je snažnim razvojem energetske elektronike.

U dosadašnjem razvoju FACTS izdvajaju se dvije faze. U prvoj fazi razvoja, pojavljuju se uređaji koji sadrže element za proizvodnju i/ili potrošnju reaktivne snage, kondenzator i/ili kalem. Regulacija toka reaktivne snage vrši se upotrebom klasičnih tiristora (koristi se kao prekidač) ili GTO tiristora (koristi se kao ventil). Prva generacija rezultira razvojem [40]:

- Statički kompenzator reaktivne snage (eng. *Static Var Compensator* – SVC),
- Tiristorski uklopljiv kondenzator (eng. *Thyristor Switched Capacitor* – TSC),
- Tiristorski uklopljiva prigušnica (eng. *Thyristor Switched Reactor* – TSR),
- Tiristorski upravljava prigušnica (eng. *Thyristor Controlled Reactor* – TCR),
- Tiristorski kontrolisani serijski kompenzator (eng. *Thyristor Controlled Series Compensation* – TCSC),
- Tiristorski upravljav zakretni transformator (eng. *Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer* – TCPST),
- Tiristorski upravljav regulator faznog ugla (eng. *Thyristor Controlled Phase Angle Regulator* – TCPAR).

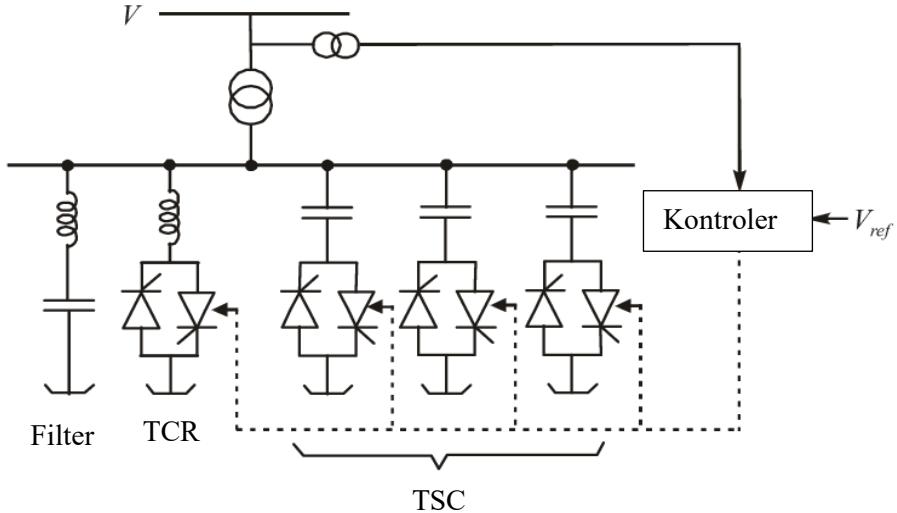
U drugoj fazi dolazi do razvoja uređaja koji koriste kompleksnije elemente kao što su redni ili otočni transformator, redni ili otočni mosni konvertori. U ovu generaciju spadaju [40]:

- Statički sinhroni kompenzator (eng. *STATIC Synchronous COMPensator* – STATCOM),
- Statički sinhroni serijski kompenzator (eng. *Static Synchronous Series Compensator* – SSSC),
- Regulator toka snage između vodova (eng. *Interline Power Flow Controller* – IPFC),
- Univerzalni regulator toka snage (eng. *Unified Power Flow Controller* – UPFC).

### 3.2. Statički kompenzator reaktivne snage

Statički kompenzatori reaktivne snage (SVC) predstavljaju FACTS uređaje čija je dominantna primjena u poboljšanju profila napona. Cilj ove kompenzacije je da se podigne napon u tački priključenja injektiranjem reaktivne snage. U sistem se priključuje paralelno. Naziv statički potiče od činjenice da ovaj uređaj ne sadrži rotirajuće elektromehaničke komponente. Sastoji se od sljedećih komponenti (Slika 26) [41]:

- tiristorski kontrolisane prigušnice (TCR),
- tiristorski uklopljivih kondenzatora (TSC),
- filtera



Slika 26. Struktura SVC uređaja

SVC nalazi široku primjenu u savremenim ESS-u. U prenosnim sistemima SVC se koristi za [42]:

- regulaciju napona,
- smanjenje gubitaka,
- povećanje granice tranzijentne stabilnosti,
- prigušenje oscilacija napona i snage,
- uravnoteženje asimetričnih opterećenja, itd.

### 3.2.1. Princip rada SVC uređaja

Princip rada SVC se može objasniti na sljedeći način: TSC ima fiksnu kapacitivnost tj. susceptanu  $B_C = \omega C$ , te tako stalno injektira konstantnu vrijednost kapacitivne struje/snage koja zavisi od broja uklapljenih TSC [43]. Prema tome kontrola ukupne reaktivne struje/snage SVC uređaja može se postići regulisanjem struje kroz TCR-a kontrolisanjem ugla uključivanja tiristora ( $\alpha$ ) pa se vrijednost izlazne reaktivne snage SVC uređaja može odrediti kao:

$$Q_{SVC}(\alpha) = -V_i^2 \cdot B_{SVC}(\alpha) \quad (3.2.1.1)$$

gdje je:

$V_i$  – napon čvora u kojem je ugrađen SVC uređaj,

$B_{SVC}(\alpha)$  – ukupna susceptansa SVC uređaja koja se određuje sabiranjem vrijednosti konstantne susceptanse kondenzatora  $B_C$  i varijabilne susceptanse TCR  $B_{TCR}$ :

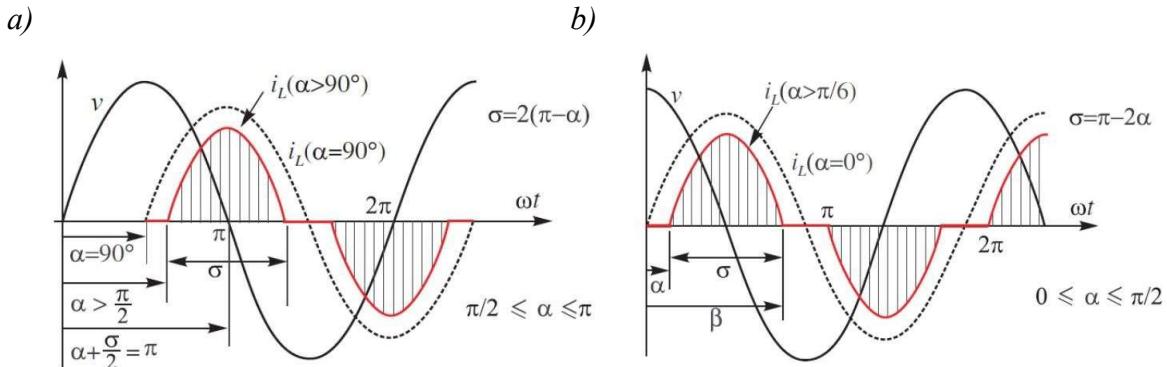
$$B_{SVC}(\alpha) = B_{TCR}(\alpha) + B_C \quad (3.2.1.2)$$

Kombinacijom konstantne kapacitivne struje kondenzatora i varijabilne induktivne struje koju injektira TCR, moguće je postići željeni nivo reaktivne snage koju SVC isporučuje (pri uslovu  $B_{TCR} < B_C$ ) ili apsorbuje (za slučaj  $B_{TCR} > B_C$ ) iz elektroenergetskog sistema. U zavisnosti od vrijednosti ugla  $\alpha$ , u literaturi se razlikuju dva pristupa [42]:

1. trenutak prolaska pozitivnog poluciklusa napona od nule (Slika 27 a),
2. trenutak kada napon dostiže maksimalnu vrijednost (Slika 27 b) – ugao okidanja se nalazi u opsegu  $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ , pri čemu se puno provođenje i blokiranje tiristora ostvaruje za uglove  $\alpha = 0^\circ$  i  $\alpha = 90^\circ$ , respektivno.

U prvom slučaju se puno provođenje ostvaruje za ugao  $\alpha = 90^\circ$  a minimalno za  $\alpha = 180^\circ$ , odnosno ugao okidanja se nalazi u opsegu od  $90^\circ - 180^\circ$ .

U drugom slučaju se maksimalno provođenje ostvaruje za ugao  $\alpha = 0^\circ$  a minimalno za  $\alpha = 90^\circ$ , odnosno ugao okidanja se nalazi u opsegu od  $0^\circ - 90^\circ$ .

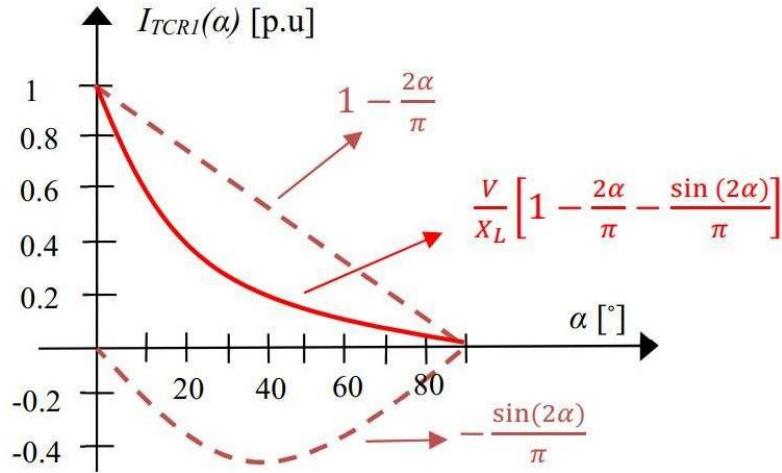


Slika 27. Talasni oblici struja i napona TCR-a.

Pošto se talasni oblik struje prigušnice sastoji od sinusoidalnih poluciklusa, potrebno je koristiti Furijeovu analizu kako bi se odredila osnovna komponenta struje. Efektivna vrijednost osnovnog harmonika struje u zavisnosti od ugla okidanja  $\alpha$ , napona TCR-a  $V$  i reaktanse prigušnice  $x_L$  se može zapisati kao [44]:

$$I_{L1} = \frac{V}{x_L} \left( 1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{\sin(2\alpha)}{\pi} \right) \quad (3.2.1.3)$$

Iz gornje jednačine očigledno je da je vrijednost struje osnovnog harmonika TCR-a obrnuto proporcionalna uglu paljenja  $\alpha$ . Na Slici 28 prikazana je zavisnost osnovnog harmonika induktivne struje TCR-a od ugla okidanja tiristora.



Slika 28. Zavisnost osnovnog komponente struje TCR-a od ugla  $\alpha$

Koristeći jednačinu (3.2.1.1) moguće je odrediti vrijednost susceptanse TCR-a u zavisnosti od ugla  $\alpha$ :

$$B_{TCR} = \frac{V}{x_L} \left( 1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{\sin(2\alpha)}{\pi} \right) \quad (3.2.1.4)$$

### 3.2.2. I-V kriva SVC uređaja

Analizom prikazanom u prethodnoj cjelini zaključuje se da je ekvivalentna struja SVC uređaja  $I_{SVC}$  pri maksimalnoj vrijednosti ugla  $\alpha$ , uslijed smanjenja induktivne struje koju injektira TCR jednaka kapacitivnoj struci TSC-a  $I_C$ . Odnosno, za velike vrijednosti ugla  $\alpha$  SVC ulazi u kapacitivni režim. Analogno, smanjivanjem ugla okidanja tiristora, SVC ulazi u induktivni režim rada. Radni domen SVC uređaja prikazan je na Slici 29. Prava sa nagibom  $x_L$  predstavlja radnu karakteristiku TCR, dok prava sa nagivom  $x_C$  predstavlja karakteristiku TSC [45]. Kombinacijom ove dvije karakteristike dobija se radna karakteristika SVC uređaja, u kojoj se izdvajaju tri regiona rada [46]:

- *Region OA*: SVC radi kao kondenzator fiksne kapacitivnosti čija se reaktivna snaga određuje kao:

$$Q_{Cmax} = -B_C V^2 \quad (3.2.2.1)$$

- Region AB: linearni region upravljanja:

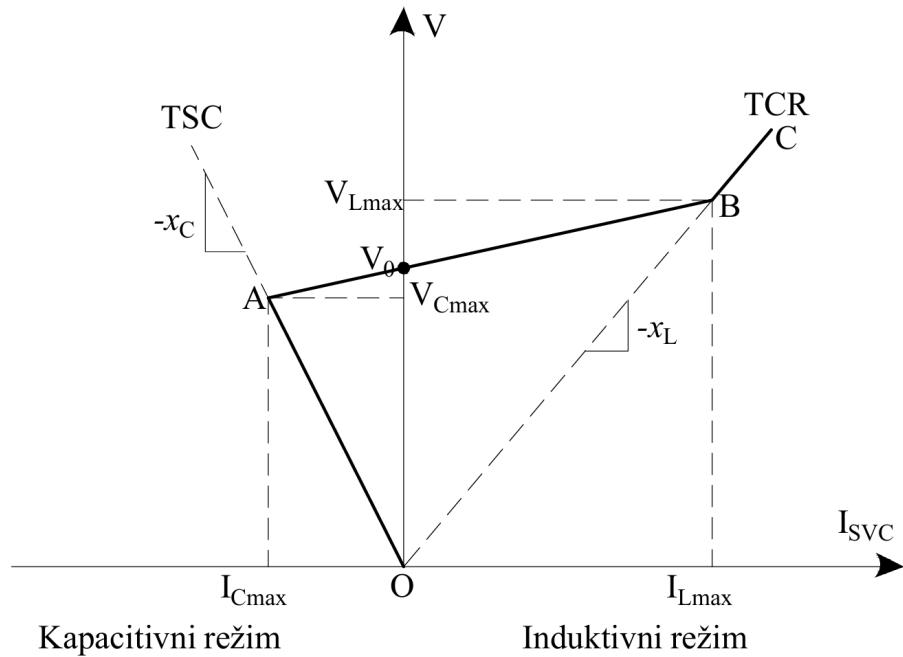
$$V = V_0 \pm x_{SL} I_{SVC} \quad (3.2.2.2)$$

gdje je  $V_0$  nazivni napon za slučaj  $I_{SVC} = 0$ , dok je  $x_{SL}$ :

$$x_{SL} = \frac{\text{dozvoljena promjena napona pri nominalnoj struji}}{V_{nom}} \cdot \frac{V_{nom}}{I_{nom}\sqrt{3}} \quad (3.2.2.3)$$

- Region BC: SVC radi kao kalem fiksne induktivnosti čija se reaktivna snaga određuje kao:

$$Q_{Lmax} = (B_{Lmax} - B_C)V^2 \quad (3.2.2.4)$$

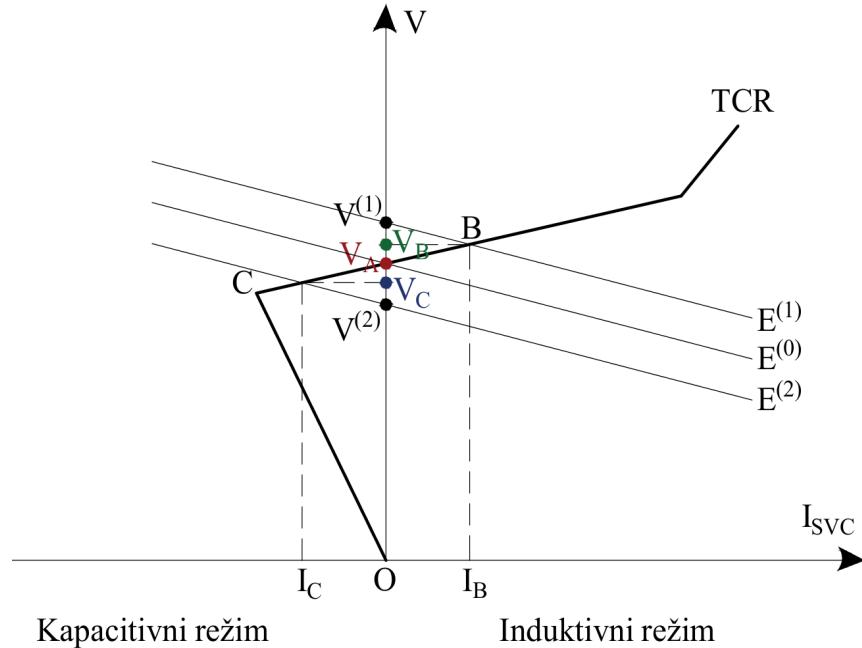


Slika 29. Radni region SVC uređaja

Važna sposobnost SVC uređaja koja se ogleda u poboljšanju naponskih prilika prikazana je na Slici 30 kojom su prikazane radne karakteristike SVC uređaja i kriva EES. Posmatrajući ove krive zapaža se sljedeće [47]:

- pretpostavlja se scenario u kome je došlo do smanjenja opterećenja, odnosno kriva EES iz normalnog radnog stanja  $E^{(0)}$  prelazi u krivu  $E^{(1)}$ . U normalnom pogonu napon u čvoru u kome je ugrađen SVC uređaj jednak je nominalnom (tačka  $V_A$ ) dok je u slučaju smanjenog opterećenja jednak  $V_B$ . Ukoliko u ovom čvoru ne bi bio ugrađen SVC uređaj nova radna tačka bi se nalazila u radnoj tački sa vrijednošću napona čvora u iznosu od  $V^{(1)}$ .

- ukoliko bi došlo do povećanja opterećenja (kriva  $E^{(2)}$ ), napon u čvoru ugrađenog SVC uređaja pao bi na vrijednost od  $V^{(2)}$  u slučaju nepostojanja ovog uređaja, međutim uslijed njegovog djelovanja pad napona u čvoru će biti manji pa će nova vrijednost napona iznositi  $V_C$ .

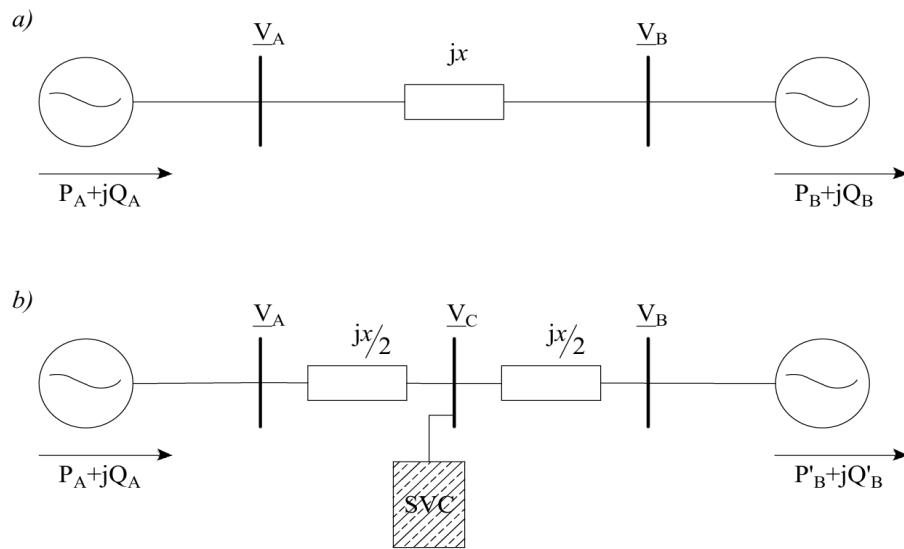


Slika 30. I-V kriva SVC-a i kriva EES

### 3.2.3. Uticaj SVC uređaja na tranzijentnu stabilnost EES

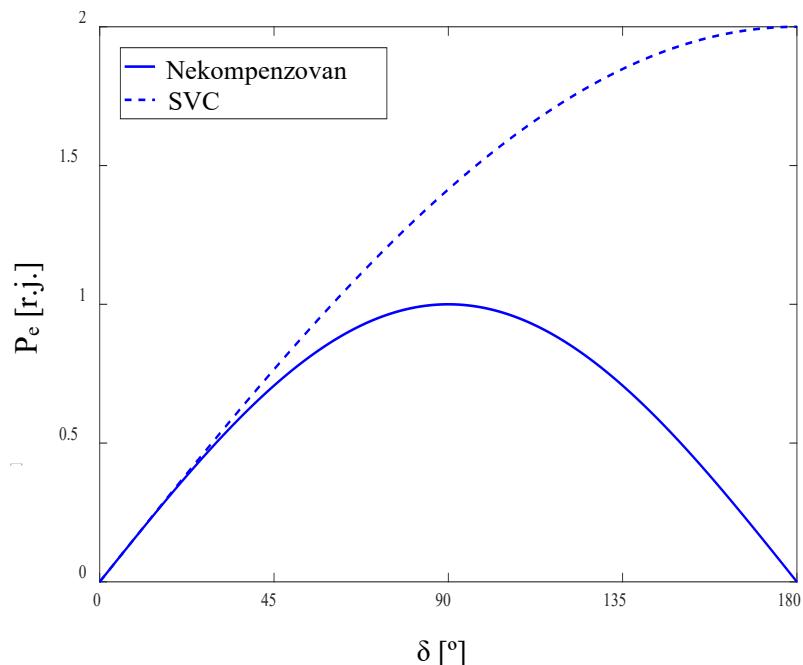
Na Slici 31 predstavljen je nekompenzovan (a) i sistem kompenzovan ugradnjom SVC uređaja na sredini voda (b). Aktivna snaga u slučaju nekompenzovanog sistema određuje se koristeći relaciju (2.3.1), dok ona u slučaju ugradnje jednog paralelnog uređaja na sredini voda, pod uslovom da je promjena napona početnog i krajnjeg voda zanemarljiva, glasi:

$$P_e = \frac{2V^2}{x} \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (3.2.3.1)$$



Slika 31. a) Nekompenzovan b) Kompenzovan SVC uređajem dvogeneratorski sistem

Krive njihanja za slučaj nekompenzovanog i sistema kompenzovanog primjenom SVC uređaja koji radi u kapacitivnom režimu prikazane na Slici 32 [48]. Odavde se zapaža da je ugradnjom SVC uređaja omogućen prenos snage pri većem faznom pomjeraju dva sistema čime se povećava vjeroatnoća za očuvanjem tranzijentne stabilnosti EES.



Slika 32. Kriva snaga-ugao u slučaju nekompenzovanog i sistema kompenzovanog SVC uređajem

Uopšteno, priključenjem  $n-1$  SVC uređaja na vod, tj. dijeljenjem voda na  $n$  sekcija, prenosni kapacitet voda se povećava  $n$  puta pa je tada maksimalna vrijednost snage koja se prenosi sa jednog kraja voda na drugi primjenom SVC kompenzacije povećana  $n$  puta:

$$P_e = \frac{nV^2}{x} \sin\left(\frac{\delta}{n}\right) \quad (3.2.3.2)$$

Matematički, uticaj ovog uređaja na tranzijentnu stabilnost u slučaju višemašinskog sistema pri ugradnji u čvoru  $i$  ogleda se u povećanju reaktivnog injektiranja u tom čvoru:

$$Q_i = Q_{i,gen} - Q_{i,pot} + Q_{SVC} \quad (3.2.3.3)$$

U slučaju kratkog spoja na vodu, jasno je da dolazi do promjene naponskih prilika u mreži kao i na mjestu priključenja SVC uređaja. U tom slučaju SVC uređaj, injektiranjem reaktivne snage, može značajno da doprinese održavanju stabilnih naponskih prilika što povećava granice stabilnosti sistema jer isti daje veću mogućnost prenosa snage kroz sistem u odnosu na nekompenzovan sistem.

### 3.3. Serijska kapacitivna kompenzacija

Metoda serijske kapacitivne kompenzacije (eng. *Series Capacitive Compensation - SCC*) je veoma poznata i široko se primjenjuje u prenosnim mrežama. Osnovni princip je sprovođenje kompenzacija dijela induktivne reaktanse električnog prenosa pomoću kapacitivnosti, što rezultira povećanom sposobnošću prenosa snage kompenzovanog voda. Serijska kompenzacija može da obezbijedi povećan kapacitet prenosa, poboljšan naponski profil mreže, poboljšanu ugaonu stabilnost energetskog koridora, prigušivanje oscilacija snage i optimizaciju podjele energije između paralelnih vodova [49 - 51].

Umetanje SCC uređaja kapacitivnosti  $C$  u induktivni vod dovodi do smanjenja reaktanse voda i povećanja snage prenosa cjelokupnog sistema. Naime, u ovom slučaju je vrijednost reaktanse voda [49]:

$$x_{komp} = x_V \pm x_C = x_V \left(1 \pm \frac{x_C}{x_V}\right) = x_V(1 \pm k) \quad (3.3.1)$$

gdje je:

$x_{komp}$  – vrijednost reaktanse voda nakon kompenzacije,

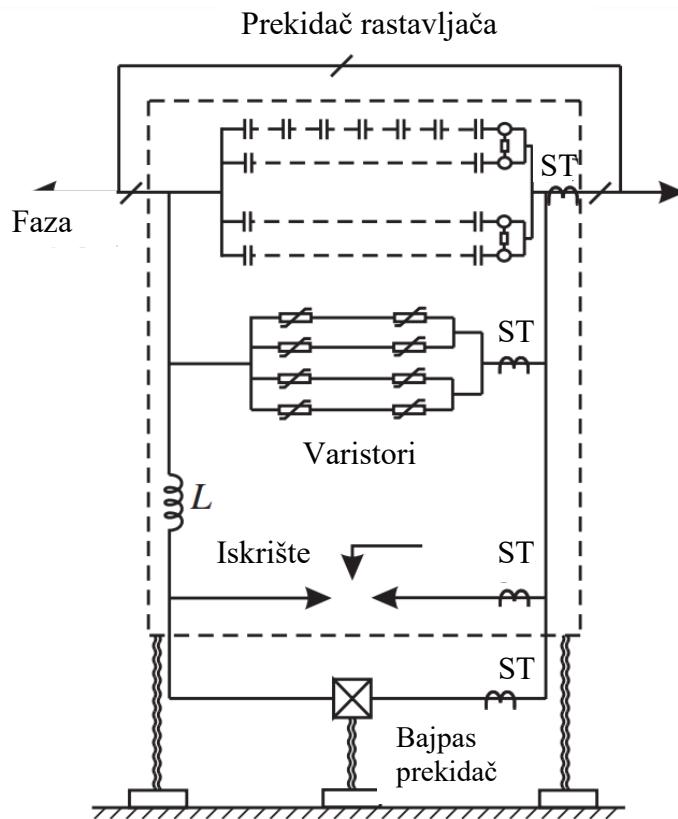
$x_V$  – vrijednost reaktanse voda prije kompenzacije,

$x_C$  – vrijednost reaktanse SCC uređaja,

$k$  – koeficijent kompenzacije SCC uređaja,  $0 \leq k \leq 1$ .

U relaciji (3.3.1) znak „+“ znači da uređaj radi u induktivnom režimu što dovodi do povećanja reaktanse voda, a znak „–“ da radi u kapacitivnom režimu čime se smanjuje reaktansa voda.

Detaljna konstrukcija SCC uređaja prikazana je Slikom 33. U opštem slučaju SCC uređaj sastoji se iz grupe redno i/ili paralelno vezanih kondenzatora koji su ugrađeni u svaku fazu. Redno sa njima povezan je strujni transformator (ST) koji u slučaju neispravnog rada grupe kondenzatora šalje signal zaštiti. Paralelno grupi kondenzatora ugrađeni su metal-oksidni varistori, bajpas prekidač, odvodnici prenapona, strujni transformatori i iskrište koji čine elemente zaštite. Takođe je potrebno montirati i prigušnicu induktivnosti  $L$ , koji ograničava jačinu struje kroz kondenzator kada se iskrište upali. U normalnom pogodu najveći dio struje teče kroz kondenzatorski blok, dok samo mali dio teče put otočnih djelova SCC uređaja [52].



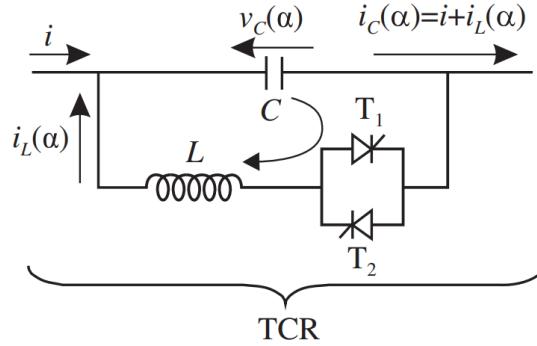
Slika 33. Šema instalacije opreme SCC uređaja

U literaturi se srijeće veći broj tipova serijske kompenzacije, koji se razlikuju na osnovu načina uklapanja odnosno kontrole i broja kondenzatora, a samim tim i koeficijenta  $k$ . Izdvajaju se:

- GTO kontrolisani serijski kondenzator (eng. *GTO Controlled Series Capacitor*): sastoji se od fiksнog kondenzatorа i para GTO antiparalelno povezаниh.
- Tiristorski uklaplјiva serijska kapacitivnost (eng. *Thyristor-Switched Series Capacitor – TSSC*): sastoji se od redno vezanih kondenzatorа. Svaki kondenzator je paralelno vezan sa bajpas prekidačem kojim se vrši kontrola reaktanse  $x_c$  SCC uređaja.
- Tiristorski kontrolisana serijska kapacitivnost (eng. *Thyristor-Controlled Series Capacitor – TCSC*): sastoji se od fiksнog kondenzatorа paralelno vezanog sa TCR. On predstavlja najčešće korišćen redni FACTS uređaj.

### 3.3.1. Tiristorski kontrolisan redni kompenzator

Kao što je već rečeno, tiristorski kontrolisan redni kompenzator sastoji se od niza kondenzatorа koji su šantirani sa TCR (Slika 34) [53]. Ovakva konstrukcija, iako skuplja u odnosu na ostale varijante, omogućava skoro kontinualnu rednu kompenzaciju.



Slika 34. Ekvivalentno kolo TCSC

Princip rada TCSC je sljedeći: kontrolom ugla uključivanja tiristora  $\alpha$  reguliše se vrijednost reaktanse, a samim tim i stuje  $i_L(\alpha)$  TCR-a  $x_L = \omega L$ . Kako je vrijednost kapacitivnosti kondenzatora konstantna (vjerovatno), reaktansa kondenzatora  $x_c = \frac{1}{\omega C}$  je takođe fiksna vrijednost. Time će ekvivalentna reaktansa TCSC zavisiti od vrijednosti ugla tiristora:

$$x_{TCSC} = \frac{jx_L \cdot (-jx_c)}{jx_L - jx_c} = -j \frac{1}{\omega C - \frac{1}{\omega L}} \quad (3.3.1.1)$$

Posmatrajući prethodni izraz, izdvajaju se sljedeće situacije:

- $x_L > x_c$ , TCSC je ekvivalentno kapacitivno kolo,
- $x_L = x_c$ , dolazi do nastanka paralelne rezonanse, TCSC je kolo beskonačne reaktanse,
- $x_L < x_c$ , TCSC je ekvivalentno induktivno kolo.

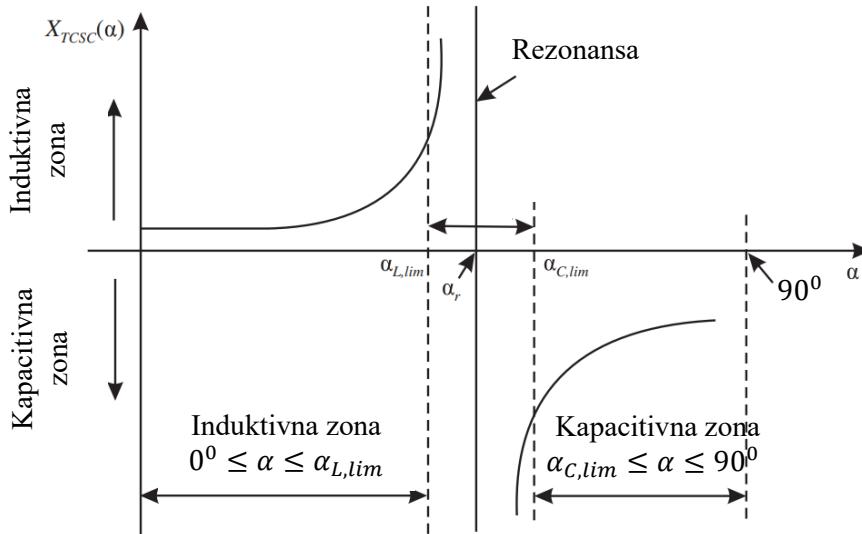
Zavisnost ukupne reaktanse TCR od ugla  $\alpha$  određuje se koristeći izraz [52]:

$$x_L(\alpha) = x_L \frac{\pi}{\pi - 2\alpha - \sin(2\alpha)}, \quad \omega L \leq x_L \leq \infty \quad (3.3.1.2)$$

Jednačina (3.3.1.2) koristi se pri analizi rada TCSC prikazanog na Slici 35. Na grafiku zavisnosti  $x_{TCSC}(\alpha)$  izdvajaju se dvije zone [54]:

1. *Induktivna zona*: pri uglu uključenja tiristora od  $0^\circ$  tiristori provode čime je  $x_L \ll x_c$ . Samim tim struja će se kroz kolo zatvarati kroz TCR. Povećavajući vrijednost ugla  $\alpha$  povećaće se i vrijednost  $x_L$ . Ipak, ona će i dalje biti mnogo manja od reaktanse  $x_c$  što dovodi do povećanja induktivne reaktanse kola TCSC.
2. *Kapacitivna zona*: za vrijednost ugla tiristora od  $90^\circ$  tiristori su blokirani pa je reaktansa TCR beskonačno velika, odnosno  $x_L \gg x_c$ . Tada će se struja zatvarati kroz fiksnu kapacitivnost. Postepenim smanjivanjem ugla  $\alpha$  smanjiće se i vrijednost reaktanse TCR, ali je ona i dalje veća od reaktanse  $x_c$  što dovodi do povećanja kapacitivne reaktanse kola.

Na Slici 35 označena je vrijednost ugla uključenja tiristora  $\alpha_r$ , koja se dobija pri uslovu  $x_L = x_c$ . Pri ovoj vrijednosti ugla paljenja tiristora nastaje paralelna rezonansa u kolu. Zato je izuzetno važno izbjegći nastanak ove situacije, zbog čega je tokom rada TCSC potrebno ograničiti vrijednosti ugla u induktivnom i kapacitivnom režimu,  $\alpha_{L,lim}$  i  $\alpha_{C,lim}$  respektivno.

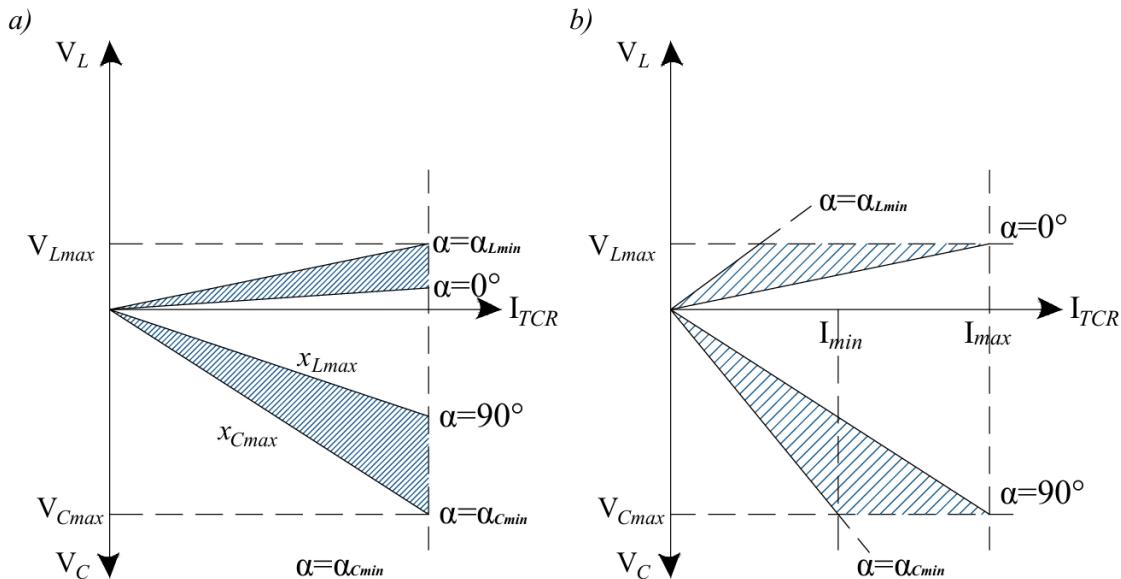


Slika 35. Zavisnost reaktanse TCSC od ugla tiristora

### 3.3.1.1. I-V kriva TCSC

Radna karakteristika TCSC razlikuje se u zavisnosti od režima kompenzacije u kojem se uređaj koristi [52]:

1. *Režim kompenzacije reaktanse* (Slika 36 a)) – vrši se takvo podešavanje da je pri bilo kojoj vrijednosti struje i napona reaktansa uređaja maksimalna. Maksimalne vrijednosti napona i struje određuju maksimalne induktivne i kapacitivne reaktanse, u oba režima. Sa druge strane, u kapacitivnom režimu, minimalna vrijednost napona se dobija pri uglu uključivanja od  $90^\circ$ , a u induktivnom pri uglu od  $0^\circ$ .
2. *Režim kompenzacije napona* (Slika 36 b)) – cilj je da vrijednost napona bude konstantna i jednaka maksimalnoj. Tokom kapacitivnog režima rada, maksimalna vrijednost napona pri minimalnoj vrijednosti struje određena je minimalnom vrijednošću ugla  $\alpha$ . Stoga, ako se žele ostvariti veće vrijednosti struje, a uz održavanje konstantnog (maksimalnog) napona, potrebno je podešavati vrijednost ugla uključivanja tiristora. U induktivnom režimu rada, maksimalna vrijednost napona na kondenzatoru definisana je maksimalnom vrijednošću ugla uključivanja tiristora prije ulaska u rezonantno stanje a za minimalnu vrijednost struje, dok se minimalna vrijednost napona postiže pri uglu uključivanja jednakom  $0^\circ$ .



Slika 36. I-V karakteristika TCSC u režimu kompenzacije: a) reaktanse b) napona

### 3.3.2. Uticaj SCC na tranzijentnu stabilnost EES

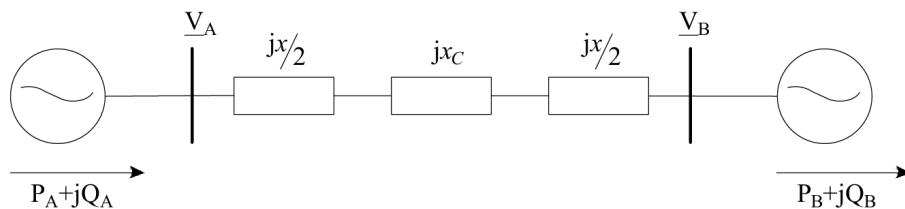
Na Slici 37 predstavljen je nekompenzovan (a) i sistem kompenzovan ugradnjom SCC uređaja na sredini voda (b). Jasno je da je u cilju povećanja prenesene aktivne snage potrebno da SCC radi u kapacitivnom režimu čime je aktivna snaga koja se prenosi vodom u koji je ugrađen SCC uređaj jednaka:

$$P_e = \frac{V_A V_B}{x - x_c} \sin(\delta) = \frac{V_A V_B}{x(1 - k)} \sin(\delta) \quad (3.3.2.1)$$

gdje je:

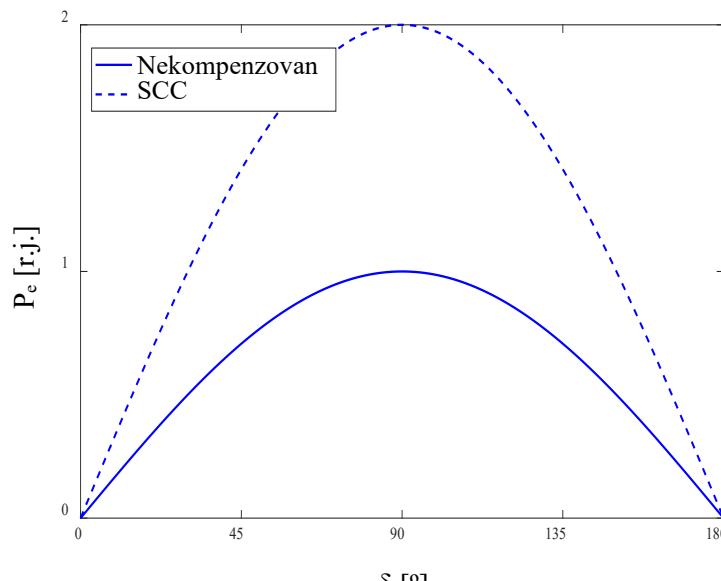
$x$  – reaktansa voda,

$x_c$  – reaktansa SCC uređaja.



Slika 37. Kompenzovan SCC uređajem dvogeneratorski sistem

Zavisnost aktivne snage koja se prenosi ovim vodom data je na Slici 38 [55]. Jasno je da vrijednost prenesene snage zavisi od vrijednosti koeficijenta  $k$ . Pravilnim odabirom lokacije i podešavanja, ovaj uređaj doprinosi smanjenju gubitaka i održavanju stabilnih naponskih prilika a samim tim i poboljšanju tranzijentne stabilnosti EES.

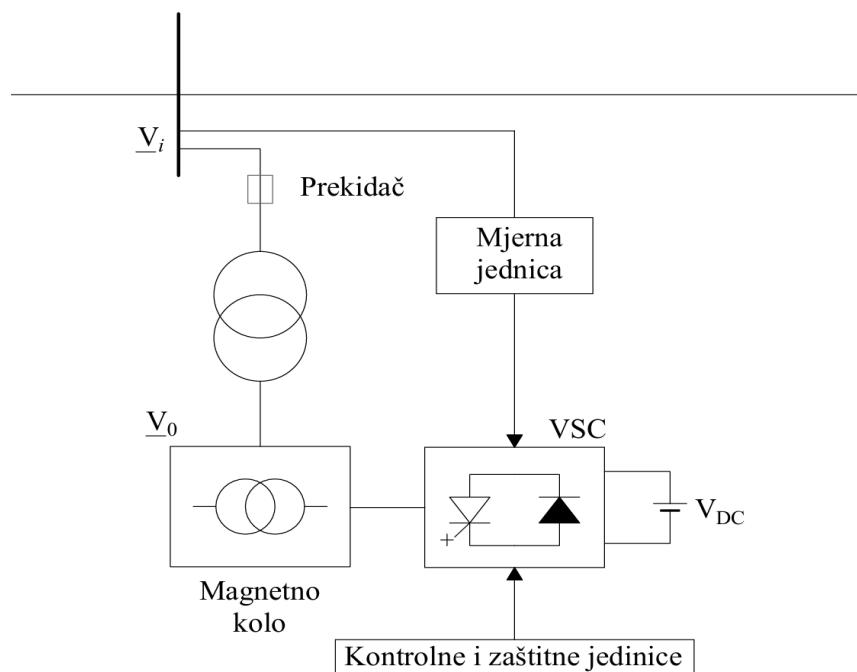


Slika 38. Kriva snaga-ugao u slučaju nekompenzovanog i sistema kompenzovanog SCC uređajem

### 3.4. Statički sinhroni kompenzator

Statički sinhroni kompenzator (STATCOM) je obećavajuća tehnologija koja se u velikoj mjeri koristi kao najsavremeniji dinamički šant kompenzator za kontrolu reaktivne snage u prenosnom i distributivnom sistemu. Riječ staticki, kao u slučaju SVC-a označava da uređaj nema obrtnih elemenata, dok termin sinhroni govori da je uređaj ekvivalentan sinhronom generatoru. Tokom posljednjih nekoliko decenija STATCOM uređaj dobija veliko interesovanje kao moćno sredstvo koje omogućava veoma brzu kontrolu napona na mjestu priključenja omogućavajući i amplitudski i fazni pomjeraj generisanog napona. Osnovna struktura STATCOM-a prikazana je na Slici 39. On se sastoji iz sljedećih elemenata [56]:

- izvora DC napona,
- naponsko kontrolisanog konvertora (*eng. Voltage Source Sonverter - SVC*),
- magnetnog kola (koristi se u svrhu snižavanja vrijednosti viših harmonika),
- transformatora,
- prekidača (najčešće je izведен kao antiparalelni veza GTO prekidača i dioda ili IGBT),
- kontrolnih jedinica,
- zaštitnih jedinica
- mjernih jedinica.

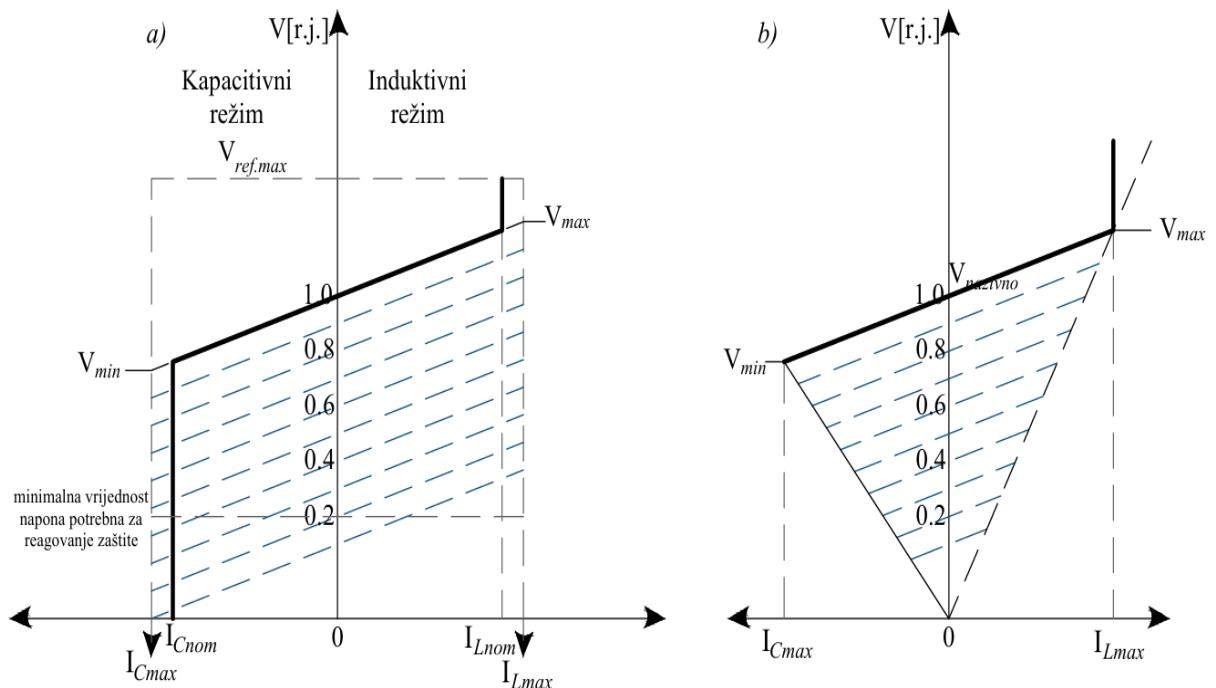


Slika 39. Opšta šema STATCOM-a

STATCOM radi na principu generisanja naizmjeničnog napona  $V_0$  transformacijom jednosmjernog napona primjenom VSC kontrolera. Vrijednost napona  $V_0$  zavisi od napona mjerenog u tački priključenja uređaja  $V_i$  pri čemu je potrebno da ova dva napona budu u fazi. Razlika u amplitudama ovih napona predstavlja pad napona na reaktansi STATCOM-a  $x_{ST}$  što utiče na formiranje induktivne ili kapacitivne struje. Stoga struja STATCOM-a zavisi od amplitude napona  $V_0$ . U slučaju da struja prednjači naponu za  $90^\circ$ , uređaj radi kao kapacitivni element. Suprotno, u slučaju istog iznosa kašnjenja struje STATCOM u EES radi kao induktivni element [57].

### 3.4.2. I-V karakteristika STATCOM-a

Strujno-naponska karakteristika STATCOM-a prikazana je na Slici 40 a) [58]. STATCOM može da, pri bilo kojoj vrijednosti napona čvora, generiše maksimalnu struju kapacitivnog ili induktivnog karaktera. Ovo je suštinska razlika i glavna prednost STATCOM-a u odnosu na SVC uređaj kod kojeg vrijednost injektirane/apsorbovane snage zavisi od napona čvora (Slika 40 b)).



Slika 40. I-V karakteristika a) STATCOM-a b) SVC-a

### 3.4.3. Poređenje STATCOM-a i SVC

STATCOM i SVC su dvije najčešće korišćene šant tehnologije iz grupe FACTS uređaja što otvara prostor za njihovo dugogodišnje poređenje. Prednosti STATCOM-a u odnosu na SVC [59 – 61]:

- Vrijednost injektiranja SVC-a zavisi od kvadrata napona sabirnice u kojoj je ugrađen, dok STATCOM može da injektira maksimalnu struju pri bilo kojoj vrijednosti napona.
- Dok je SVC moguće preopteretiti tek za određenu vrijednost admitanse STATCOM se može preopteretiti trenutno.
- STATCOM nudi izuzetno brzo reagovanje (ispod 50ms) u poređenju sa SVC-om čija elektromehanička priroda rezultira sporijim odzivom (100-200ms).
- U pogledu ublažavanja tranzijentnih poremećaja STATCOM takođe pokazuje superiornije dinamičko ponašanje. S druge strane, ponašanje SVC-a zavisi od napona sabirnice što ga čini sklonijim interakcijama sa drugim elementima mreže. Ovo povremeno može pogoršati smetnje umesto da ih ublaži.
- Dimenzionalno, STATCOM je manji uređaj.

## 4. WEBSITE ZA PROCJENU TRANZIJENTNE STABILNOSTI

Dinamika savremenih prenosnih sistema, nelinearni karakter tranzijentne stabilnosti, njen uticaj na rad elektroenergetskih sistema i na snadbijevanje potrošača električnom energijom govore o izuzetnom značaju proučavanja iste. Uslijed izrazitog značaja procjene tranzijentne stabilnosti na rad EES autori širom svijeta su predložili veliki broj metoda kako bi to bilo omogućeno. U radu [32] prikazan je način određivanja tranzijetne stabilnosti upotrebom simulacije *Hybrid Electromagnetic Transient (EMT) - Transient Stability (TS)* metoda u MATLAB/Simulink okruženju. Paket Simulink korišćen je u i u radu [33] kako bi se odredila tranzijentna stabilnost EES korišćenjem metoda *Single Machine Equivalent (SIME)*. Opis dinamičkog modela višemašinskog energetskih sistema za analizu prolazne stabilnosti i njegova kompjuterska simulaciju korišćenjem MATLAB/Simulink-a data je u radu [81]. Upotrebom MATLAB /Simulink-a prikazan je efekat TSSC, SVC i STATCOM uređaja na tranzijentnu stabilnost EES [63 - 65]. Moguće je primijetiti da se u svim prethodno navedenim radovima kao sredstvo za rješavanje problema tranzijentne stabilnosti koristi softversko okruženje za simulaciju MATLAB/Simulink-a. Iako predstavlja jedno od najpopularnijih alata za rješavanje mnogobrojnih problema EES rad u MATLAB/Simulink okruženju, naročito u slučaju sistema velikih dimenzija, komplikuje realizaciju problema zbog nepodobnosti okruženja uslijed potrebe za grafičkim formiranjem svakog pojedinačnog elementa sistema. Jedan od jednostavnijih mehanizama za procjenu tranzijentne stabilnosti izložen je u ovom poglavlju.

U ovom poglavlju biće opisan website pomoću kojeg će korisnici bez poznavanja postupka za analizu tranzijentne stabilnosti moći da vrše proračun iste, kako u slučaju nekompenzovanog tako i u slučaju FACTS uređajima kompenzovanog jednomašinskog i višemašinskog sistema.

### 4.1. Opis website-a

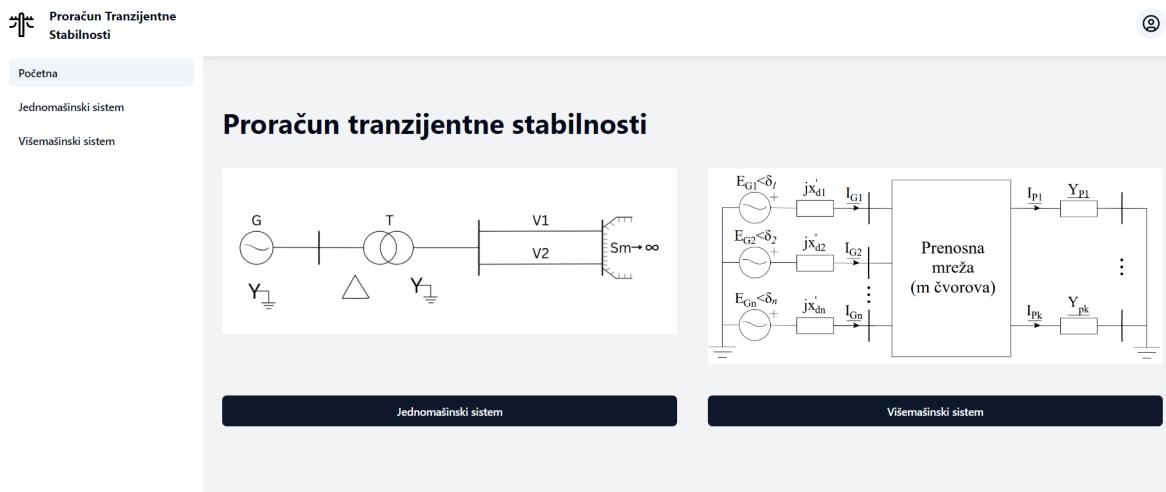
Kako bi korisnik bio u mogućnosti da koristi *JavaScript website*<sup>1</sup> potrebno je da se registruje unosom podataka u vidu korisničkog imena i šifre (Slika 41). Nakon uspješne registracije dalja putanja nastavlja se na početnoj stranici proračuna tranzijentne stabilnosti (Slika 42) gdje korisnik ima mogućnost izbora između proračuna tranzijentne stabilnosti jednomašinskog i višemašinskog sistema.

---

<sup>1</sup> <https://tsa-kristina.vercel.app>



Slika 41. Naslovna stranica website-a



Slika 42. Početna stranica website-a

#### 4.1.1. Website – jednomašinski sistem

Set parametara potreban za proračun tranzijentne stabilnosti jednomašinskog sistema dat je na početnoj stranici jednomašinskog sistema (Slika 43). Iako je korisniku ponuđen niz zadatih vrijednosti on ima mogućnost promjene istih. U slučaju jednomašinskog sistema kao opcije za proračun dat je metod jednakih površina i metod numeričke integracije.

**Proračun Tranzijentne Stabilnosti**

Početna

Jednomašinski sistem

Višemašinski sistem

Xg'	Sng	0.3	1
Xt	T	0.15	7
Xt0	E	0.15	1.1626
Xv1	U	0.5	0.90081
Xv10	Pm	1.5	0.9
Xv2	f	0.93	50
Xv20		2.7	

Metod JP      Metod NI

Slika 43. Website – jednomašinski sistem

### Metod jednakih površina

Ukoliko korisnik kao sredstvo za procjenu tranzijentne stabilnosti jednomašinskog sistema odabere metod jednakih površina potrebno je da unese sledeće inpute (Slika 44):

- *vod u kvaru*: potrebno je da korisnik odabere vod na kojem se desio kvar (1 – vod  $V1$ , 2 – vod  $V2$ ),
- *tip kvara*: vrsta kratkog spoja (3 – tropolni  $ks$ , 2 – dvopolni  $ks$ , 21 – dvopolni  $ks$  sa zemljom, 1 – jednopolni  $ks$ ),
- *udaljenost kvara od početka voda*: lokacija na kojoj se desio kvar [0,1].

**Proračun Tranzijentne Stabilnosti**

Početna

Jednomašinski sistem

Višemašinski sistem

Vod u kvaru

Unesi..

Tip kvara

Izaberi

Udaljenost kvara od početka voda [0-1]

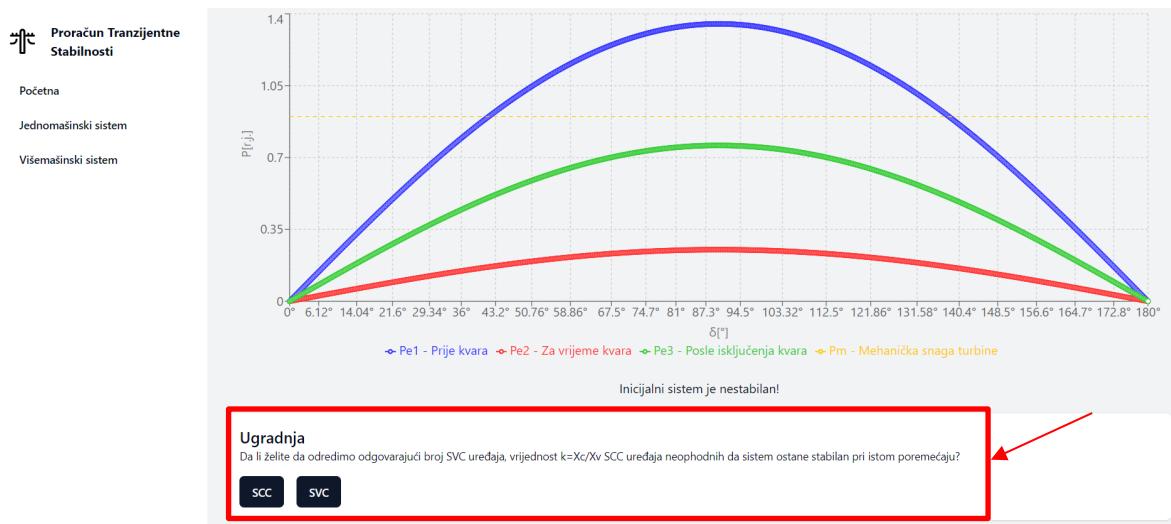
Unesi..

Ispitaj TS

Slika 44. Website – metod jednakih površina

Klikom na dugme „Ispitaj TS“ korisnik dobija grafički i numerički rezultat metoda jednakih površina nakon čega je korisniku data opcija provjere uticaja ugradnje odabralih FACTS uređaja (Slika 45). U zavisnosti od rezultata proračuna korisniku je data mogućnost provjere uticaja odabralih FACTS uređaja na tranzijentnu stabilnost:

- *sistem je nestabilan* – korisniku se nudi izbor između ugradnje SVC i SCC uređaja. Tokom izbora SCC uređaja potrebno je da korisnik unese vod u koji želi da ugradi uređaj (1 – vod  $V1$ , 2 – vod  $V2$ , 12 – oba voda) i lokaciju na kojoj želi da ugradi uređaj (0-1). Sada rezultat predstavlja neophodno podešavanje SCC uređaja (vrijednost koeficijenta  $k$ ) ili broj SVC uređaja koje je potrebno ugraditi u sistem tako da on nakon inicijalnog poremećaja ostane stabilan ukoliko je to za zadate uslove izvodljivo. Treba imati na umu da je maksimalan broj SVC uređaja ograničen na 2 jer bi za sistem ovih dimenzija ugradnja većeg broja bila ekonomski neisplativa.
- *sistem je stabilan* – pošto je u slučaju ovog scenarija sistem stabilan za bilo koje vrijeme isključenja kvara korisniku se nudi opcija provjere promjene rezerve stabilnosti nakon ugradnje odabranog uređaja. Za opciju SVC potrebno je odabrati broj uređaja (ograničen na 2), dok u slučaju SCC-a korisnik unosi vod u koji se ugrađuje, lokacija i vrijednost koeficijenta  $k$ .
- *sistem je stabilan za određeno vrijeme isključenja* – nakon ugradnje odabranog uređaja, gdje je unos potrebnih podataka isti kao u slučaju stabilnog sistema, prikazan je uticaj FACTS uređaja na promjenu kritičnog vremena isključenja kvara.



Slika 45. Website – metod jednakih površina ugradnja FACTS uređaja

## Metod numeričke integracije

Za realizaciju proračuna tranzijentne stabilnosti primjenom metoda numeričke integracije potreban set ulaznih podataka isti je kao kod metoda jednakih površina sa dodatkom vremena isključenja kvara u sekundama (Slika 46).

The screenshot shows a web application interface for transient stability calculation. On the left, there's a sidebar with navigation links: 'Početna', 'Jednomašinski sistem', and 'Višemašinski sistem'. The main area has a title 'Vod u kvaru' with an input field 'Unesi...'. Below it is a dropdown menu 'Tip kvara' with 'Izaberi' selected. Underneath is a green text box 'Udaljenost kvara od početka voda [0-1]' with an input field 'Unesi...'. At the bottom of this section is a text box 'Vrijeme isključenja kvara [s]' with an input field 'Unesi...'. A large black button at the bottom right says 'Ispitaj TS'. To the right of the form is a schematic diagram of an electrical power system. It includes a generator (G), a transmission line with a shunt load ( $Y_{\frac{1}{2}}$ ), a transformer (T) with a delta connection, another transmission line with a shunt load ( $Y_{\frac{1}{2}}$ ), and two voltage sources labeled  $V_1$  and  $V_2$ . The system ends with a load labeled 'Sm → ∞'. A small coordinate system indicates horizontal distance 'a' and vertical height 'z'.

Slika 46. Website – metod numeričke integracije

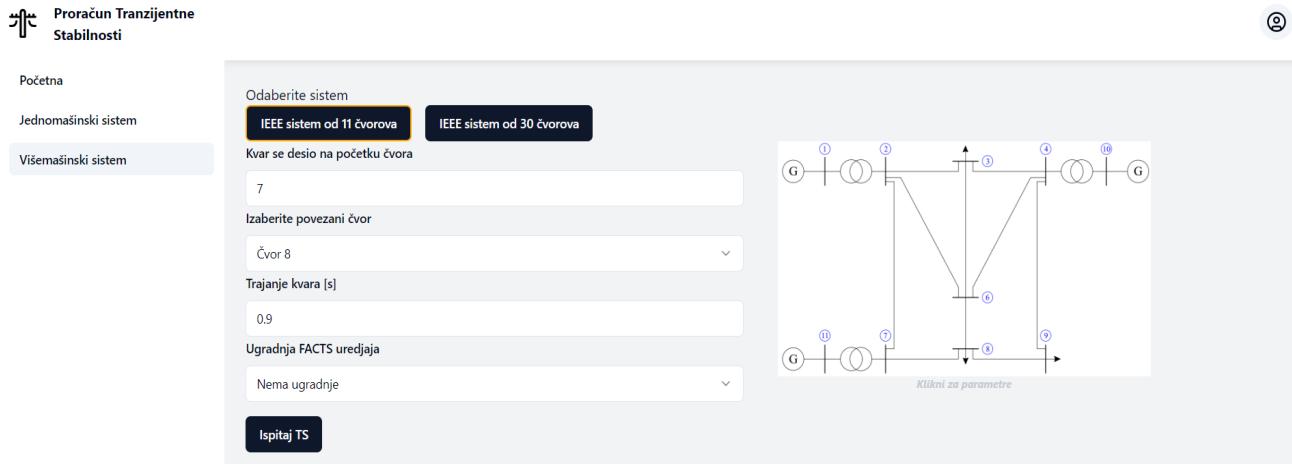
Rezultati u slučaju ovog metoda jesu grafičke prirode. Kao i u slučaju prethodnog proračuna, korisniku je data opcija provjere uticaja SVC i SCC uređaja na tranzijentnu stabilnost jednomašinskog sistema pri inicijalnom kvaru. Korisnik unosi željeni broj SVC uređaja (ograničen na 2), odnosno vod, poziciju i vrijednost koeficijenta  $k$  SCC uređaja.

### 4.1.2. Website – višemašinski sistem

Procjena tranzijentne stabilnosti višemašinskog sistema omogućena je korisniku na primjeru standardizovanih IEEE sistema od 11 i 30 čvorova. Izborom sistema, automatski se prikazuju jednopolna šema, a klikom na istu korisniku se pruža uvid u mrežne parametre sistema (Slika 47). Proračun se obavlja primjenom postupka opisanog u poglavlju 2.4. gdje je za set ulaznih podaka potrebno da korisnik unese sledeće podatke:

- *čvor pogoden kvarom* – čvor u čijoj je neposrednoj blizini došlo do nastanka tropolnog kratkog spoja,
- *povezani čvor* – određuje vod između čvora pogodenim kvarom i novounesenog čvora na kome je došlo do kvara i čijim isključenjem iz sistema (dvostranim reagovanjem prekidača) se eliminiše kvar,
- *trajanje kvara* – vrijeme u sekundama, potrebno dvostrano isključenje voda u kvaru.

Nakon izbora test sistema i definisanja poremećaja, pritiskom na dugme „Ispitaj TS“ korisnik dobija grafičke rezultate nakon čega je ponuđen izbor provjere uticaja izdvojenih FACTS uređaja na tranzijentnu stabilnost pri inicijalnim uslovima poremećaja. Korisnik može da se odluči za ugradnju SCC i/ili STATCOM uređaja. Potrebno je unijeti željeni broj STATCOM uređaja, čvorove u kojima će se nalaziti i vrijednost injektiranja reaktivne snage u jediničnim vrijednostima, odnosno broj SCC uređaja, redni broj vodova u koje se ugrađuju i vrijednost koeficijenta  $k$ .



Slika 47. Website – višemašinski sistem

## 5. REZULTATI SIMULACIJE

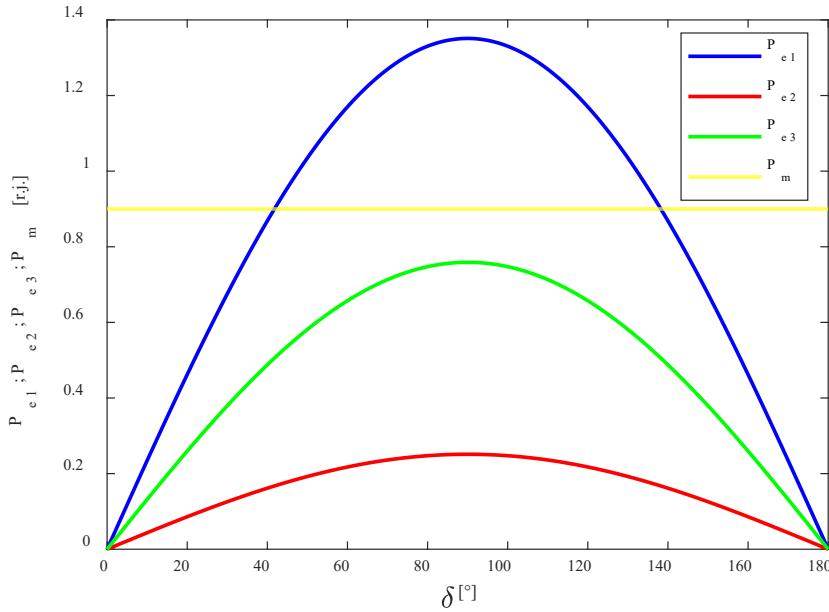
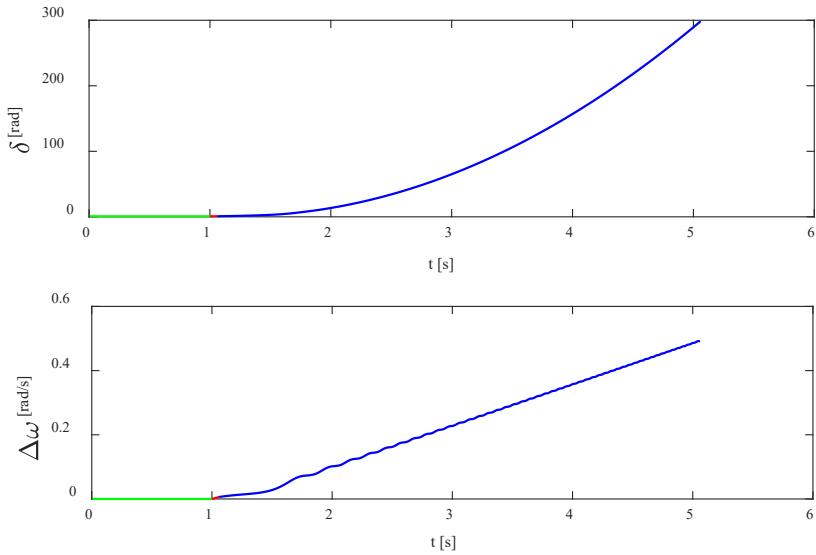
Usljed izrazitog značaja procjene tranzijentne stabilnosti na pouzdan i siguran rad elektroenergetskog sistema autori širom svijeta su predložili veliki broj metoda kako bi to bilo omogućeno. Iako je razvijen veliki broj alata za rješavanje ovog problema, mali broj istih je našao svoju praktičnu primjenu. U ovom poglavlju biće simulirani poremećaji u vidu kratkih spojeva na različim lokacijama u prenosnom dijelu elektroenergetskog sistema i biće ispitan njihov uticaj na tranzijentnu stabilnost istog. Nakon izvođenja odgovarajućih zaključaka iz prethodne analize u drugom dijelu poglavlja će algoritam iz prethodnog biti upotrijebljen za optimizaciju snage i lokacije odabralih FACTS uređaja. Navedeno je urađeno u cilju mitigacije negativnih dejstava kvarova na oscilacije generatora prilikom istih. Pri odabiru dva navedena parametra koja determinišu sami FACTS uređaj u obzir su uzeti ukupni gubici aktivne snage u sistemu čija je minimizacija upotrijebljena kao kriterijumska funkcija u samom algoritmu. Adekvatni zaključci koji povezuju FACTS uređaje sa njihovom primarnom namjenom a to je poboljšanje tranzijentne stabilnosti će biti izvedeni u paralelji sa njihovim uticajem na jedan od najvažnijih parametara ekonomičnosti i efikasnosti funkcionisanja elektroenergetskog sistema odnosno na gubitke aktivne snage u sistemu.

### 5.1. Rezultati simulacije – jednomašinski sistem

- *Vod u kvaru: VI, Tip kvara: 3ks, Udaljenost mjesta kvara od početka voda: 0.3*

U cilju analize tranzijentne stabilnosti EES, prepostavljeno je da se tropolni kratki spoj desio na vodu 1, na razdaljini  $a = 0.3$  od početka voda. Vrijeme trajanja kvara je 0.06s.

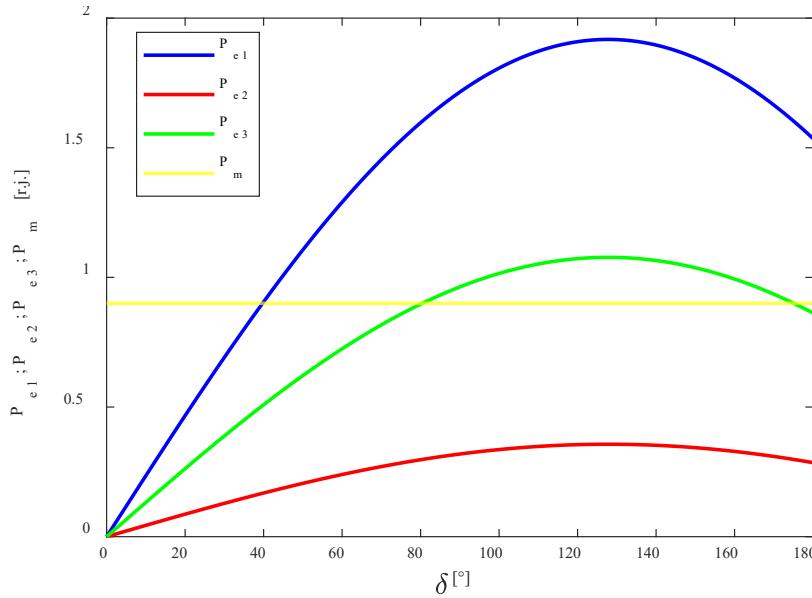
Sa Slike 48, na kojoj su prikazane ugaone krive za opisani slučaj, uočava se da su električne snage tokom i nakon otklanjanja kratkog spoja  $P_{e2}$  i  $P_{e3}$  manje od mehaničke snage  $P_m$  na čitavom intervalu zbog čega dolazi do ubrzavanja rotora i generator nije u stanju da održi sinhronizam. Ovaj zaključak moguće je potvrditi i primjenom numeričke analize gdje se sa Slike 49 vidi da se ugao rotora aperiodično mijenja u vremenu.

Slika 48. Metod jednakih površina - 3ks, VI,  $a = 0.3$ Slika 49. Metod numeričke integracije - 3ks, VI,  $a = 0.3$ 

U ovom slučaju inicijalni sistem je nestabilan što je potvrđeno primjenom oba prethodno opisana metoda.

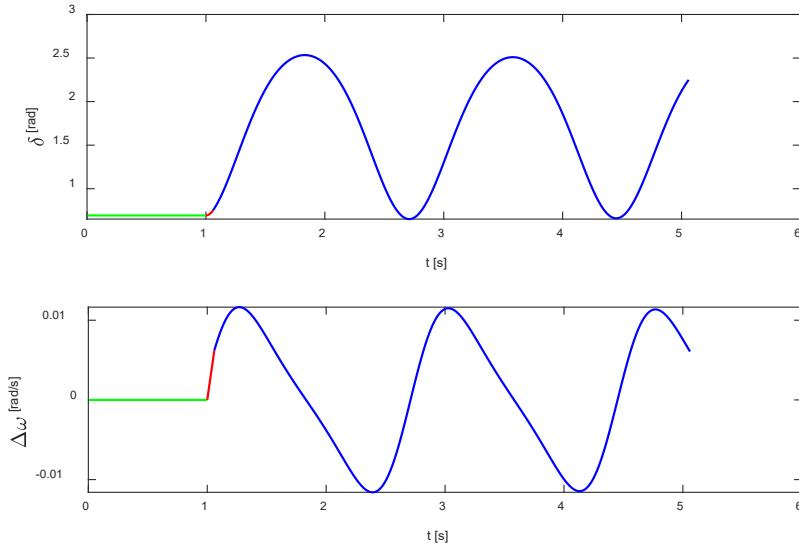
- *Ugradnja SVC uređaja*

U nastavku je posmatran uticaj ugradnje jednog SVC uređaja na poboljšanje tranzijentne stabilnosti. Primjenom metoda jednakih površina za uslov  $A_1 = A_2$  određen je ugao isključenja  $\delta_{isk}$ . Primjenom jednačina (2.3.1.1.9) i (2.3.1.1.14) proračunata je vrijednost potrebnog vremena isključenja kvara koja iznosi  $0.09s$ . Ugaone krive za posmatrani slučaj prikazane su na Slici 50.



Slika 50. Metod jednakih površina nakon priključenja SVC uređaja - 3ks, VI,  $a = 0.3$

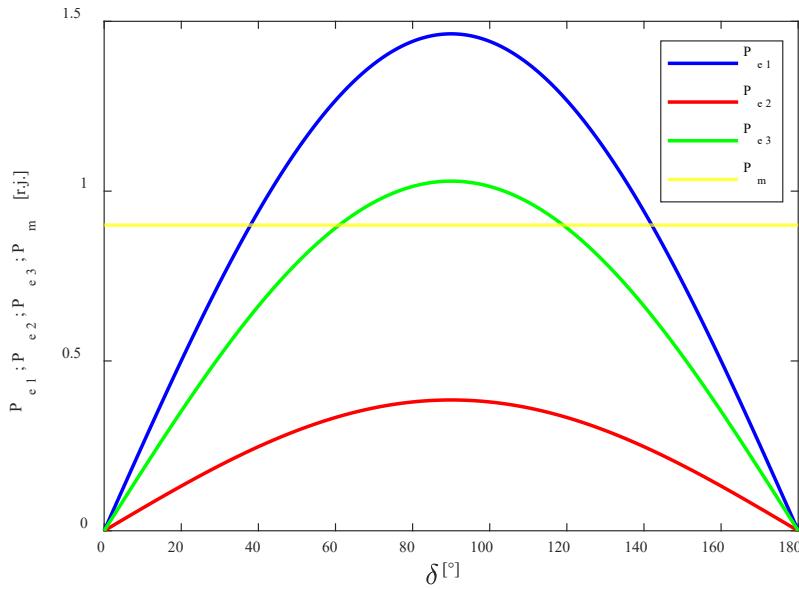
Prethodni rezultati potvrđeni su korišćenjem metoda numeričke analize (Slika 51), koristeći set jednačina (2.3.1.2.1) - (2.3.1.2.8). S obzirom da su promjena ugla opterećenja i promjena brzine generatora periodični, to znači da je generator očuvao sinhronizam.



Slika 51. Metod numeričke integracije nakon priključenja SVC uređaja - 3ks, VI,  $a = 0.3$

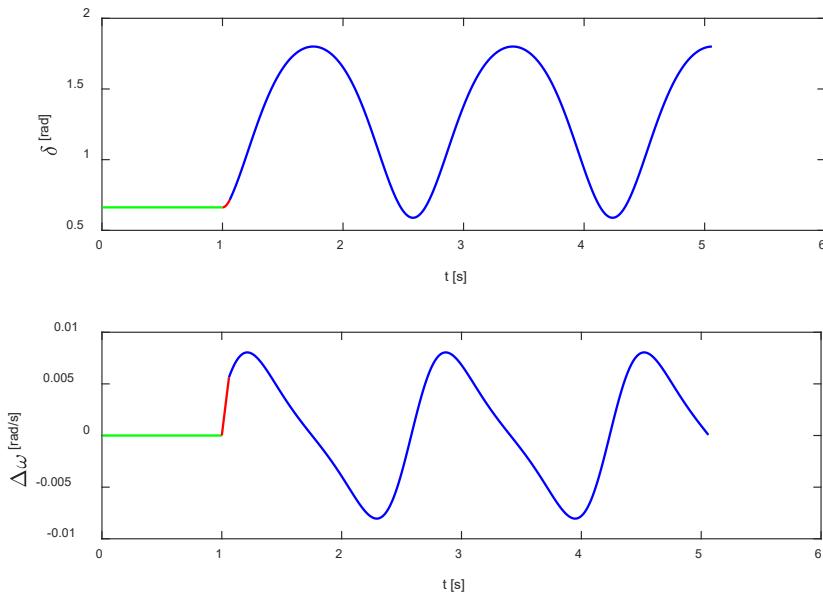
- Ugradnja SCC uređaja

Rednu kompenzaciju je moguće ugraditi u vod pogoden kvarom, vod koji nije pogoden kvarom ili u oba voda. Posmatraće se slučaj priključenja SCC uređaja u vod koji nije pogoden kvarom na udaljenosti  $0.7 \cdot l_v$ . Da bi se zadovoljio uslov tranzijentne stabilnosti jednomašinskog sistema koeficijent  $k$  ovog uređaja treba da bude 0.39. U ovom slučaju kvar se isključuje za 0.06s i sistem je u stanju da očuva sinhronizam (Slika 52).



Slika 52. Metod jednakih površina nakon priključenja SCC uređaja - 3ks, VI,  $a = 0.3$

Prilikom provjere stabilnosti numeričkim putem dolazi se do rezultata prikazanih na Slici 53. Zapaža se da su promjena ugla opterećenja i promjena brzine generatora periodični, odnosno tranzijentna stabilnost je očuvana. Pri tome je potrebno naglasiti da je ova promjena dobijena za vrlo malo vrijeme isključenja kvara, te da bi sa povećanjem vrijednosti koeficijenta  $k$  posmatrano vrijeme moglo biti značajno veće.



Slika 53. Metod numeričke integracije nakon priključenja SCC uređaja - 3ks, VI,  $a = 0.3$

Međutim, analizom stanja sistema nakon ugradnje SCC uređaja u vod koji je pogodjen kvarom na razdaljini  $0.3 \cdot l_v$ , od početka voda pokazuje se da ovakav izbor redne kompenzacije ne može pomoći očuvanju tranzijentne stabilnosti sistema.

- *Vod u kvaru: VI, Tip kvara: Iks, Udaljenost mjesta kvara od početka voda: 0.9*

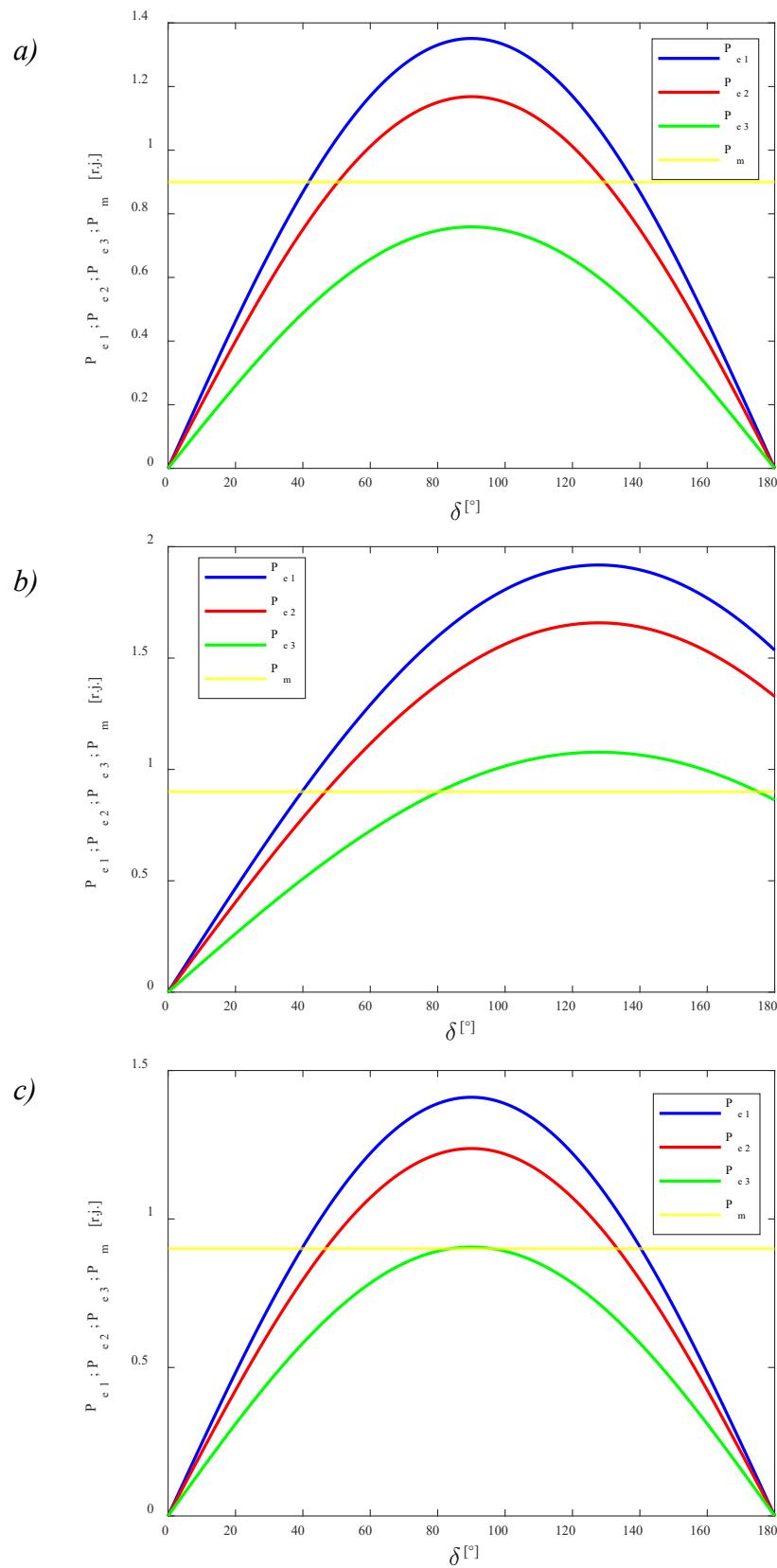
Ukoliko bi došlo do jednopoljnog kratkog spoja na vodu 1, u blizini sabirnice jake mreže, odnosno na udaljenosti  $0.9 \cdot l_v$ , od početka voda došlo bi do gubitka tranzijentne stabilnosti sistema (Slika 54 a)). Na osnovu prethodnog i ovog primjera ali i rezultata iz Tabele I i Tabele II u kojima je dat cijelokupan prikaz stanja sistema nakon svih mogućih varijacija tipova kratkih spojeva i njihovih lokacija na vodu 1 prije i nakon ugradnje FACTS uređaja zaključuje se da za bilo koju kombinaciju poremećaja sistem bez ugrađenih uređaja ispada iz sinhronizma. Zašto se ovo dešava? Reaktansa voda 1 je skoro duplo manja od reaktanse voda 2 pa u normalnom pogonu veći dio struje prolazi vodom 1. Nakon kratkog spoja na vodu manje reaktanse protok snage će biti manji nego u slučaju da je do istog kvara došlo na vodu veće reaktanse. Zbog toga kvarovi na vodu 1 predstavljaju veći rizik za očuvanje stabilnosti.

- *Ugradnja SVC uređaja*

Za slučaj istog inicijalnog poremećaja, ali za sistem sa ugrađenim SVC uređajem na sredini dva paralelna voda sistem bi bio sposoban da očuva tranzijentnu stabilnost i kada bi kvar trajao neograničeno dugo vremena (Slika 54 b)).

- *Ugradnja SCC uređaja*

Kako bi ugradnja SCC uređaja na sredini voda 2 mogla da doprinese očuvanju tranzijentne stabilnosti pri ovakovom tipu poremećaja potrebno je da podešenje koeficijenta  $k$  bude jednak 0.24 uz uslov da je kvar potrebno isključiti za vrijeme manje od  $0.19s$  što predstavlja izuzetno veliko vrijeme za moderne prekidače (Slika 54 c)). Savremeni prekidači i zaštitni releji detektuju i otklanjaju kvar aproksimativno za vrijeme trajanja tri perioda učestanosti  $50Hz$  [82].



Slika 54. a) Metod jednakih površina -1ks, V1,  $a = 0.9$   
 b) nakon ugradnje SVC uređaja c) nakon ugradnje SCC uređaja

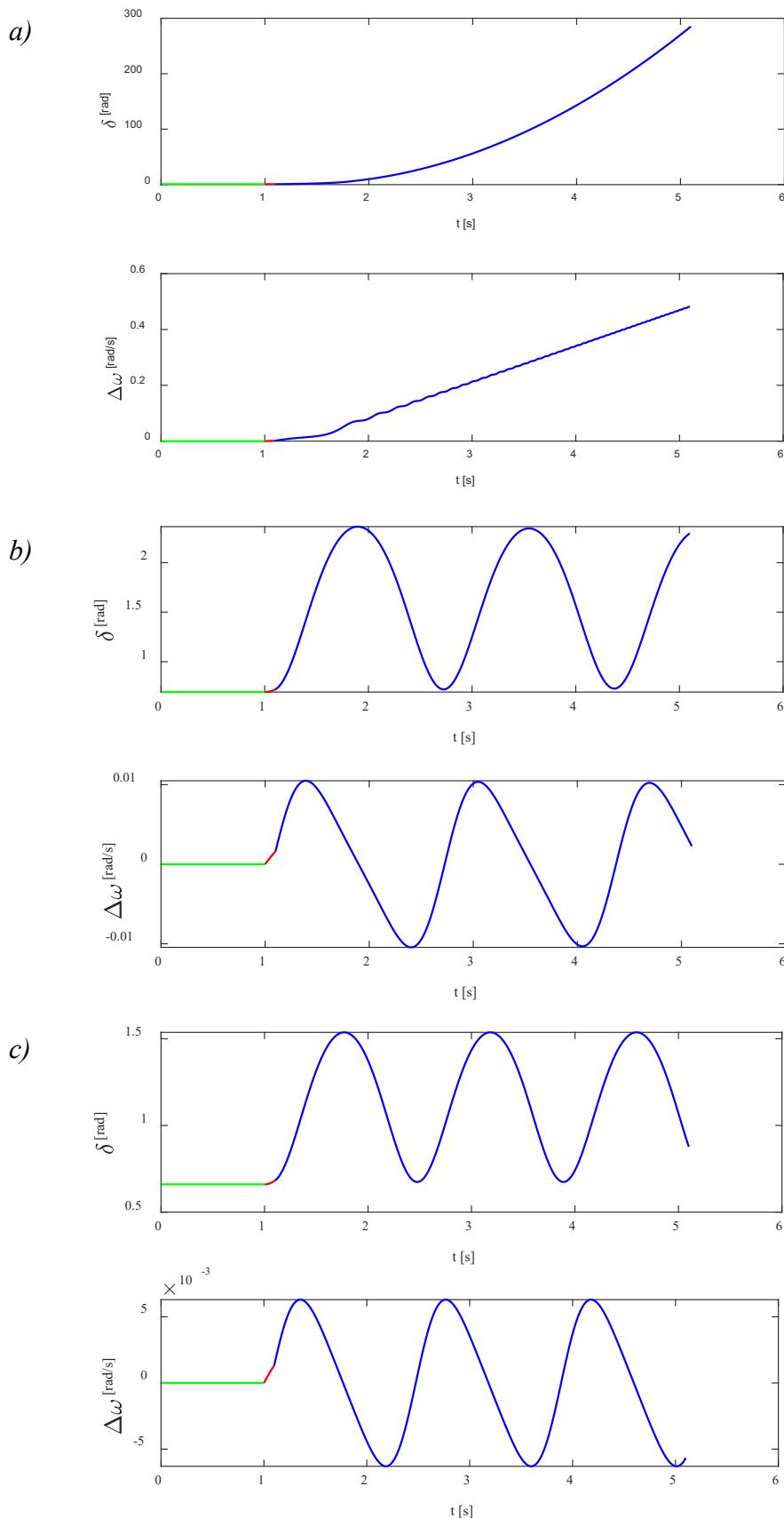
Tabela I: Rezultati proračuna tranzijentne stabilnosti jednomašinskog sistema – 3ks i 2ks na vodu 1

INFORMACIJE O KVARU			REZULTATI	SVC	SCC		
Vod u kvaru	Tip kvara	Lokacija kvara	Proračun TS	broj = 1	vod - 2	k = 0.5	lokacija - 0.5
1	3	0	nestabilan	0.076s		0.108s	
1	3	0.1	nestabilan	0.082s		0.118s	
1	3	0.2	nestabilan	0.087s		0.127s	
1	3	0.3	nestabilan	0.092s		0.135s	
1	3	0.4	nestabilan	0.096s		0.143s	
1	3	0.5	nestabilan	0.100s		0.150s	
1	3	0.6	nestabilan	0.104s		0.156s	
1	3	0.7	nestabilan	0.108s		0.162s	
1	3	0.8	nestabilan	0.112s		0.168s	
1	3	0.9	nestabilan	0.115s		0.173s	
1	3	1	nestabilan	0.076s		0.108s	
1	2	0	nestabilan	0.198s		0.173s	
1	2	0.1	nestabilan	0.300s		0.197s	
1	2	0.2	nestabilan	stabilan		0.223s	
1	2	0.3	nestabilan	stabilan		0.254s	
1	2	0.4	nestabilan	stabilan		stabilan	
1	2	0.5	nestabilan	stabilan		stabilan	
1	2	0.6	nestabilan	stabilan		stabilan	
1	2	0.7	nestabilan	stabilan		stabilan	
1	2	0.8	nestabilan	stabilan		stabilan	
1	2	0.9	nestabilan	stabilan		stabilan	
1	2	1	nestabilan	stabilan		stabilan	

Tabela II: Rezultati proračuna tranzijentne stabilnosti jednomašinskog sistema–2ksz i 1ks na vodu I

INFORMACIJE O KVARU			REZULTATI	SVC	SCC		
Vod u kvaru	Tip kvara	Lokacija kvara	Proračun TS	broj = 1	vod - 2	k = 0.5	lokacija - 0.5
1	<b>21</b>	<b>0</b>	nestabilan	0.106s		0.136s	
1	<b>21</b>	<b>0.1</b>	nestabilan	0.135s		0.161s	
1	<b>21</b>	<b>0.2</b>	nestabilan	0.167s		0.182s	
1	<b>21</b>	<b>0.3</b>	nestabilan	0.210s		0.204s	
1	<b>21</b>	<b>0.4</b>	nestabilan	0.294s		0.226s	
1	<b>21</b>	<b>0.5</b>	nestabilan	stabilan		0.250s	
1	<b>21</b>	<b>0.6</b>	nestabilan	stabilan		stabilan	
1	<b>21</b>	<b>0.7</b>	nestabilan	stabilan		stabilan	
1	<b>21</b>	<b>0.8</b>	nestabilan	stabilan		stabilan	
1	<b>21</b>	<b>0.9</b>	nestabilan	stabilan		stabilan	
1	<b>21</b>	<b>1</b>	nestabilan	stabilan		stabilan	
1	<b>1</b>	<b>0</b>	nestabilan	stabilan		0.245s	
1	<b>1</b>	<b>0.1</b>	nestabilan	stabilan		stabilan	
1	<b>1</b>	<b>0.2</b>	nestabilan	stabilan		stabilan	
1	<b>1</b>	<b>0.3</b>	nestabilan	stabilan		stabilan	
1	<b>1</b>	<b>0.4</b>	nestabilan	stabilan		stabilan	
1	<b>1</b>	<b>0.5</b>	nestabilan	stabilan		stabilan	
1	<b>1</b>	<b>0.6</b>	nestabilan	stabilan		stabilan	
1	<b>1</b>	<b>0.7</b>	nestabilan	stabilan		stabilan	
1	<b>1</b>	<b>0.8</b>	nestabilan	stabilan		stabilan	
1	<b>1</b>	<b>0.9</b>	nestabilan	stabilan		stabilan	
1	<b>1</b>	<b>1</b>	nestabilan	stabilan		stabilan	

Dobijeni rezultati potvrđeni su metodom numeričke integracije. Na Slici 55 a) prikazane su promjena ugla  $\delta$  i promjena priraštaja brzine  $\Delta\omega$  za vrijeme isključenja kvara od 0.1s. Na Slikama 55 b) i 55 c) prikazani su rezultati proračuna nakon ugradnje jednog SVC uređaja i SCC uređaja na sredini voda V2 sa koeficijentom  $k = 0.24$  respektivno.

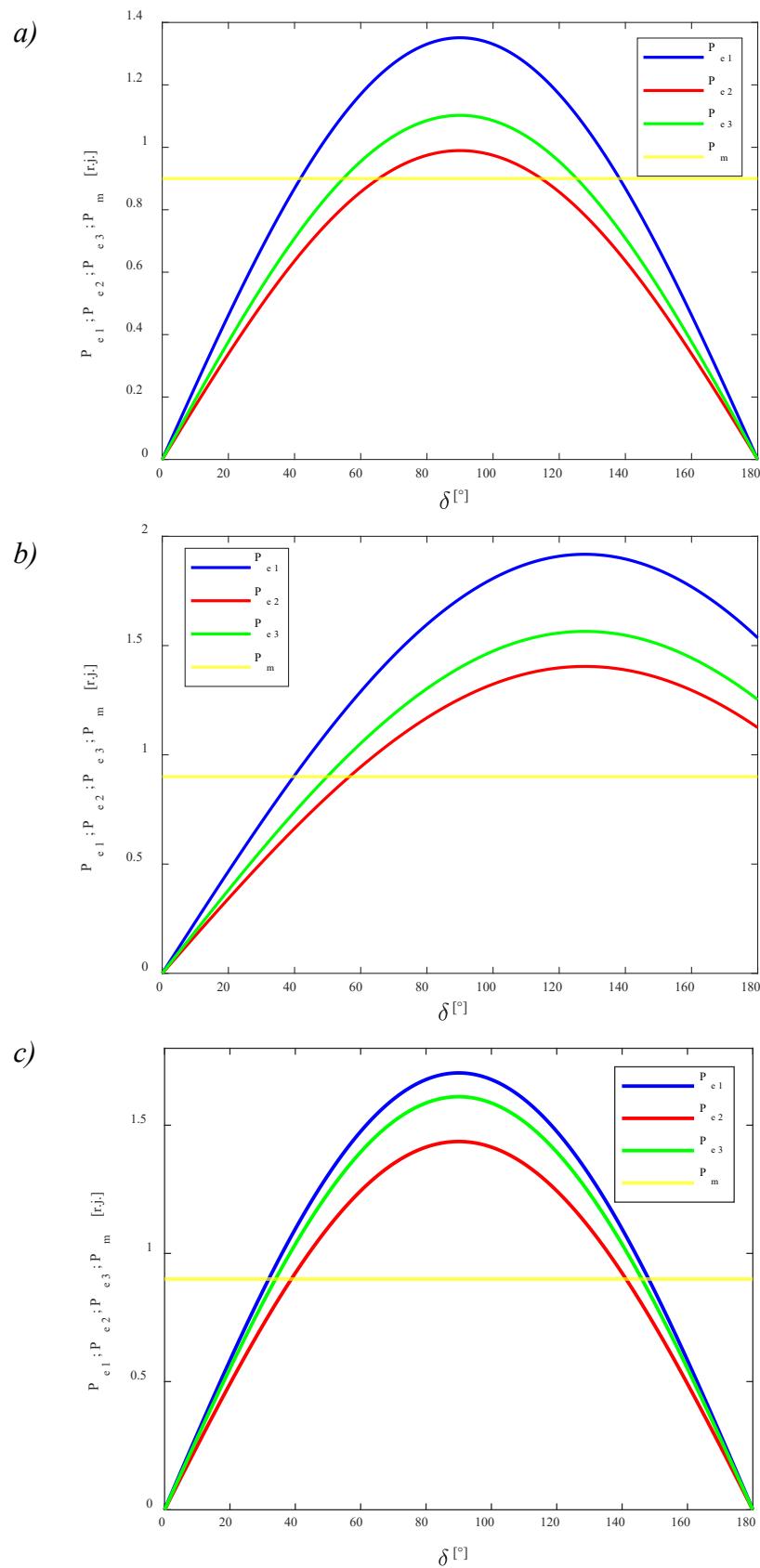


Slika 55. a) Metod numeričke integracije -1ks, V1,  $a = 0.9$  b) nakon ugradnje SVC uređaja c) nakon ugradnje SCC uređaja

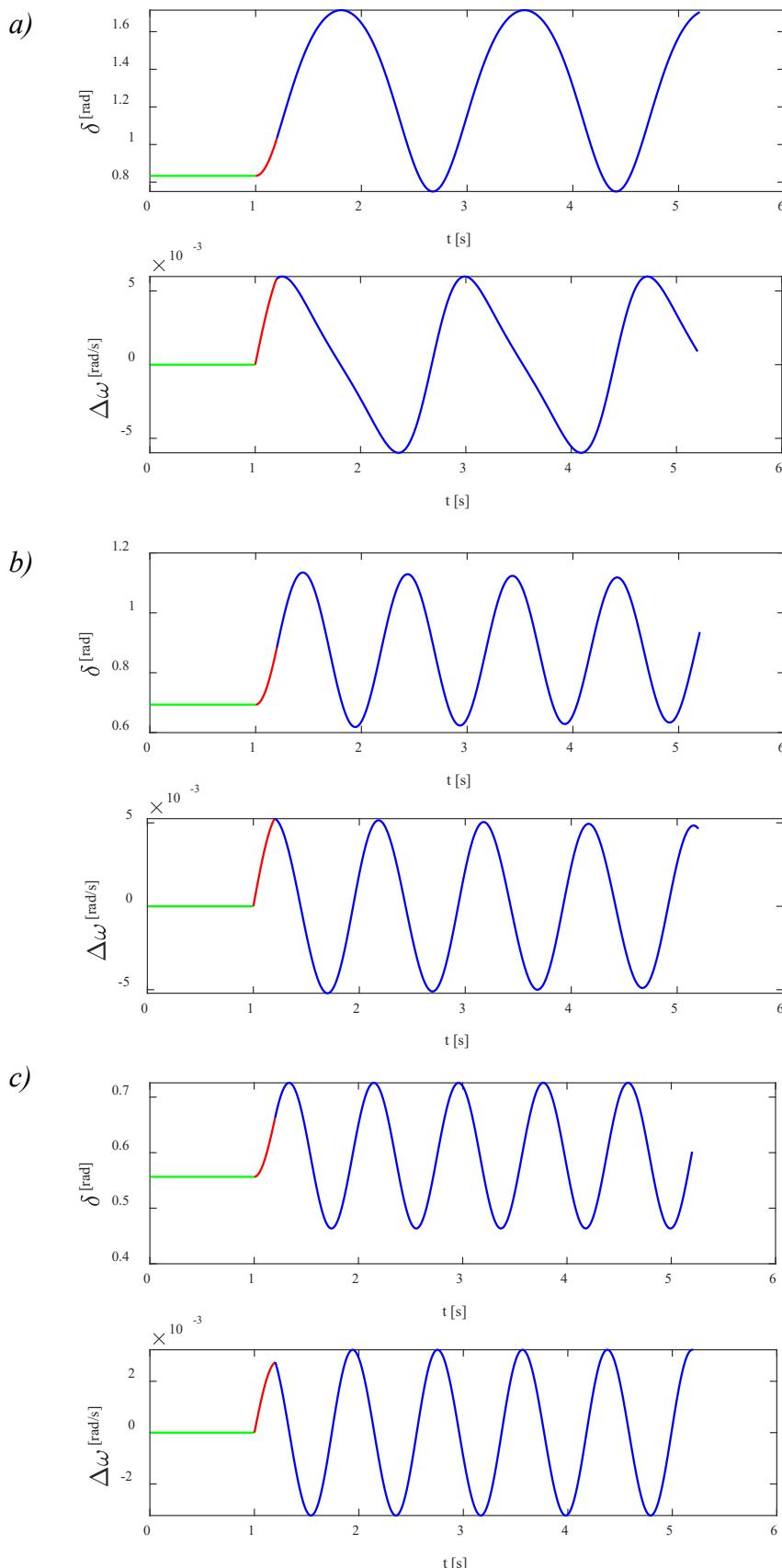
- *Vod u kvaru: V2, Tip kvara: 2ksz, Udaljenost mjesta kvara od početka voda: 0.5*

U daljoj analizi će se posmatrati slučaj inicijalno stabilnog sistema za vrijeme isključenja u iznosu  $t_{isk} = 0.266s$  (Slika 56 a)). Granice tranzijentne stabilnosti će biti uvećane individualnom ugradnjom i SVC-a i SCC-a. Konkretno, ugradnjom SVC-a granica stabilnosti će se povećati do te mjeru da vrijednost vremena isključenja nije od interesa za očuvanje stabilnosti (Slika 56 b)). Ugradnjom SCC u vod VI na razdaljini  $0.4 \cdot l_v$  od početka voda karakteristike  $k = 0.6$  postići će se isti rezultat (Slika 56 c)) kao i ugradnjom prethodno pomenutog uređaja. Tačnost rezultata potvrđena je i primjenom metoda numeričke integracije čiji su rezultati prikazani na Slici 57.

Generalizacija izvedenih zaključaka preko analize svih tipova kvarova na svim mogućim pozicijama urađena je metodom jednakih površina čiji su rezultati prikazani tabelarno (Tabela III i Tabela IV).



Slika 56. a) Metod jednakih površina -2ksz, V2,  $a = 0.5$  b) nakon ugradnje SVC uređaja c) nakon ugradnje SCC uređaja



Slika 57. a) Metod numeričke integracije -2ksz, V2,  $a = 0.5$  b) nakon ugradnje SVC uređaja c) nakon ugradnje SCC uređaja

Tabela III: Rezultati proračuna tranzijentne stabilnosti jednomašinskog sistema – 3ks i 2ks na vodu 2

INFORMACIJE O KVARU			REZULTATI	SVC	SCC		
Vod u kvaru	Tip kvara	Lokacija kvara	Proračun TS	broj = 1	vod - 1	k = 0.5	lokacija - 0.5
2	3	0	0.095s	0.224s		0.176s	
2	3	0.1	0.110s	0.256s		0.212s	
2	3	0.2	0.123s	0.283s		0.243s	
2	3	0.3	0.135s	0.308s		0.271s	
2	3	0.4	0.145s	0.332s		0.303s	
2	3	0.5	0.154s	0.358s		stabilan	
2	3	0.6	0.163s	stabilan		stabilan	
2	3	0.7	0.171s	stabilan		stabilan	
2	3	0.8	0.179s	stabilan		stabilan	
2	3	0.9	0.186s	stabilan		stabilan	
2	3	1	0.095s	0.224s		0.176s	
2	2	0	0.145s	0.333s		0.244s	
2	2	0.1	0.177s	stabilan		stabilan	
2	2	0.2	0.210s	stabilan		stabilan	
2	2	0.3	0.248s	stabilan		stabilan	
2	2	0.4	stabilan	stabilan		stabilan	
2	2	0.5	stabilan	stabilan		stabilan	
2	2	0.6	stabilan	stabilan		stabilan	
2	2	0.7	stabilan	stabilan		stabilan	
2	2	0.8	stabilan	stabilan		stabilan	
2	2	0.9	stabilan	stabilan		stabilan	
2	2	1	stabilan	stabilan		stabilan	

Tabela IV: Rezultati proračuna tranzijentne stabilnosti jednomašinskog sistema – 2ksz i 1ks na vodu I

INFORMACIJE O KVARU			REZULTATI	SVC	SCC		
Vod u kvaru	Tip kvara	Lokacija kvara	Proračun TS	broj = 1	vod - 2	k = 0.5	lokacija - 0.5
2	21	0	0.116s	0.267s		0.209s	
2	21	0.1	0.149s	0.343s		0.275s	
2	21	0.2	0.176s	stabilan		stabilan	
2	21	0.3	0.203s	stabilan		stabilan	
2	21	0.4	0.232s	stabilan		stabilan	
2	21	0.5	0.266s	stabilan		stabilan	
2	21	0.6	stabilan	stabilan		stabilan	
2	21	0.7	stabilan	stabilan		stabilan	
2	21	0.8	stabilan	stabilan		stabilan	
2	21	0.9	stabilan	stabilan		stabilan	
2	21	1	stabilan	stabilan		stabilan	
2	1	0	0.182s	stabilan		stabilan	
2	1	0.1	stabilan	stabilan		stabilan	
2	1	0.2	stabilan	stabilan		stabilan	
2	1	0.3	stabilan	stabilan		stabilan	
2	1	0.4	stabilan	stabilan		stabilan	
2	1	0.5	stabilan	stabilan		stabilan	
2	1	0.6	stabilan	stabilan		stabilan	
2	1	0.7	stabilan	stabilan		stabilan	
2	1	0.8	stabilan	stabilan		stabilan	
2	1	0.9	stabilan	stabilan		stabilan	
2	1	1	stabilan	stabilan		stabilan	

## 5.2. Rezultati simulacije – višemašinski sistem

U nastavku biće prikazan uticaj SCC i STATCOM uređaja na primjeru IEEE sistema od 11 i 30 čvorova. Prvobitna lokacija i dimenzionisanje pomenutih uređaja određeno je korišćenjem genetskog algoritma (eng. *Genetic Algorithm* – GA) pri čemu je za kriterijumsku funkciju uzeta minimizacija aktivnih gubitaka u mreži. Genetski algoritmi je algoritam pretraživanja zasnovan na ideji prirodne selekcije i genetike koji se koristi za generisanje visokokvalitetnih rješenja za probleme optimizacije i probleme pretrage. Jednopolna šema, podaci o mreži i čvorovima za razmatrane testne mreže izloženi su u Prilogu 2 i Prilogu 3 [83 - 84].

Prilikom simulacije uzete su u obzir sljedeće pretpostavke:

- Dozvoljena vrijednost napona sabirnica kreće se u opsegu od 0.95 *r.j.* do 1.1 *r.j.*,
- Za balansni čvor odabrana je sabirnica 1 IEEE sistema od 11 i 30 čvorova,
- Nivo kompenzacije reaktanse SCC uređaja iznosi 80%,
- Nije moguće ugraditi više SCC uređaja u istu granu,
- Nije moguće ugraditi SCC uređaj u granu u kojoj se nalazi transformator,
- Maksimalna vrijednost injektiranja STATCOM uređaja u primjeru manjeg sistema iznosi iznosi 50 *MVar*, a za veći 300 *MVar*, dok se induktivni režim rada neće razmatrati,
- Nije moguće ugraditi više STATCOM uređaja u istu sabirnicu,
- Nije moguće ugraditi STATCOM uređaj u sabirnicu u kojoj se nalazi generator,
- Vrijednost vremena APU iznosi 0.2s.

### 5.2.1. Optimalna alokacija i dimenzionisanje FACTS uređaja

Genetski algoritam je metaheuristička optimizaciona metoda iterativnog karaktera zasnovana na principima evolucije i genetike. Karakterističan pojam koji se vezuje za ovu optimizacionu tehniku predstavlja populacija (eng. *population*) [70]. Ona govori o tome da GA ne radi samo sa jednim rješenjem već sa grupom rješenja, odnosno populacijom. Svako pojedinačno rješenje unutar populacije se naziva jedinka (eng. *individual*). Kvalitet svake jedinke odnosno kvalitet svakog rješenja određen je njemu odgovarajućom vrijednošću kriterijumske funkcije (eng. *fitness function*) koja se koristi za poređenje dobijenih rješenja. Svaka jedinka unutar populacije se najčešće predstavlja kao niz binarnih vrijednosti i nosi naziv hromozom.

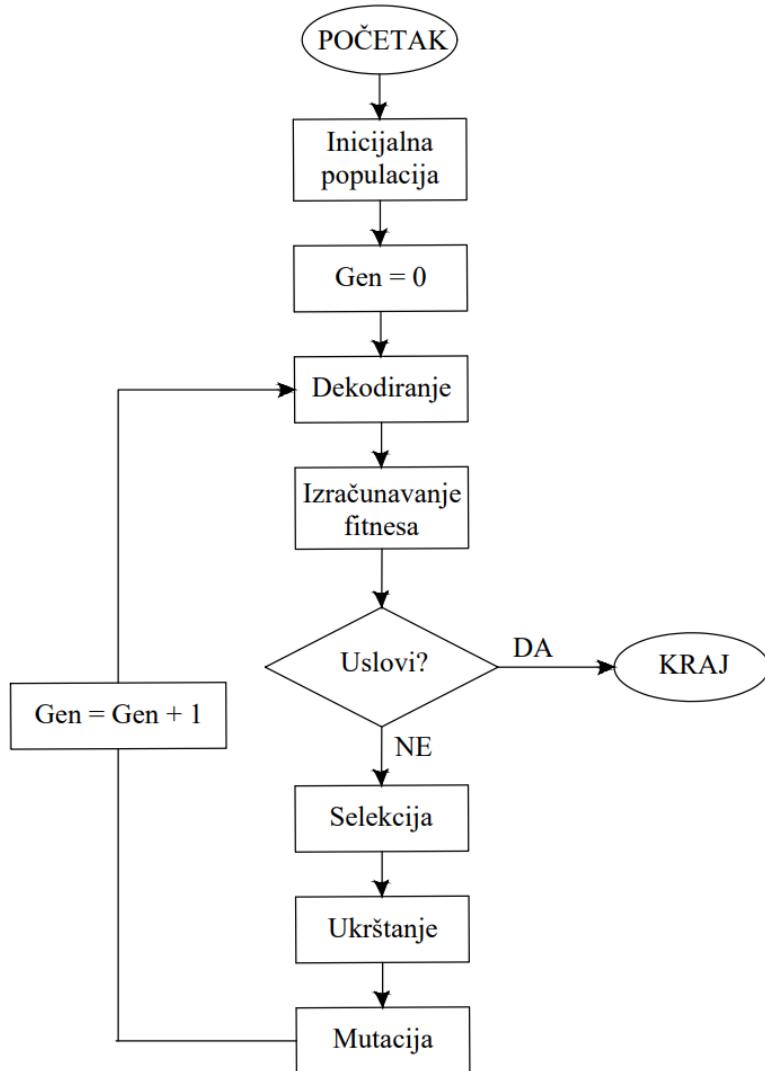
Svaka optimizacija pomoću genetskog algoritma počinje generisanjem nasumične populacije odnosno nasumičnog skupa rješenja. Nakon toga se za svako pojedinačno rješenje vrši evaluacija kriterijumske funkcije. U cilju sukcesivnog dobijanja boljih rješenja primjenjuju se sledeći operatori navedenim redosledom [71]:

- Selekcija – prvi operator koji se primjenjuje nad populacijom. Pomoću njega se vrši odabir dobrih hromozoma koji će predstavljati osnovu (roditelje) za hromozome naredne iteracije. Odabir ovih jedinki vrši se na osnovu vrijednosti kriterijumske funkcije koja im odgovara a pored mnogobrojnih metoda za samu realizaciju ovog postupka najčešće su u primjeni turnirska, ruletska i rang selekcija [72].
- Ukrštanje – operator koji se primjenjuje nad hromozomima odabrаниm u procesu selekcije. Prema slučajnom izboru biraju se dva hromozoma koji razmjenjuju svoje gene. Kod ukrštanja u jednoj tački hromozomi se presijecaju na određenom mjestu i nakon toga dva hromozoma zamjenjuju dijelove desno od tačke presijecanja. U slučaju ukrštanja u dvije tačke zamjenjuju se dijelovi hromozoma između te dvije tačke. Izbor tačaka presijecanja takođe podliježe slučajnom izboru. Ovaj operator predstavlja pravi primjer nasumičnog pretraživanja prostora sa ciljem dobijanja optimalnog rješenja.
- Mutacija – nasumično mijenjanje malog dijela hromozoma sa malom vjerovatnoćom mutacije sa ciljem održavanja raznovrsnosti populacije.

Dok primjena ukrštanja i mutacije ne garantuje izbor najboljeg rješenja za to je zadužen operator selekcije. Jedna iteracija primjene operatora selekcije, ukrštanja i mutacije naziva se generacija.

Kao kriterijum zaustavljanja optimizacije može da se koristi upravo dostignut ograničen broj generacija ali i pronalazak rješenja koje zadovoljava unaprijed definisani prag tolerancije kriterijumske funkcije kao i mala promjena kriterijumske funkcije kroz generacije.

Dobra strana genetskog algoritma je mogućnost njegove primjene za rješavanje raznovrsnih problema koje karakteriše veliki broj optimizacionih varijabli i upotreba populacije jedinki koja omogućava pronalaženje globalnih optimalnih rješenja i sprečava pojavu lokalnih minimuma. Potencijalni nedostaci primjene GA su njegova sporost kod složenih problema sa velikim brojem varijabli koji iziskuju veliki broj generacija za pronađenje optimalnog rješenja i velika zavisnost krajnjeg rješenja od veličine populacije, vjerovatnoće mutacije i ukrštanja koje zahtijevaju fino podešavanje u zavisnosti od tipa problema. Na Slici 58 prikazan je dijagram toka naprijed objašnjenog genetskog algoritma.



Slika 58. Dijagram toka GA

Maksimalan broj STATCOM uređaja ograničen je na 2 za test sistem od 11 čvorova, odnosno 3 za sistem od 30 čvorova, zbog dimenzija samih sistema. Maksimalan broj SCC uređaja za IEEE sistem od 11 odnosno 30 čvorova jeste 2 i 3 respektivno.

Rezultati primjene optimizacionog metoda za IEEE sistem od 11 čvorova dati su u Tabeli V u kojoj je prikazan individualni uticaj FACTS uređaja i u Tabeli VI u kojoj je prikazan koordinisani uticaj SCC i STATCOM uređaja. Kako vrijednost aktivnih gubitaka u ovom sistemu prije ugradnje FACTS uređaja iznosi 0.0664 [r.j.] jasno je da je njihova ugradnja omogućila smanjenje aktivnih gubitaka.

*Tabela V: Rezultati optimalne alokacije i dimenzionisanja SCC i STATCOM uređaja – IEEE sistem od 11 čvorova*

Alokacija i dimenzionisanje SCC uređaja			
Broj	Lokacija (grana)	$k$	$P_{gub}$ [r.j.]
1	12	0.43	0.0656
2	12, 10	0.5, 0.8	0.0652
Alokacija i dimenzionisanje STATCOM uređaja			
Broj	Lokacija (sabirnica)	$Q_{STATCOM}$ [r.j.]	$P_{gub}$ [r.j.]
1	9	0.5	0.0601
2	9,6	0.5, 0.5	0.0549

*Tabela VI: Rezultati optimalne koordinisane alokacije i dimenzionisanja SCC i STATCOM uređaja – IEEE sistem od 11 čvorova*

Alokacija i dimenzionisanje SCC i STATCOM uređaja						
Broj SCC	Broj STATCOM	Lokacija (grana)	Lokacija (sabirnica)	$k$	$Q_{STATCOM}$ [r.j.]	$P_{gub}$ [r.j.]
1	1	9	12	0.35	0.5	0.0597

U slučaju IEEE sistema od 30 čvorova optimalna individualna i koordinisana alokacija i dimenzionisanje SCC i STATCOM uređaja dati su u Tabeli VII i Tabeli VIII, respektivno. Vrijednost aktivnih gubitaka bez ugradnje FACTS uređaja iznosi 0.0548 [r.j.].

*Tabela VII: Rezultati optimalne alokacije i dimenzionisanja SCC i STATCOM uređaja – IEEE sistem od 30 čvorova*

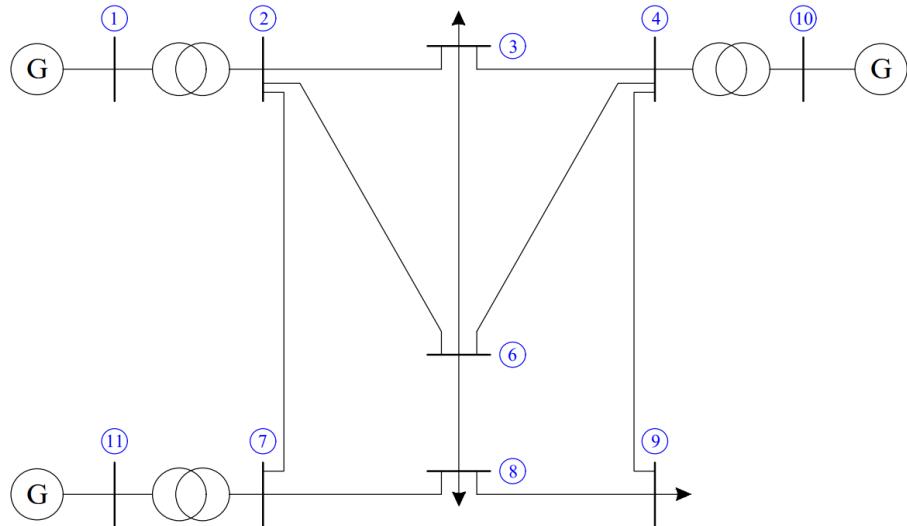
Alokacija i dimenzionisanje SCC uređaja			
Broj	Lokacija (grana)	$k$	$P_{gub}$ [r.j.]
1	13	0.8	0.0538
2	13, 5	0.8, 0.15	0.0536
3	13, 5, 14	0.77, 0.26, 0.48	0.0535
Alokacija i dimenzionisanje STATCOM uređaja			
Broj	Lokacija (sabirnica)	$Q_{STATCOM}$ [r.j.]	$P_{gub}$ [r.j.]
1	9	0.5	0.0537
2	10, 12	0.5, 0.5	0.0544
3	15, 28, 12	0.55, 0.64, 0.54	0.0715

*Tabela VIII: Rezultati optimalne koordinisane alokacije i dimenzionisanja SCC i STATCOM uređaja – IEEE sistem od 30 čvorova*

Alokacija i dimenzionisanje SCC i STATCOM uređaja						
Broj SCC	Broj STATCOM	Lokacija (grana)	Lokacija (sabirnica)	$k$	$Q_{STATCOM}$ [r.j.]	$P_{gub}$ [r.j.]
1	1	5	9	0.2	0.5	0.0535
2	1	5, 2	9	0.24, 0.25	0.5	0.0532
1	2	2	10, 12	0.2	0.5, 0.5	0.0542
2	2	16, 25	10, 12	0.8, 0.22	0.5, 0.5	0.0542
3	1	25, 14, 13	13	0.3, 0.4, 0.8	3	0.0537
3	2	35, 28, 6	24, 6	0.1, 0.1, 0.3	0.6, 2	0.0962
1	3	22	17, 6, 3	0.66	0.7, 0.8, 1.2	0.0916

### 5.2.2. Rezultati simulacije – IEEE sistem od 11 čvorova

Jednopolna šema IEEE sistema od 11 čvorova data je na Slici 59. Ovaj sistem se sastoji od 3 generatora koji se nalaze u čvorovima 1, 10 i 11 pri čemu je generator u čvoru 1 balansni. Kako bi se procijenila tranzijentna stabilnost ovog sistema potrebno je odrediti krive  $\delta(t)$  za svaki generator u sistemu primjenom metoda opisanog u poglavlju 2.4.1. Ukoliko je promjena ugla  $\delta$  makar jednog generatora rastuća funkcija u vremenu sistem je nestabilan.

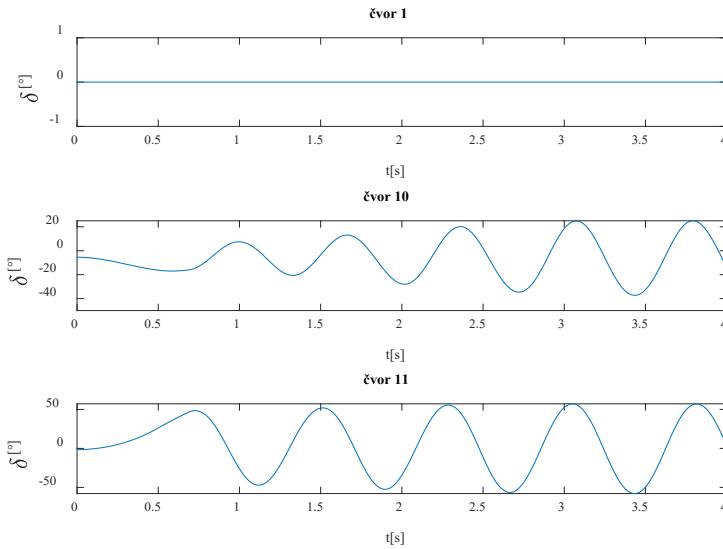


Slika 59. Jednopolna šema IEEE sistema od 11 čvorova

- Čvor pogoden kvarom: 7, Vod pogoden kvarom: 7 – 8, Vrijeme trajanja isključenja voda u kvaru: 0.5s

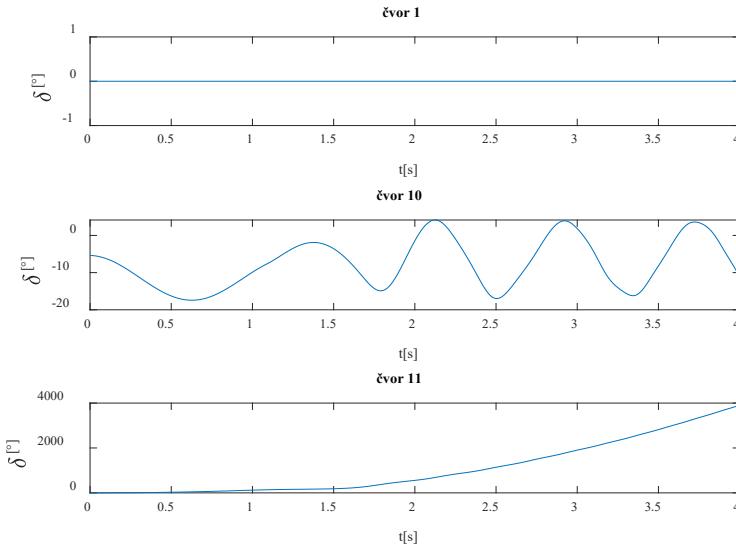
Ukoliko je došlo do tropolnog kratkog spoja u blizini čvora 7, na vodu 7-8 (grana 12) pri uslovima vremena trajanja isključenja voda od 0.5s i automatskog ponovnog uključenja od 0.2s sistem bi bio u stanju da očuva tranzijentnu stabilnost i bez ugradnje dodatnih FACTS uređaja (Slika 60). Međutim kada bi se vrijeme isključenja voda povećalo na 0.9s generator u čvoru 11 bi ispaо iz

sinhronizma što bi dovelo do tranzijentne nestabilnosti EES (Slika 61). Stoga je u ovom slučaju potrebno uvesti dodatne mjere kako bi se očuvala tranzijentna stabilnost.



Slika 60. Krive  $\delta(t)$  generatora IEEE sistem od 11 čvorova – čvor 7, vod 7-8, vrijeme isključenja voda 0.5s

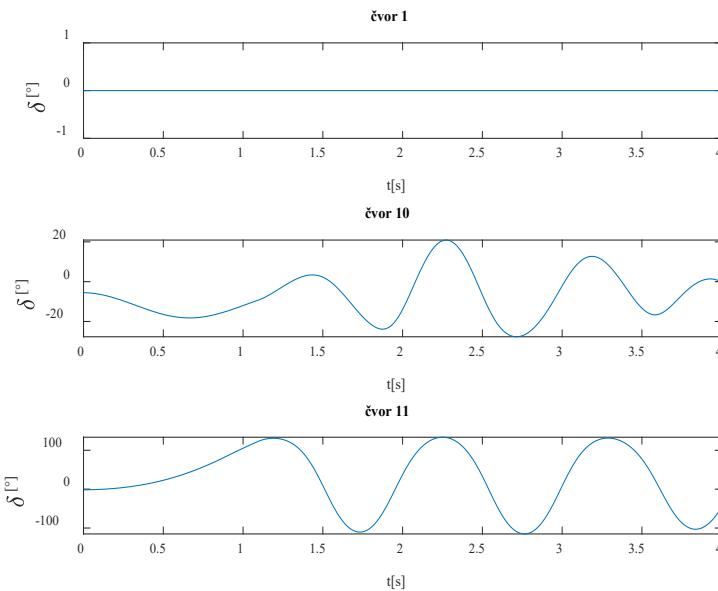
- Čvor pogoden kvarom: 7, Vod pogoden kvarom: 7 – 8, Vrijeme trajanja isključenja voda u kvaru: 0.9s



Slika 61. Krive  $\delta(t)$  generatora IEEE sistem od 11 čvorova – čvor 7, vod 7-8, vrijeme isključenja voda 0.9s

- Ugradnja SCC uređaja

Ako se pri prethodnim uslovima poremećaja ugradi jedan SCC u grani 12 (grana između čvorova 7 i 8), čija je lokacija i podešenje određeno korišćenjem optimizacionog metoda opisanog u poglavlju 5.2.1, generator u čvoru 11 će biti u mogućnosti da očuva sinhronizam (Slika 62).

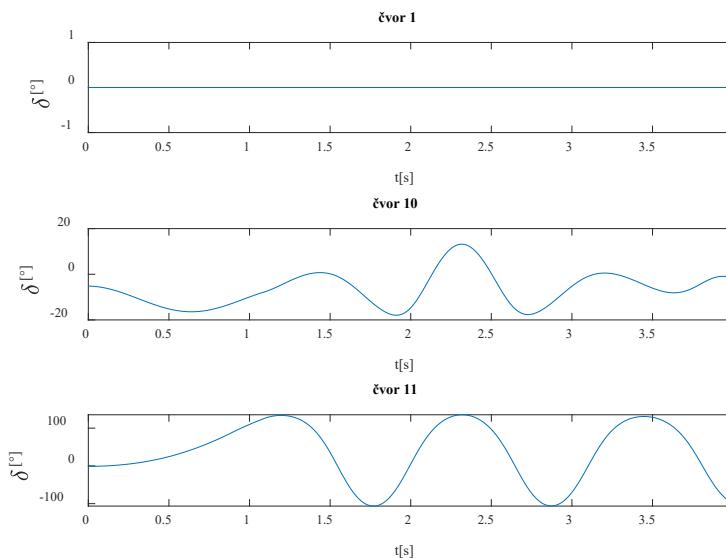


Slika 62. Krive  $\delta(t)$  generatora IEEE sistem od 11 čvorova – čvor 7, vod 7-8, vrijeme isključenja voda 0.9s – Ugradnja SCC uređaja u granu 12,  $k=0.43$

- *Ugradnja STATCOM uređaja*

Kada bi u IEEE sistem od 11 čvorova bio ugrađen STATCOM uređaj čija su lokacija i snaga kao i u slučaju SCC uređaja određeni korišćenjem genetskog algoritma sistem bi za inicijalni poremećaj takođe bio u stanju da očuva tranzijentnu stabilnost (Slika 63).

Zaključuje se da je individualna ugradnja ovih uređaja, pored pozitivnog dejstva na aktivne gubitke u sistemu, omogućila i održavanje tranzijentne stabilnosti pri scenariju u kojem to bez njihove prethodne ugradnje ne bi bilo moguće.

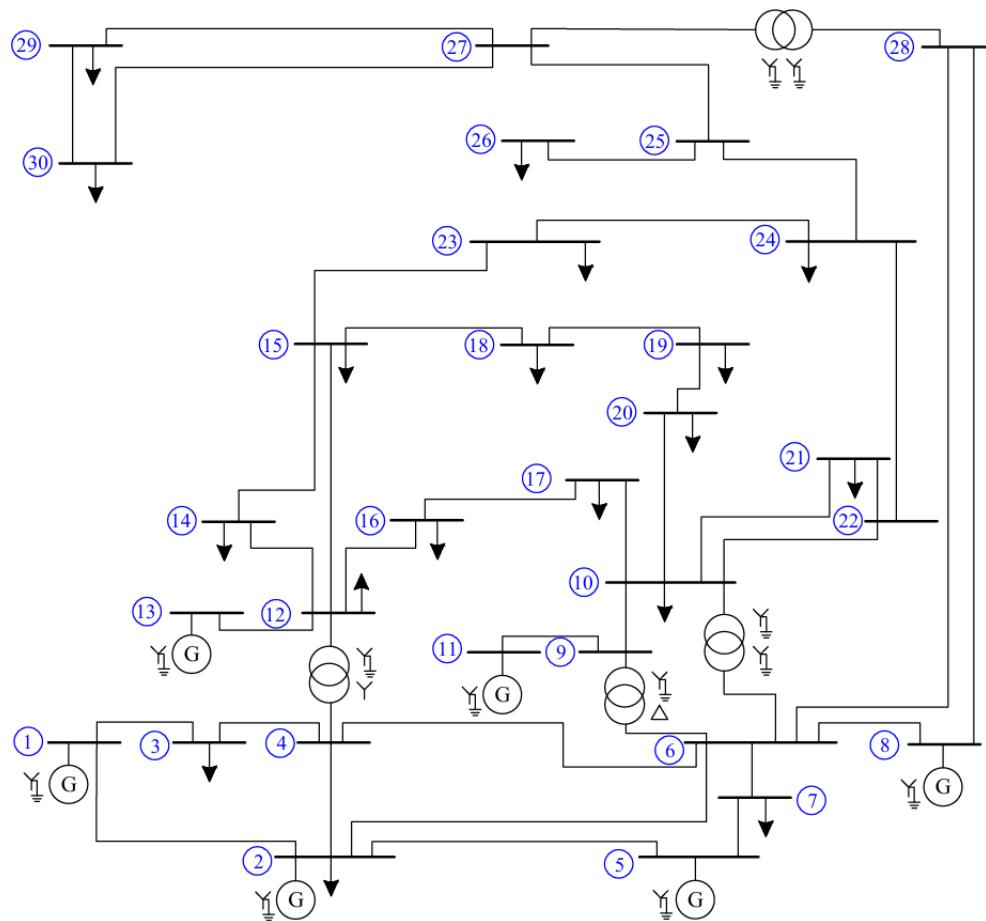


Slika 63. Krive  $\delta(t)$  generatora IEEE sistem od 11 čvorova – čvor 7, vod 7-8, vrijeme isključenja voda 0.9s – Ugradnja STATCOM uređaja u sabirnicu 9,  $Q_{STATCOM} = 0.5$  [r.j.]

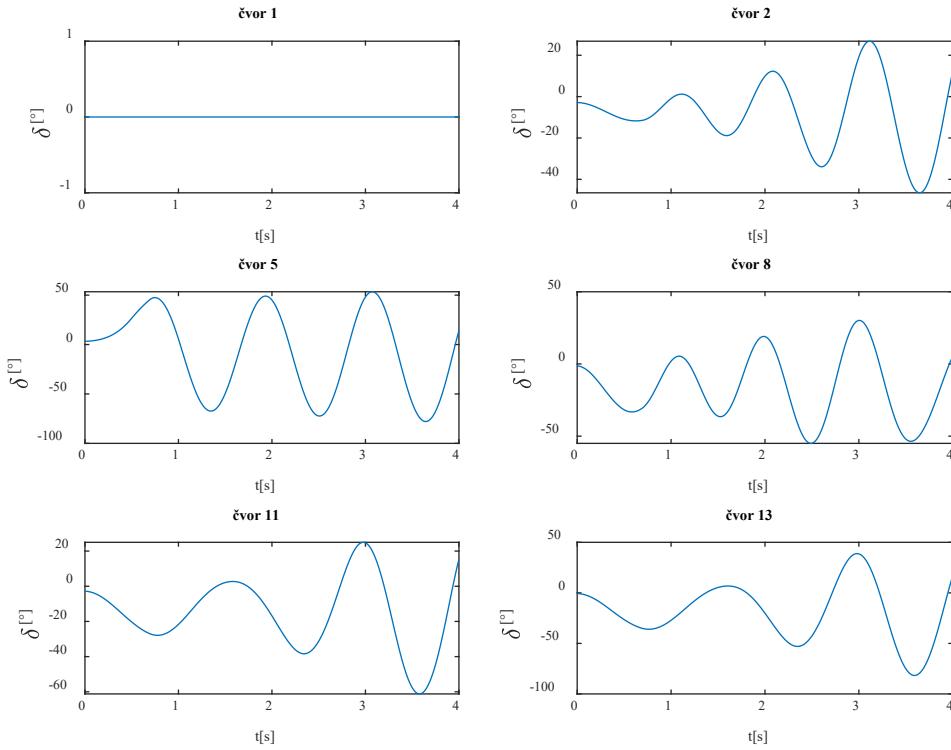
### 5.2.3. Rezultati simulacije – IEEE sistem od 30 čvorova

- Čvor pogodjen kvarom: 5, Vod pogodjen kvarom: 5 – 2

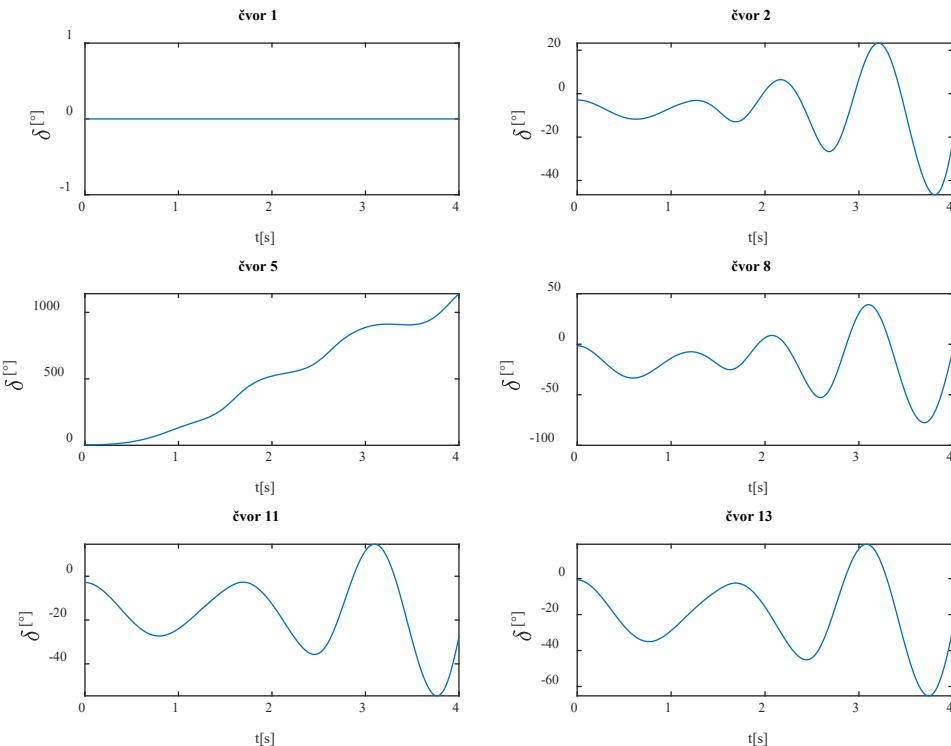
Slično kao i za sistem od 11 čvorova, u ovom dijelu će validnost predloženog algoritma biti testirana na većem sistemu od 30 čvorova čija je jednopolna šema prikazana na Slici 64. Za slučaj ovog sistema posmatraće se kvar na dalekovodu 5-2 u blizini čvora 5. Čvor 5 je generatorski čvor, pa će uticaj kvara biti izraženiji na ponasanje istog. Vod u kvaru isključuje se prvo za  $0.5s$ , a nakon toga za  $0.9s$ . Krive  $\delta(t)$  generatora u sistemu za oba slučaja prikazane su na Slici 65 i Slici 66 respektivno sa kojih se uočava da za vrijeme  $0.5s$  sistem ostaje stabilan, a za vrijeme  $0.9s$  generator u čvoru 5 isпада iz sinhronizma.



Slika 64. Jednopolna šema IEEE sistema od 30 čvorova



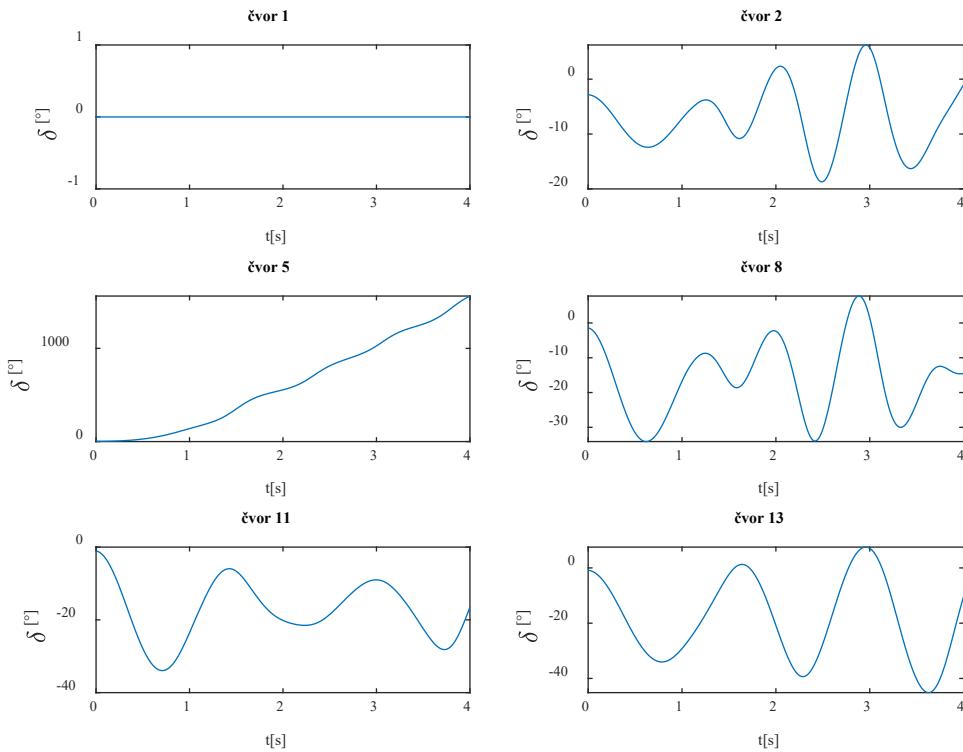
Slika 65. Krive  $\delta(t)$  generatora IEEE sistem od 30 čvorova – čvor 5, vod 5-2, vrijeme isključenja voda 0.5s



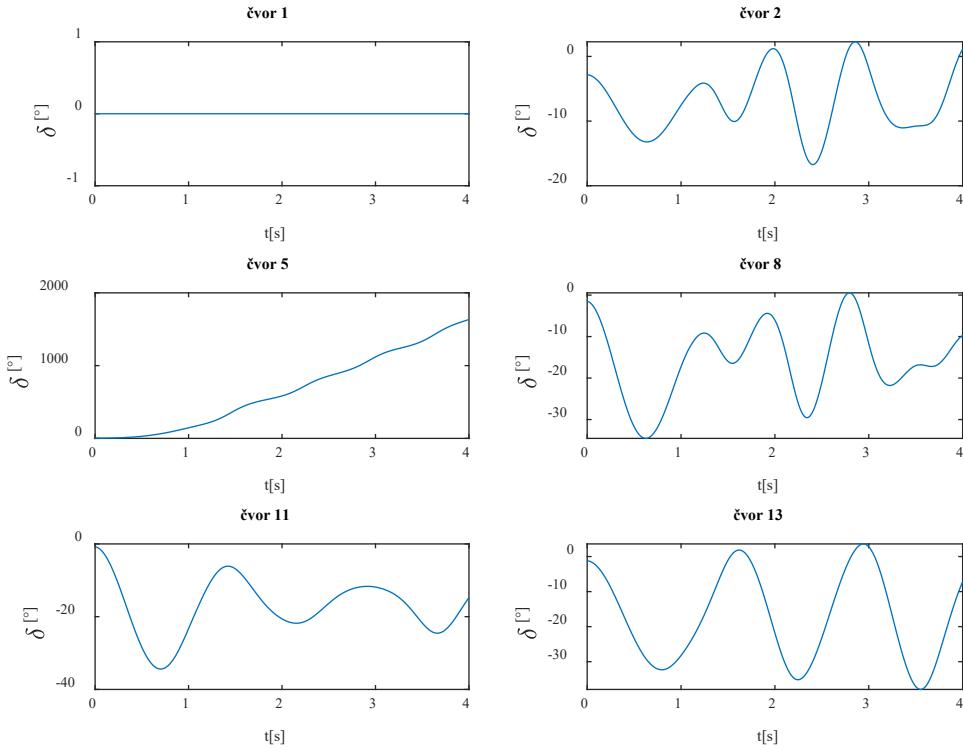
Slika 66. Krive  $\delta(t)$  generatora IEEE sistem od 30 čvorova – čvor 5, vod 5-2, vrijeme isključenja voda 0.9s

- *Ugradnja SCC uređaja*

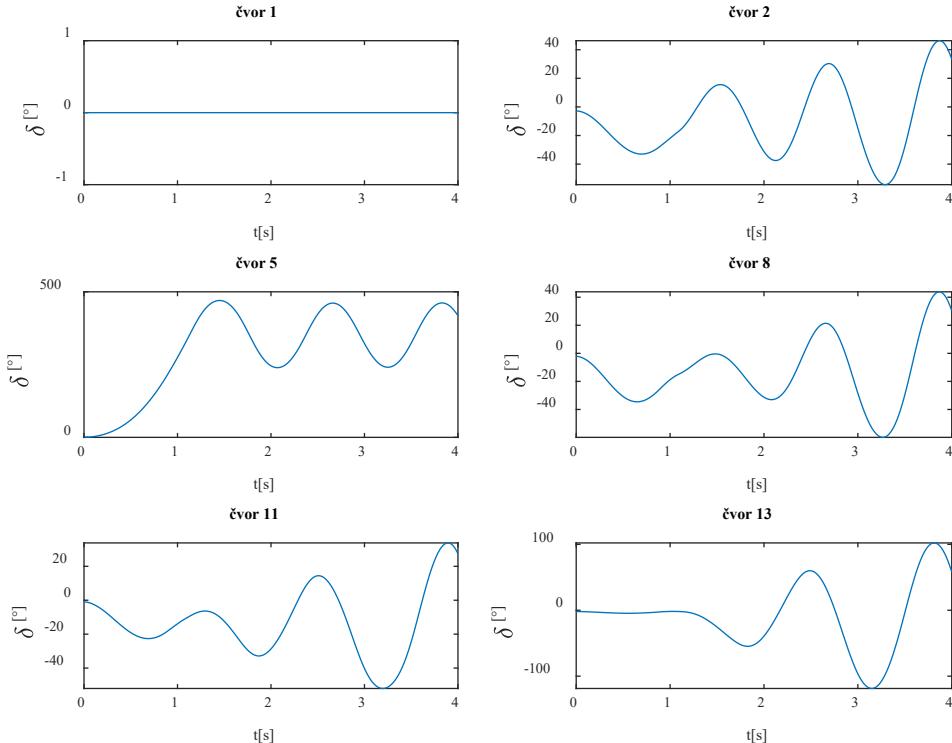
Ugradnjom dva, odnosno tri SCC uređaja, koristeći lokacije i podešavanja date u Tabeli VII, dobijaju se rezultati prikazani na Slici 67 i Slici 68 respektivno. Primjećuje se da, iako je sa stanovišta minimizacije aktivnih gubitaka ovo optimalan scenario (0.0536 [r.j.] za ugrađena dva SCC uređaja, 0.0535 [r.j.] za ugrađena tri SCC uređaja), isti u konkretnom primjeru ne bi pospješio očuvanje tranzijentne stabilnosti generatora u čvoru 5. Čak i ako bi se stepen kompenzacije tri već ugrađena SCC uređaja podigao na maksimalnu moguću vrijednost (80%), očuvanje tranzijentne stabilnosti sistema ne bi bilo omogućeno. Prethodno je prikazano na Slici 69 sa koje se vidi da ugao rotora u čvoru 5 značajno izlazi iz dozvoljenog opsega.



*Slika 67. Krive  $\delta(t)$  generatora IEEE sistem od 30 čvorova – čvor 5, vod 5-2, vrijeme isključenja voda 0.9s – Ugradnja SCC uređaja u grane 13 ( $k=0.8$ ), 5 ( $k=0.15$ )*



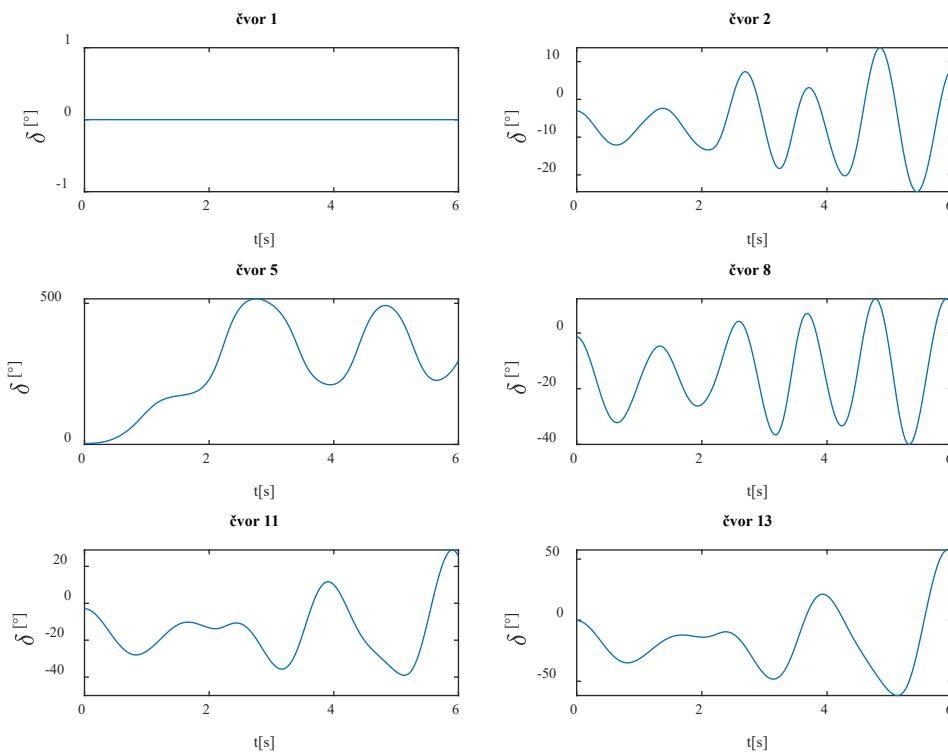
Slika 68. Krive  $\delta(t)$  generatora IEEE sistem od 30 čvorova – čvor 5, vod 5-2, vrijeme isključenja voda 0.9s – Ugradnja SCC uređaja u grane 13 ( $k=0.77$ ), 5 ( $k=0.26$ ), 14 ( $k=0.48$ )



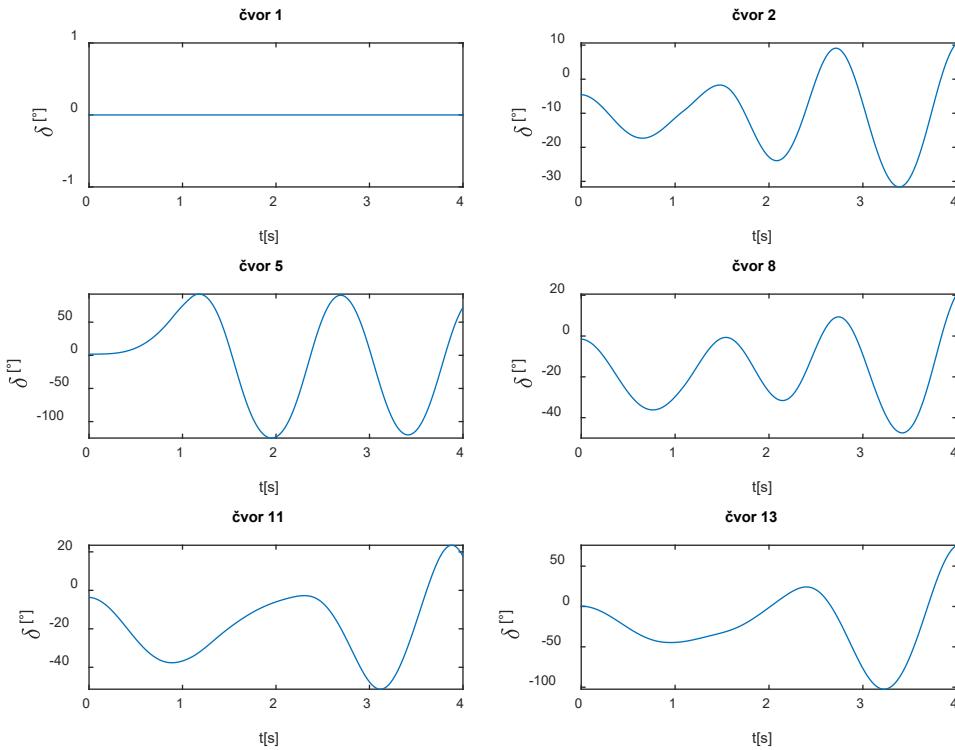
Slika 69. Krive  $\delta(t)$  generatora IEEE sistem od 30 čvorova – čvor 5, vod 5-2, vrijeme isključenja voda 0.9s – Ugradnja SCC uređaja u grane 13 ( $k=0.8$ ), 5 ( $k=0.8$ ), 14 ( $k=0.8$ )

- *Ugradnja STATCOM uređaja*

Kada je u pitanju pojedinačna alokacija STATCOM uređaja, prateći podešenja i lokacije dobijene upotrebnom GA a na osnovu minimizacije ukupnih aktivnih gubitaka dobija se situacija prikazana na Slici 70. Sa ovih grafika se može zaključiti da vrijednost ugla rotora generatora u čvoru 5 u značajnoj mjeri izlazi iz dozvoljenog opsega rada što rezultatira tranzijentnom nestabilnošću sistema za razmatrani slučaj. Međutim, ako se zadrže lokacije dobijene korišćenjem optimizacione tehnike, a vrijednost injektiranja svih STATCOM uređaja povećava sa korakom 0.1 zaključuje se da ovako alocirani uređaji uspijevaju da očuvaju tranzijentnu stabilnost za vrijednost injektiranja 1.9 [r.j.] (Slika 71). Uzimajući u obzir da su lokacije uređaja odredjene korišćenjem genetskog algoritma, a da injektiranja istih nijesu proizvod tog proračuna dolazi se do zaključka da ovakvo podešenje ne predstavlja optimalno rešenje sa stanovišta gubitaka.



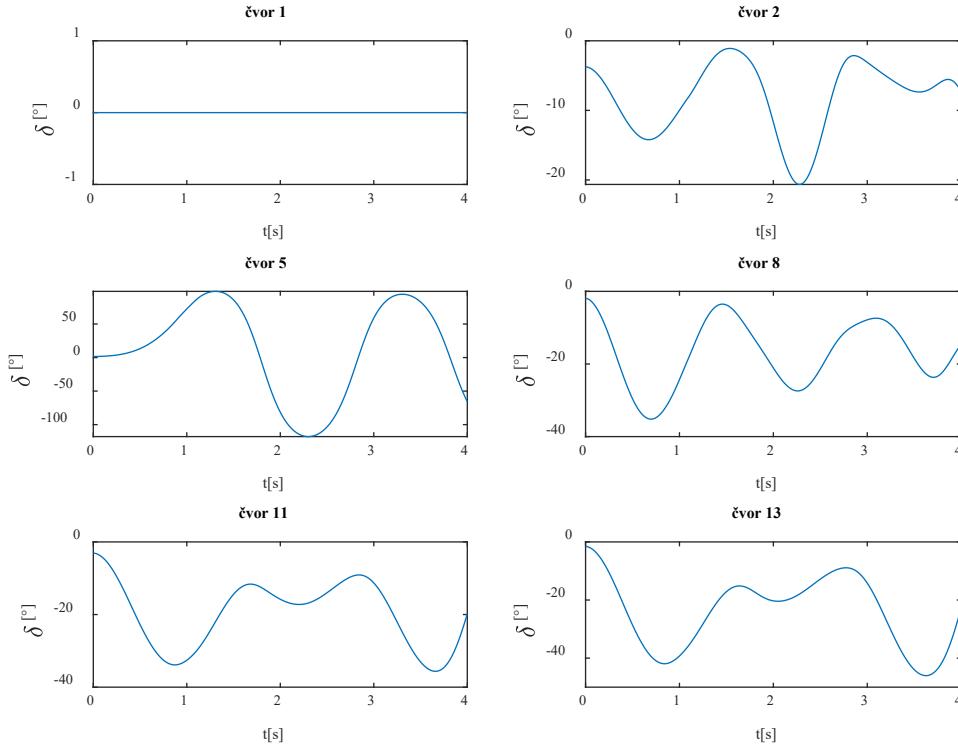
Slika 70. Krive  $\delta(t)$  generatora IEEE sistem od 30 čvorova – čvor 5, vod 5-2, vrijeme isključenja voda 0.9s – Ugradnja STATCOM uređaja u sabirnice 15 ( $Q_{STATCOM}=0.55$ [r.j.]), 28( $Q_{STATCOM}=0.64$ [r.j.]), 12 ( $Q_{STATCOM}=0.54$  [r.j.])



Slika 71. Krive  $\delta(t)$  generatora IEEE sistem od 30 čvorova – čvor 5, vod 5-2, vrijeme isključenja voda 0.9s –Ugradnja STATCOM uređaja u sabirnice 15 ( $Q_{STATCOM} = 1.9$  [r.j.]), 28( $Q_{STATCOM} = 1.9$  [r.j.]), 12 ( $Q_{STATCOM} = 1.9$  [r.j.]])

- Ugradnja SCC i STATCOM uređaja

Za razliku od pojedinačne alokacije SCC i STATCOM uređaja, njihova koordinisana ugradnja i to odabirom tri STATCOM uređaja i jednim SCC uređajem ima pozitivno dejstvo na tranzijentnu stabilnost vodeći se lokacijama i podešenjima dobijem korišćenjem GA (Slika 72). Ovakav način ugradnje će rezultirati gubicima koji su veći od onih u slučaju nekompenzovanog sistema ali najmanji za datu situaciju, što je cijena koja se mora platiti za stabilan i pouzdan EES.



Slika 72. Krive  $\delta(t)$  generatora IEEE sistem od 30 čvorova – čvor 5, vod 5-2, vrijeme isključenja voda 0.9s – Ugradnja SCC uređaja u granu 22 ( $k=0.66$ ) i STATCOM uređaja u sabirnice 17 ( $Q_{STATCOM} = 0.7$  [r.j.]), 6 ( $Q_{STATCOM} = 0.8$  [r.j.]) i 3 ( $Q_{STATCOM} = 1.2$  [r.j.]))

## 7. ZAKLJUČAK

Savremeni EES suočavaju se sa konstantnim povećanjem konzuma koji dovodi do velikog naprezanja prenosnih vodova i povećanja gubitaka u sistemu. Takođe, ekspanzija upotrebe električne energije u svim sferama života dovodi do rapidnog rasta zahtjeva za povećanjem kvaliteta i pouzdanosti napajanja. Održavanje tranzijentne stabilnosti predstavlja jedan od glavnih parametara kako planiranja, tako i analize eksploatacije EES, a sve u cilju obezbjeđivanja pouzdane isporuke električne energije.

U ovom radu prikazano je rješavanje problema optimalne pojedinačne, odnosno koordinisane, alokacije i dimenzionisanja odabranih FACTS uređaja u prenosnoj mreži. Kao glavni cilj razvijenog algoritma nametnuto je očuvanje tranzijentne stabilnosti sistema. Prethodno je urađeno na način da alokacija i podešenje odabranih uređaja uvažavaju još jedan važan pokazatelj efikasnosti funkcionisanja svakog sistema, a to su ukupni aktivni gubici u sistemu, odnosno njihova minimizacija. Od predstavnika FACTS uređaja, razmatrani su, u slučaju jednomašinskog sistema koji je služio kao pokazni sistem za demonstraciju metoda za proračun tranzijentne stabilnosti, SCC i SVC, odnosno SCC i STATCOM u primjeru višemašinskog sistema. Predloženo je da se optimizacioni problem formuliše korišćenjem GA.

Problem je realizovan razvojem MATLAB koda nakon čega je isti pretočen u *website* u cilju razvoja prikladnog okruženja koje će krajnjim korisnicima omogućiti jednostavan i brz način procjene tranzijentne stabilnosti nakon kratkih spojeva prije i nakon ugradnje FACTS uređaja. Validnost predloženog metoda testirana je simulacijom na jednomašinskom kao i višemašinskim IEEE testnim sistemima od 11 i 30 čvorova koji spadaju u grupu prenosnih mreža. Simulacija je izvršena za slučajeve pojedinačnog kao i koordinisanog rada FACTS uređaja.

Na osnovu predstavljene analize i diskusije simulacionih rezultata može se reći da su sljedeći glavni naučni doprinosi ovog rada:

- Primjena odabranih FACTS uređaja (SVC, SCC, STATCOM) u savremenim prenosnim mrežama doprinosi rasterećenju vodova sa aspekta prenosa aktivne i reaktivne snage, smanjenju gubitaka a samim tim i poboljšanju tranzijentne stabilnosti EES,
- Koordinacija alokacije i dimenzionisanja odabranih FACTS uređaja daje bolje rezultate od pojedinačne alokacije i dimenzionisanja,

- Razvijeni *website* krajnjim korisnicima omogućava vizuelizaciju i proračun tranzijentne stabilnosti elektroenergetskih sistema bez potreba poznavanja matematičkog proračuna koji stoji iza dobijenih rezultata. Na taj način omogućen je brz proračun iste za potrebe analize kratkih spojeva i ispitivanje uticaja uređaja za poboljšanje odziva generatora prilikom poremećaja,
- Ugradnja FACTS uređaja kod sistema manjih dimenzija na osnovu kriterijumske funkcije bazirane na minimizaciji ukupnih gubitaka aktivne snage pokazuje pozitivan uticaj na tranzijentnu stabilnost uslijed ugradnje bilo kojeg od razmatranih uređaja, uz adekvatnu alokaciju i podešenje. Za razliku od toga, kod sistema većih gabarita, koordinisana alokacija STATCOM-a i SCC uređaja pokazuje superiornije karakteristike u pogledu oba zahtjeva od interese.

Iako je prezentovano istraživanje relevantno, neophodno je istaći određena ograničenja primjene predložene metode. U realnim sistemima, snage potrošnje, kao i proizvodnje, se mijenjaju u vremenu, što značajno usložnjava analizu čitavog sistema. Ovo istraživanje se bazira na jednovremenoj analizi uticaja odabralih FACTS uređaja, tj. na posmatranju jednog vremenskog trenutka. Prema tome, prethodno predstavlja najveće, ali literaturno opšteprihvaćeno ograničenje. Druga grupa ograničenja vezana je za sam postupak proračuna tranzijentne stabilnosti a odnosi se na mogućnost uvažavanja uticaja potrošača preko modela konstantne impedanse što unosi određenu grešku zbog zavisnosti opterećenja od promjene napona i frekvencije na različite načine. Takođe, prigušenje oscilacija generatora koje bi u realnim uslovima postojalo u postupku je zanemareno čime se ide na stranu sigurnosti i daju se kritičniji rezultati.

Budući tok ovog istraživanja će ići u pravcu razvoja algoritama za koordinisano alociranje više različitih vrsta FACTS uređaja u realnim mrežama, uzimajući u obzir znatno veći broj ograničenja koje bi ova ugradnja mogla da pogodi, poput struja kratkih spojeva, prenosnog kapaciteta pojedinih dijelova mreže, zaštite vodova itd.

## Literatura

- [1] Kundur Phabha, „*Power System Stability and Control*“, Electrical Power Research Institute, 1993.
- [2] Mohammed Benidris, Joydeep Mitra, „*Impacts of transient instability on power system reliability*“, IEEE, 2016, doi: 10.1109/PMAPS.2016.7764194
- [3] Dahai You, Ke Wang, Lei Ye, Junchun Wu, Ruoyin Huang, „*Transient stability assessment of power system using support vector machine with generator combinatorial trajectories inputs*“, Int. J. Electr. Power Energy Syst., 2013, doi: 10.1016/j.ijepes.2012.07.057
- [4] M. S. Ćalović, A. T. Sarić, „*Osnovi Analize Elektroenergetskih Mreža i Sistema*“, Akademska misao Beograd, Tehnički fakultet Čačak, 2004.
- [5] N. Hatziargyriou, J. V. Milanović, C. Rahmann, V. Ajjarapu, C. Cañizares, I. Erlich, D. Hill, Fellow, I. Hiskens, I. Kamwa, B. Pal, P. Pourbeik, J. J. Sanchez-Gasca, A. Stanković, T. Van Cutsem, V. Vittal, C. Vournas, „*Definition and Classification of Power System Stability –Revisited & Extended*“ , IEEE, 2020, vol 36, doi: 10.1109/TPWRS.2020.3041774
- [6] Hatziargyriou, N., Milanović, J., Rahmann, C., Ajjarapu, V., Cañizares, C., Erlich, I., Vournas, C. (2020). „*Stability definitions and characterization of dynamic behavior in systems with high penetration of power electronic interfaced technologies*“. IEEE PES Technical Report PES-TR77.
- [7] Yue Song, David J. Hill and Tao Liu, „*Network-Based Analysis of Rotor Angle Stability of Power Systems*“, Foundations and Trends® in Electric Energy Systems, 2020, doi: 10.1561/3100000011
- [8] „*System Engineering for Power: Status and Prospect*”, U. S. Energy Research and Development Administration, Electric Power Research Institute, 1975
- [9] Sina Y. Caliskan, Paulo Tabuada, „*Uses and abuses of the swing equation model*“, IEEE, 2015, doi: 10.1109/CDC.2015.7403268
- [10] S. Padhi, B.P.Mishra, „*Solution of Swing equation for Transient Stability Analysis in Dual-machine System*”, IOSR Journal of Engineering, vol. 05, 2015
- [11] N. Dharma Rao, „*A New Approach to the Transient Stability Problem*”, IEEE, vol. 81, 1962, doi: 10.1109/AIEEPAS.1962.4501295
- [12] P. O. Bakhtiyorjonogli, E. D. Abduraimovich, „*Information on synchronous generators and motors*”, ISSN, vol 10, 2021, doi: 10.5958/2278-4853.2021.00713.8
- [13] Jun Zhou, Yasuharu Ohsawa, „*Improved Swing Equation and Its Properties in Synchronous Generators*”, IEEE, 2008, doi: 10.1109/TCSI.2008.924895

- [14] P. M. Anderson, A. A. Fouad, „*Power System Control and Stability*”, IEEE, Wiley – Interscience, 2003
- [15] Md Shafiullah, Hamidur Rahman, Md Ismail Hossain, MdQuamrul Ahsan, „*The study of dependency of power system stability on system inertia constant for various contingencies*”, IEEE, 2014, doi: 10.1109/ICEEICT.2014.6919113
- [16] Hadi Saadat, „*Power System Analysis*”, McGraw – Hill Series in Electrical and Computer Engineering, 1999.
- [17] Ngyarmunta Alan Audu, Odaba Alphaeus, Talatu Adamu, „*Effect of Inertia Constant on Generator Frequency and Rotor Angle*”, ISSN, 2018, doi: 10.11648/j.eas.20180301.12
- [18] Berardino Porretta, Steven Porretta, „*Calculation of Power Systems Inertia and Frequency Respons*”, IEEE, 2018.
- [19] Jan Machowski, Janusz W. Bialek, and James R. Bumby, „*Power System Dynamics: Stability and Control*”, ISBN, 2020.
- [20] Giuseppe Fusco; Mario Russo, „*Adaptive Voltage Regulator Design for Synchronous Generator*”, IEEE, 2008, vol. 23, doi: 10.1109/TEC.2008.921463
- [21] T.A. Lipo, „*Analysis of Synchronous Machines*”, CRC press, 2017.
- [22] Y. Guo, D.J. Hill, Y. Wang, „*Global transient stability and voltage regulation for power systems*”, IEEE, vol. 16, 2001. doi: 10.1109/59.962413
- [23] Songyan Wang, Jilai Yu, Wei Zhang, „*Transient Stability Assessment Using Individual Machine Equal Area Criterion PART I: Unity Principle*”, IEEE, 2018.
- [24] Samuel Adi Kusumo, Tiyono, Lesnanto Multa Putranto, „*Transient Stability Study in Grid Integrated Wind Farm*”, IEEE, 2018, doi: 10.1109/ICITACEE.2018.8576930 [29]
- [25] Thanh Long Vu, Konstantin Turitsyn, „*Lyapunov Functions Family Approach to Transient Stability Assessment*”, IEEE, 2015.
- [26] S. C. Sharma, „*Transient Stability Analysis of Single Machine Infinite Bus System by Numerical Methods*”, ISSN, vol. 2, 2014.
- [27] J. C. Butcher, „*The numerical analysis of ordinary differential equations: Runge-Kutta and general linear methods*”, Wiley-Interscience, 1987.
- [28] Kalai Murugan Amirthalingam, Raja Prabu Ramachandran, „*Improvement of Transient Stability of Power System Using Solid State Circuit Breaker*”, ISSN, 2013, doi: 10.3844/ajassp.2013.563.569
- [29] Carlos E. Ugalde-Loo, Enrique Acha, Eduardo Liceaga-Castro, „*Multi-machine power system state-space modelling for small-signal stability assessments*”, Applied Mathematical Modelling, elsevier, 2013, doi: 10.1016/j.apm.2013.05.047

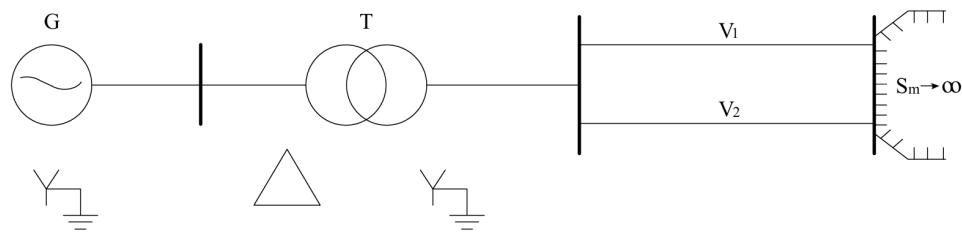
- [30] H. W. Dommel, N. Sato, „*Fast Transient Stability Solutions*“, IEEE, 1972, vol PAS-91, doi: 10.1109/TPAS.1972.293341
- [31] Ali Reza Sobbouhi, Abolfazl Vahedi, „*Transient stability prediction of power system; a review on methods, classification and considerations*“, Electric Power Systems Research, 2021, vol 190, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106853
- [32] Denise Athaide, Jiangchao Qin, Yuntao Zou, „*MATLAB/Simulink-Based Electromagnetic Transient-Transient Stability Hybrid Simulation for Electric Power Systems with Converter Interfaced Generation*“, IEEE, 2019, doi: 10.1109/TPEC.2019.8662135
- [33] S. Bhat, M. Glavic, M. Pavella, T. S. Bhatti, D. P. Kothar, „*A Transient Stability Tool Combining the SIME Method with MATLAB and SIMULINK*“, International Journal of Electrical Engineering Education, 2006, vol 43, doi: 10.7227/IJEEE.43.2.
- [34] C Sanitha Michail, „*Comparative Analysis of Solution Methods for Swing Equation in Power System for Transient Stability Studies*“, IOP Publishing Ltd 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1166/1/012053
- [35] D. Prasad Wadduwage, Christine Qiong Wu, U.D. Annakkage, „*Power system transient stability analysis via the concept of Lyapunov Exponents*“, Electric Power Systems Research, 2013, doi: 10.1016/j.epsr.2013.06.011
- [36] Ying Xiao, Y.H. Song, Y.Z. Sun, „*Power flow control approach to power systems with embedded FACTS devices*“, IEEE, 2002, vol 17, doi: 10.1109/TPWRS.2002.804919
- [37] Mehmet Yesilbudak, Salih Ermi, Ramazan Bayindir, „*Investigation of the effects of FACTS devices on the voltage stability of power systems*“, IEEE, 2017, doi: 10.1109/ICRERA.2017.8191222
- [38] M. Moghavvemi, M.O. Faruque, „*Effects of FACTS devices on static voltage stability*“, IEEE, 2000, doi: 10.1109/TENCON.2000.888762
- [39] Ghaedi S, Abazari S, Markadeh GA, „*Transient stability improvement of power system with UPFC control by using transient energy function and sliding mode observer based on locally measurable information*“, Measurement, 2021, doi: 10.1016/j.measurement.2021.109842
- [40] N. G. Hingorani, L. Gyugyi, „*Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems*“, Delhi, Indija: Standard Publ. istributors, 2001.
- [41] Alwyn Janke; John Mouatt; Ron Sharp; Hubert Bilodeau; Bo Nilsson; Mikael Halonen; Anders Bostrom, „*SVC Operation & Reliability Experiences*“, IEEE, 2010, doi: 10.1109/PES.2010.5589608
- [42] M. Eremia, A. Gole, L. Toma, „*Static VAR compensator (SVC)“ u Advanced solutions in power systems: HVDC, FACTS, and artificial intelligence*“, Eds. M. Eremia, C. Liu, A. Edris, Piskatavi, Nju Džersi: IEEE Press, 2016.

- 
- [43] I. Moses, Owolabi, „*A Survey of SVC Device: Its Principle of Operation, Advantages, and Limitations*”, Current Journal of Applied Science and Technology, 40 (43). pp. 21-28, 2021.
  - [44] A. Garcia-Cerrada, P. Garcia-Gonzalez, R. Collantes, T. Gomez; J. Anzola, „*Comparison of thyristor-controlled reactors and voltage-source inverters for compensation of flicker caused by arc furnaces*”, IEEE, vol. 15, 2000, doi: 10.1109/61.891507
  - [45] Oscar Skoglund, „*Dynamic voltage regulation using SVCs*”, This masters thesis has been performed at Svenska Kraftnät, 2013
  - [46] Xiao-Ping Zhang, Christian Rehtanz, Bikash Pal, „*Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control*”, Springer Science & Business Media, 2012
  - [47] Shenghu Li, Ming Ding, Jingjing Wang, Wei Zhang, „*Voltage control capability of SVC with var dispatch and slope setting*”, Electric Power Systems Research, vol. 79, 2009, doi: 10.1016/j.epsr.2008.11.001
  - [48] E.Z. Zhou, „*Application of Static Var Compensators to Increase Power System Damping*”, IEEE, 1993, doi: 10.1109/59.260815
  - [49] R. Grünbaum, P. Halvarsson, P. Jones, „*Series compensation for increased power transmission capacity*”, 5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 2010, doi: 10.1049/cp.2010.0037
  - [50] M. Arun Bhaskar; C. Subramani; M. Jagdeesh Kumar; S.S. Dash, „*Voltage Profile Improvement Using FACTS Devices: A Comparison between SVC, TCSC and TCPST*”, IEEE, 2009, doi: 10.1109/ARTCom.2009.135
  - [51] Priyanka Kathal, Arti Bhandakkar, „*Power Flow Control In Power System Using FACT Device Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC): A Review*”, International Jurnal of Innovative Research and Development, 2013
  - [52] Mircea Eremia, Stig Nilsson, „*Advanced Solutions in Power Systems: HVDC, FACTS, and Artificial Intelligence: HVDC, FACTS, and Artificial Intelligence*”, The Institute of Electrical and Electronic Engineering, 2016, doi: 10.1002/9781119175391
  - [53] A. Daneshpooy; A.M. Gole, „*Frequency response of the thyristor controlled series capacitor*”, IEEE, vol. 16, doi: 10.1109/61.905587
  - [54] Almoataaz Y. Abdelaziz, Mahmoud A. Attia, „*Enhancing Power System Performance with Wind Power Penetration: Optimal Allocation of FACTS*”, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015
  - [55] Surender Reddy Salkuti, „*Improvement of Transient Stability using TCSC*”, International Journal on Electrical Engineering and Informatics, 2018, doi: 10.15676/ijeei.2018.10.3.8 [
  - [56] Youjie Ma, Ahui Huang, Xuesong Zhou, „*A review of STATCOM on the electric power system*”, IEEE, 2015, doi: 10.1109/ICMA.2015.7237475

- 
- [57] P. Giroux, G. Sybille, H. Le-Huy, „*Modeling and simulation of a distribution STATCOM using Simulink's Power System Blockset*”, IEEE, 2001, doi: 10.1109/IECON.2001.975905
  - [58] Tariq Masood, R.K. Aggarwal, S.A. Qureshi, R.A.J Khan, „*STATCOM Model against SVC Control Model Performance Analyses Technique by Matlab*”, European Association for the Development of Renewable Energies, Environment and Power Quality, 2010, doi: 10.24083/repqj08.655
  - [59] D. Murali, Dr. M. Rajaram, N. Reka, „*Comparison of FACTS Devices for Power System Stability Enhancement*”, International Journal of Computer Applications, 2010
  - [60] Narain Hingorani, Laszlo Gyugyi, „*Understanding FACTS: concepts and technology flexible AC transmission systems*”, IEEE, A John Wiley & Sons, 2000
  - [61] Constantin Mirea, Claudia Elena Boamba, „*Comparative Analysis of a STATCOM with Additional Capacitor and a SVC for Implementing in a Power System*”, University POLITEHNICA of Bucharest Scientific Bulletin Series C – Electrical and Engineering and Computer Science, 2015
  - [62] Dash S, Subhashini KR, Satapathy J, „*Efficient utilization of power system network through the optimal location of FACTS devices using a proposed hybrid meta-heuristic ant lion-moth flame-salp swarm optimization algorithm*” , Int Trans Electr Energy Syst, 2020, doi: 10.1002/2050-7038.12402
  - [63] Bhushan D. Deotale; Sudhir R. Paraskar, „*Transient stability improvement using Thyristor Switched Series Capacitor (TSSC) FACTS device*”, IEEE, 2016, doi: 10.1109/SCEECS.2016.7509268
  - [64] Rajeev K. Verma, Sangeeta Mishra, „*A Study on Transient Stability Improvement of 5-machine 14-bus system using SVC*” , IJRITCC, 2014, vol 2
  - [65] Pratheeksha R., K. M. Kavitha, „*Analysis of STATCOM, SVC and UPFC FACTS Devices for Transient Stability Improvement in Power System*”, IJSR, 2016.
  - [66] E. A. Belati, C. F. Nascimento, H. de Faria, E. H. Watanabe, A. Padilha-Feltrin, „*Allocation of Static Var Compensators in Electrical Power Systems Considering Different Load Levels*”, J.Control Auto. Electr. Syst., vol. 30, doi: 10.1007/s40313-018-00421-2
  - [67] Rahul Agrawal, S.K. Bharadwaj, D. P. Kothari, „*Optimal position and setting of svc using heuristic optimization techniques*”, IEEE, 2017, doi: 10.1109/I2CT.2017.8226194
  - [68] M. Nadeem, K. Imran, A. Khattak, A. Ulasyar, A. Pal, M. Z. Zeb, A. N. Khan, M. Padhee, „*Optimal placement, sizing and coordination of FACTS devices in transmission network using whale optimization algorithm*”, Energies, vol. 13, 2020, doi: 10.3390/en13071759
  - [69] Haniyeh Marefatjou, Iman Soltani, „*Optimal Placement of STATCOM to Voltage Stability Improvement and Reduce Power Losses by Using QPSO Algorithm*”, Journal of Sience and Engineering, 2013

- [70] Lambora, A., Gupta, K., Chopra, K., „*Genetic algorithm-A literature review*“ . International conference on machine learning, big data, cloud and parallel computing (COMITCon) (pp. 380-384), IEEE, 2019.
- [71] Yadav, P. K., Prajapati, N. L., „*An overview of genetic algorithm and modeling*“ . International Journal of Scientific and Research Publications, 2(9), 1-4, 2012,
- [72] Vose, M. D., „*The simple genetic algorithm: foundations and theory*“, MIT press, 1999.
- [73] Meiyang Li, Anamitra Pal, Arun G. Phadke, James S. Thorp, „*Transient stability prediction based on apparent impedance trajectory recorded by PMUs*“, Int. J. Electr. Power Energy Syst., 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2013.07.023
- [74] Energy Information Administration/International Energy Outlook 2003.
- [75] Ismail Kasikci, „*Short Circuits in Power Systems: A Practical Guide to IEC 60909-0*“, John Wiley & Sons, 2018.
- [76] B. de Metz-Noblat, F. Dumas, C. Poulain, „*Calculation of short-circuit currents*“, Cahier Technique Schneider Electric No. 158, 2005
- [77] Ariana Amberg, Alex Rangel, „*Tutorial on Symmetrical Components*“, Schweitzer Engineering Laboratories, 2014
- [78] Kishor Gaire, „*Impact of Load on Power System Voltage Stability*”, Tribhuvan University, 2017
- [79] Ilija Vujošević, „*Analiza elektroenergetskih Sistema I*”, Elektrotehnički fakultet, Podgorica, 2006
- [80] Božuta Franjo, „*Automatski zaštitni uređaji elektroenergetskih postrojenja*”, Univeritet u Sarajevu, 1980.
- [81] Serdar Ekinici, H Lale Zeynelgil, Aysen Demiroren, „*A didactic procedure for transient stability simulation of a multi-machine power system utilizing SIMULINK*“, International Journal of Electrical Engineering Education, doi: 10.1177/0020720915597935
- [82] Sinisa Zubić, Zoran Gajić, Davor Kralj, „*Line Protection Operate Time; How Fast Shall It Be?*”, IEEE, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3081993
- [83] Dr. Afaneen A. Alkhazraji and Rana A. Abttan, „*Multiple Fault Detection And Classification In Power System*“, Advances in Natural and Applied Sciences, 12(5): 7-13, 2018.
- [84] Alnaib, Ibrahim. (2020). IEEE-BUS SYSTEM DATA

## Prilog 1. Osnovni podaci jednomašinskom sistemu



Slika P.1.1. Jednopolna šema jednomašinskog sistema

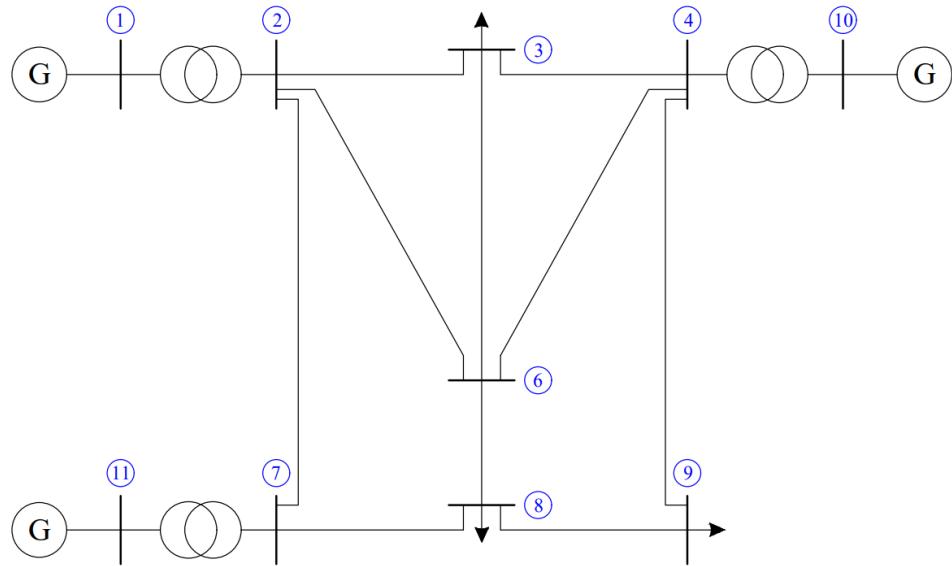
Tabela P.1.1. Vrijednost reaktanse elemenata

Reaktansa	[r.j.]
$x'_g$	0.3
$x_t$	0.15
$x_{t0}$	0.15
$x_{v1}$	0.5
$x_{v10}$	1.5
$x_{v2}$	0.93
$x_{v20}$	2.7

Tabela P.1.2. Osnovni podaci o jednomašinskem sistemu

$Sng$ [r.j.]	1
$T$ [s]	7
$E$ [r.j.]	1.1626
$U$ [r.j.]	0.90081
$P_m$ [r.j.]	0.9
$f$ [Hz]	50

## Prilog 2. Osnovni podaci o IEEE testnoj mreži od 11 čvorova



Slika P.2.1. Jednopolna šema IEEE testne mreže od 11 čvorova

Tabela P.2.1. Podaci o generatorima IEEE testne mreže od 11 čvorova

Čvor	$x_d$ [r.j.]	$H$
1	0.2	12
10	0.15	10
11	0.25	9

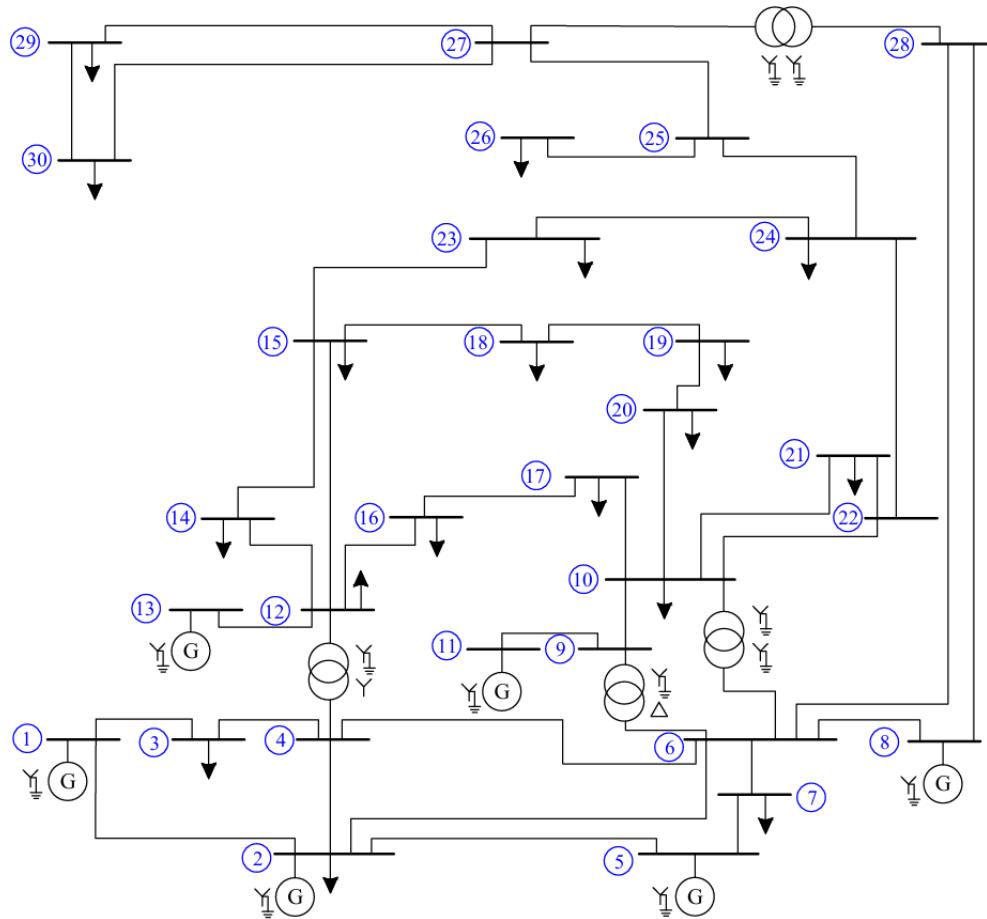
Tabela P.2.2. Podaci o mreži IEEE testne mreže od 11 čvorova

Grana	Od čvora	Do čvora	$r$ [r.j.]	$x$ [r.j.]	$b$ [r.j.]
1	1	2	0.000	0.006	0.000
2	2	3	0.008	0.030	0.008
3	2	5	0.004	0.015	0.004
4	2	6	0.012	0.045	0.010
5	3	4	0.010	0.040	0.010
6	3	6	0.004	0.040	0.010
7	4	6	0.015	0.060	0.016
8	4	9	0.018	0.070	0.018
9	4	10	0.000	0.008	0.000
10	5	7	0.005	0.043	0.012
11	6	8	0.006	0.048	0.000
12	7	8	0.006	0.035	0.016
13	7	11	0.000	0.008	0.000
14	8	9	0.005	0.048	0.000

*Tabela P.2.3. Podaci o čvorovima IEEE testne mreže od 11 čvorova*

Čvor	Tip	Napon [r.j.]	Ugao [°]	$P_{gen}$ [r.j.]	$Q_{gen}$ [r.j.]	$P_{pot}$ [r.j.]	$Q_{pot}$ [r.j.]
1	0	1.040	0	0	0	0.0	0.0
2	2	1.000	0	0	0	0.0	0.0
3	2	1.000	0	0	0	1.5	1.2
4	2	1.000	0	0	0	0.0	0.0
5	2	1.000	0	0	0	1.2	0.6
6	2	1.000	0	0	0	1.4	0.9
7	2	1.000	0	0	0	0.0	0.0
8	2	1.000	0	0	0	1.1	0.9
9	2	1.000	0	0	0	0.8	0.5
10	1	1.035	0	2	0	0.0	0.0
11	1	1.030	0	1.6	0	0.0	0.0

### Prilog 3 . Osnovni podaci o IEEE testnoj mreži od 30 čvorova



Slika P.3.1. Jednopolna šema IEEE testne mreže od 30 čvorova

Tabela P.3.1. Podaci o generatorima IEEE testne mreže od 30 čvorova

Čvor	$x_d [r.j.]$	$H$
1	0.1850	20.30
2	0.1160	30.78
5	0.2310	15.20
8	0.2310	15.20
11	0.2035	12.00
13	0.2035	12.00

Tabela P.3.2. Podaci o mreži IEEE testne mreže od 30 čvorova

Grana	Od čvora	Do čvora	r [r.j.]	x [r.j.]	b[r.j.]
1	1	2	0.0192	0.0575	0.0528
2	1	3	0.0452	0.1852	0.0408
3	2	4	0.0570	0.1737	0.0368
4	3	4	0.0132	0.0379	0.0084
5	2	5	0.0472	0.1983	0.0418
6	2	6	0.0581	0.1763	0.0374
7	4	6	0.0119	0.0414	0.0090
8	5	7	0.0460	0.1160	0.0204
9	6	7	0.0267	0.0820	0.0170
10	6	8	0.0120	0.0420	0.0090
11	6	9	0.0000	0.2080	0.0000
12	6	10	0.0000	0.5560	0.0000
13	9	11	0.0000	0.2080	0.0000
14	9	10	0.0000	0.1100	0.0000
15	4	12	0.0000	0.2560	0.0000
16	12	13	0.0000	0.1400	0.0000
17	12	14	0.1231	0.2559	0.0000
18	12	15	0.0662	0.1304	0.0000
19	12	16	0.0945	0.1987	0.0000
20	14	15	0.2210	0.1997	0.0000
21	16	17	0.0824	0.1932	0.0000
22	15	18	0.1070	0.2185	0.0000
23	18	19	0.0639	0.1292	0.0000
24	19	20	0.0340	0.0680	0.0000
25	10	20	0.0936	0.2090	0.0000
26	10	17	0.0324	0.0845	0.0000
27	10	21	0.0348	0.0749	0.0000
28	10	22	0.0727	0.1499	0.0000
29	21	22	0.0116	0.0236	0.0000
30	15	23	0.1000	0.2020	0.0000
31	22	24	0.1150	0.1790	0.0000
32	23	24	0.1320	0.2700	0.0000
33	24	25	0.1885	0.3292	0.0000
34	25	26	0.2544	0.3800	0.0000
35	25	27	0.1093	0.2087	0.0000
36	28	27	0.0000	0.3960	0.0000
37	27	29	0.2198	0.4153	0.0000
38	27	30	0.3202	0.6027	0.0000
39	29	30	0.2399	0.4533	0.0000
40	8	28	0.0636	0.2000	0.0428
41	6	28	0.0169	0.0599	0.0130

Tabela P.3.3. Podaci o čvorovima IEEE testne mreže od 30 čvorova

Čvor	Tip	Napon [r.j.]	Ugao [°]	$P_{gen}$ [r.j.]	$Q_{gen}$ [r.j.]	$P_{pot}$ [r.j.]	$Q_{pot}$ [r.j.]
1	0	1.05	0	0.0	0	0.000	0.000
2	1	1.04	0	0.8	0	0.217	0.127
3	2	1.00	0	0.0	0	0.024	0.012
4	2	1.00	0	0.0	0	0.076	0.016
5	1	1.01	0	0.5	0	0.942	0.190
6	2	1.00	0	0.0	0	0.000	0.000
7	2	1.00	0	0.0	0	0.228	0.109
8	1	1.01	0	0.2	0	0.300	0.300
9	2	1.00	0	0.0	0	0.000	0.000
10	2	1.00	0	0.0	0	0.058	0.020
11	1	1.05	0	0.2	0	0.000	0.000
12	2	1.00	0	0.0	0	0.112	0.075
13	1	1.05	0	0.2	0	0.000	0.000
14	2	1.00	0	0.0	0	0.062	0.016
15	2	1.00	0	0.0	0	0.082	0.025
16	2	1.00	0	0.0	0	0.035	0.018
17	2	1.00	0	0.0	0	0.090	0.058
18	2	1.00	0	0.0	0	0.032	0.009
19	2	1.00	0	0.0	0	0.095	0.034
20	2	1.00	0	0.0	0	0.022	0.007
21	2	1.00	0	0.0	0	0.175	0.112
22	2	1.00	0	0.0	0	0.000	0.000
23	2	1.00	0	0.0	0	0.032	0.016
24	2	1.00	0	0.0	0	0.087	0.067
25	2	1.00	0	0.0	0	0.000	0.000
26	2	1.00	0	0.0	0	0.035	0.023
27	2	1.00	0	0.0	0	0.000	0.000
28	2	1.00	0	0.0	0	0.000	0.000
29	2	1.00	0	0.0	0	0.024	0.009
30	2	1.00	0	0.0	0	0.106	0.019