



UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET PODGORICA

Spec. sci Katarina Kecojević

**MODELOVANJE, DIMENZIONISANJE I OPTIMALNA
LOKACIJA STATIČKIH KOMPENZATORA REAKTIVNE
SNAGE U ELEKTROENERGETSKOM SISTEMU**

-MAGISTARSKI RAD-

Podgorica, 2020. godine

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANDU

Ime i prezime: Katarina Kecojević

Datum i mjesto rođenja: 23.12.1996. godine, Nikšić, Crna Gora

Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina diplomiranja:
Energetika i automatika, 2018.

Naziv završenog specijalističkog studijskog programa i godina diplomiranja: Industrijska elektrotehnika, 2019.

INFORMACIJE O MAGISTARSKOM RADU

Elektrotehnički fakultet Podgorica

Postdiplomske magistarske akademske studije

Smjer: Industrijska elektrotehnika

Naslov rada: Modelovanje, dimenzionisanje i optimalna lokacija statičkih kompenzatora reaktivne snage u elektroenergetskom sistemu

OCJENA I ODBRANA MAGISTARSKOG RADA

Datum prijave magistarskog rada: 09.06.2020.

Datum sjednice Vijeća univerzitetske jedinice na kojoj je prihvaćena tema:
09.09.2020.

Komisija za ocjenu teme:

Prof. dr Saša Mujović

Prof. dr Vladan Vujičić

Doc. dr Martin Čalasan

Mentor:

Doc. dr Martin Čalasan,

Univeritet Crne Gore,

Elektrotehnički fakultet, Podgorica

Komisija za ocjenu rada:

Prof. dr Saša Mujović

Doc. dr Martin Čalasan

Prof. dr Vladan Vujičić

Komisija za odbranu rada:

Prof. dr Saša Mujović

Doc. dr Martin Čalasan

Prof. dr Vladan Vujičić

Datum odbrane:

Datum promocije:

PREDGOVOR

Moderne elektroenergetske sisteme (EES) karakteriše postojanje brojnih komponenti zasnovanih na elementima energetske elektronike, kao i prisustvo brojnih obnovljivih izvora energije. Kako je proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora nepredvidljiva, regulacija EES postaje pravi izazov. Za rješavanje problema kompenzacije reaktivne energije u istim, koriste se razne vrste FACTS (eng. *Flexible AC Transmission System*) uređaja. Ovaj rad analizira upravo primjenu ovih uređaja u EES.

Statički VAR kompenzator (SVC), kao jedan od najstarijih predstavnika FACTS uređaja, zbog svoje jednostavne konstrukcije, niske cijene i visoke efikasnosti, nalazi sve veću primjenu u današnjim, modernim EES-ima. U kojoj mjeri će SVC uređaj izvršiti svoju ulogu, tj. u kojoj mjeri će poboljšati naponske prilike u mreži, ali i smanjiti ukupne gubitke snage, zavisi od pozicije u sistemu gdje se ovaj uređaj priključi. Zato je veoma važno da se nađe optimalna pozicija priključenja ovog uređaja u EES.

Mnogi naučni radovi posvećeni su upravo nalaženju optimalne lokacije SVC uređaja u sistemu. Rješavanju ovog problema naučnici pristupaju sa različitih strana, koristeći različite tehnike, metode i postupke. Međutim, treba naglasiti da se za problem optimalnog pozicioniranja SVC uređaja u mreži danas dominantno koriste ili metaheurističke ili numeričke metode. Glavni nedostatak primjene metaheurističkih metoda jeste u tome što ove metode zavise od početnih uslova i ne konvergiraju uvijek ka istom rješenju. Sa druge strane, numeričke metode su računarski kompleksne i ne dovode uvijek do rješenja. U ovom master radu predložena je primjena programa GAMS (eng. *General Algebraic Modeling System*) i solvera CONOPT upravo za rješavanje ovoga problema. Štaviše, rezultati dobijeni primjenom solvera CONOPT su

upoređeni sa rezultatima dobijenim primjenom metaheurističkih metoda, kao i rezultatima koji se dobijaju primjenom klasičnog Newton-Raphson metoda.

Negativna posljedica primjene SVC uređaja jeste u injektiranju viših harmonika u talasnom obliku izlazne struje. Kako je jedna od osnovnih uloga sistema da potrošačima obezbijedi struju i napon osnovne učestanosti, prethodno navedeni nedostatak predstavlja veliki problem, koji se pak da riješiti uključenjem jedne od nekoliko vrsta filtra. U ovom radu analiziran je talasni oblik izlazne struje SVC uređaja, kao i sama funkcija istog. Analiza je izvršena kroz dva razvijena simulaciona modela realizovana u MATLAB/Simulinku.

Prema prethodnom, može se zaključiti da se ovaj master rad bavi izuzetno modernom oblašću elektroenergetike. Sa druge strane, u radu se koriste moderni optimizacioni programi, kao i simulacioni modeli. Na kraju, može se reći da pristupi i metodi predstavljeni u ovom radu predstavljaju polaznu tačku za brojna dalja istraživanja i usavršavanja u ovoj oblasti.

U Podgorici, novembar 2020.

REZIME

Predmet istraživanja ovog rada je modelovanje, dimenzionisanje i optimalno pozicioniranje SVC uređaja u EES-u. SVC uređaji su zasnovani na energetskej elektronici, i samim tim pri svom radu generišu osim osnovnog, i više harmonike, koji se suprotno potrebama potrošača, kojima treba „čista“ energija, injektiraju u mrežu. Zbog toga, predmet analize ovog rada najprije će biti sagledavanje vrijednosti viših harmonika koje generišu pomenuti uređaji.

Predmet istraživanja ovog rada je, takođe, i razvoj modela u programu GAMS u cilju nalaženja optimalne lokacije i parametara SVC uređaja. Za proračune su korišćene dvije testne IEEE mreže sa 9 i 30 čvorova. U ovom master radu razmatran je rad ESS-a sa konstantnim opterećenjem, sa promjenljivim opterećenjem, kao i sa promjenljivim opterećenjem kada u datom sistemu imamo prisustvo vjetroelektrane.

Prilikom istraživanja biće korišćen program GAMS, i solver *Conopt* za nelinearno programiranje. Sam postupak određivanja optimalne lokacije SVC-a bazira se na minimizaciji kriterijumske funkcije. Svi proračuni rađeni su za dvije kriterijumske funkcije - minimizacija gubitaka aktivne snage i minimizacija devijacije napona. Takođe, proračuni su vršeni u slučajevima kada reaktivna snaga SVC uređaja nije ograničena, ali i kada se limitira gornja granica reaktivne snage SVC uređaja.

Dobijeni rezultati pokazuju da se pravilnim odabirom vrijednosti reaktivne snage SVC uređaja i njegovim pravilnim pozicioniranjem može postići značajno smanjenje gubitaka i posebno značajno smanjenje pulsacija napona, bez obzira da li je opterećenje konstantno, varijabilno ili u mreži postoji vjetroelektrana. Realizovani

algoritam za optimalnu lokaciju SVC-a mnogo brže dolazi do rješenja (optimalne lokacije SVC uređaja), od klasičnih metoda. Realizovani algoritam i sam postupak se može primijeniti na različite EES-e, bez obzira da li oni sadrže obnovljive izvore energije ili ne.

Ključne riječi: statički Var kompenzator, Generic Algebraic Modeling System, generisanje viših harmonika, optimizacija lokacije, optimizacija parametara.

ABSTRACT

The subject of research in this paper is modeling, sizing and optimal positioning of SVC devices in the power system. SVC devices are based on power electronics, so in their work in addition to the basic, they generate higher harmonics, which, contrary to the needs of consumers who need "clean" energy, are being injected into the network. Therefore, the subject of the analysis of this paper will firstly be the consideration of the values of higher harmonics generated by the mentioned devices.

The subject of research in this paper is also the development of models in the GAMS program in order to find the optimal location and parameters of SVC devices. Two test IEEE networks with 9 and 30 nodes were used for the calculations. In this master thesis, the operation of ESS with constant load, with variable load, as well as with variable load when we have the presence of a wind farm in a given system is considered.

The GAMS program and the *Conopt* solver for nonlinear programming will be used in the research. The process of determining the optimal location of the SVC is based on minimizing the criterion function. All calculations were performed for two criterion functions - minimization of active power losses and minimization of voltage deviation. Also, calculations were performed in cases when the reactive power of the SVC device is not limited, but also when the upper limit of the reactive power of the SVC device is limited.

The obtained results show that by correctly selecting the value of the reactive power of the SVC device and its correct location, a significant reduction of losses and especially a significant reduction of voltage pulsations can be achieved, regardless of

whether the load is constant, variable or there is a wind generator. The realized algorithm for the optimal location of the SVC comes to the solution much faster than the classical methods. The realized algorithm and the procedure itself can be applied to different power systems, regardless of whether they contain renewable energy sources or not.

Keywords: static VAr compensator, Generic Algebraic Modeling System, higher harmonics generation, location optimization, parameter optimization.

Uvod.....	3
POGLAVLJE 1.....	9
SVC	9
1.1. Tiristorski kontrolisana prigušnica (TCR)	13
1.2. Tiristorski uklopivi kondenzator (TSC)	14
1.3. Kontrola i ograničenja SVC-a.....	16
1.4. Kratak osvrt na proizvođače SVC uređaja u svijetu.....	18
POGLAVLJE 2.....	19
Spektralna analiza izlazne struje SVC uređaja.....	19
2.1. Talasni oblik izlazne struje SVC uređaja	19
2.2. Simulacioni rezultati	29
2.2.1. Rad SVC uređaja u EES-u u uslovima promjene napona	29
2.2.2. Harmonijska distorzija izlazne struje SVC uređaja.....	32
POGLAVLJE 3.....	37
GAMS.....	37
3.1. GAMS struktura	37
3.2. Opšta pravila u GAMS-u.....	40
3.3. Solver CONOPT	40
POGLAVLJE 4.....	44
OPTIMALNA LOKACIJA SVC UREĐAJA U EES-U.....	44
4.1. Podaci o elektroenergetskim mrežama	44
4.2. Osnovne jednačine za minimizaciju gubitaka i devijacije napona	50
4.3. Profil vjetra i izlazna snaga vjetroelektrane.....	52
4.4. REZULTATI	53
4.4.1. SLUČAJ 1 – optimalna lokacija SVC uređaja za konstantno opterećenje (OF=MTPL)	54
4.4.2. SLUČAJ 2 - optimalna lokacija SVC uređaja za varijabilno opterećenje u sistemu bez vjetroelektrane (OF=MTPL)	60
4.4.3. SLUČAJ 3 - optimalna lokacija SVC uređaja za varijabilno opterećenje u sistemu sa vjetroelektranom (OF=MTPL).....	65
4.4.4. SLUČAJ 4 – optimalna lokacija SVC uređaja za konstantno opterećenje (OF=MTVD)	70

4.4.5. SLUČAJ 5 - optimalna lokacija SVC uređaja za varijabilno opterećenje u sistemu bez vjetroelektrane (OF=MTVD)	74
4.4.6. SLUČAJ 6 - optimalna lokacija SVC uređaja za varijabilno opterećenje u sistemu sa vjetroelektranom (OF=MTVD).....	77
POGLAVLJE 5.....	82
ZAKLJUČAK.....	82
LITERATURA.....	84

Uvod

Današnji život je nemoguće zamisliti bez postojanja električne energije. Ona se u vidu aktivne i reaktivne energije proizvodi u elektranama, a zatim se prenosi do različitih udaljenosti, pri čemu se na kraju transformiše u druge potrebne oblike energije [1]. Posljednjih godina, sa porastom broja stanovništva, kvaliteta života i napredujuće ekonomije živimo u vremenu kada je potražnja za električnom energijom zbog svega nabrojanog, sve veća. Međutim, proširenje proizvodnih i prenosnih kapaciteta je ograničeno zbog nepostojanja neograničenih resursa, kao i potreba zaštite životne sredine. Rezultat svega navedenog je današnja situacija u kojoj su mnogi prenosni vodovi preopterećeni, tako da je stabilnost elektroenergetske mreže glavni problem savremenih elektroenergetskih sistema u skladu sa kojim treba planirati sve promjene u sistemu, naročito prenosu. Još jedna od karakteristika modernog elektroenergetskog sistema je sve veće uključivanje električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora. Ova proizvodnja je nesigurna i nepredvidiva, što dodatno otežava problem kontrole toka snaga, efikasnosti mreže, kao i sigurnog napajanja [3].

Kao što je poznato, snaga koja protiče kroz AC prenosni vod je funkcija impedanse voda, magnitude napona, i fazne razlike među uglovima napona na krajevima vodova. Kao posljedica svega prethodno navedenog, u sistemu postoje gubici snage i devijacije napona. Na mjestima u sistemu gdje su priključeni potrošači napon može ispasti iz opsega dozvoljenih granica, koje je sa druge strane potrebno da zadovoljava, kako bi rad potrošača bio na zadovoljavajućem nivou. Upravo ovo je motiv istraživanja ovog master rada – minimizacija gubitaka i minimizacija pulsacija napona u mreži.

U modernom vremenu, kao najnapredniji uređaji za kompenzaciju reaktivne energije koriste se FACTS uređaji. Najnovija istraživanja su pokazala da pored njihove glavne uloge u rješavanju problema optimalnih tokova snaga kompenzacijom reaktivne energije, oni mogu povećati i stabilnost u sistemu [2]. Takođe, njihovom upotrebom poboljšavaju se kapaciteti prenosnih vodova, kao i profil napona. U ovom magistarskom radu, istraživanja će biti sprovedena na modelu jednog od najkorišćenijih paralelnih FACTS uređaja - SVC (eng. *Static Var Compensator*) uređaj.

SVC je prvi FACTS uređaj koji je razvijen. Na elektroenergetski sistem se veže paralelno, i u svom sastavu ima paralelno vezane kondenzatore (fiksne ili varijabilne kapacitivnosti), i kalemove, tako da može funkcionisati i u induktivnom i u kapacitivnom režimu. Uglavnom se priključuje na sistem kada se žele poboljšati naponske prilike i regulisati reaktivna energija. Ovaj uređaj omogućava regulaciju, tj. proizvodnju odnosno apsorpciju reaktivne snage u širokom opsegu [2]. Koliko će SVC uređaj poboljšati prilike u sistemu zavisi od različitih faktora, među kojima se kao dva najvažnija nameću lokacija postavljanja samog uređaja i njegov kapacitet. Ovaj rad je koncentrisan na traženje i optimalne lokacije i optimalnog kapaciteta SVC uređaja u cilju smanjenja gubitaka snage i devijacije napona.

U dostupnoj literaturi se može naći veliki broj različitih studija usmjerenih na FACTS uređaje, a posebno na SVC uređaje, njihovu optimalnu lokaciju u elektroenergetski sistem, sa ili bez prisustva obnovljivih izvora [3-25]. Na primjer, koordinacija SVC uređaja i drugih FACTS uređaja za upravljanje tokovima snaga predstavljena je u [3]. S druge strane, optimalno postavljanje i podešavanje parametara SVC uređaja za rješavanje problema stabilnosti elektroenergetskog sistema, prigušujuće oscilacije nisko-frekvencijskog sistema, kao i opteretivost elektroenergetskog sistema predstavljeni su u [4-11]. Problem opteretivosti često je povezan sa optimalnom kontrolom sistema u cilju minimizacije ukupnih gubitaka elektroenergetskog sistema [11]. Minimizacija ukupnih gubitaka snage jedan je od glavnih razloga primjene FACTS uređaja u elektroenergetskim mrežama, i iz tog

razloga gotovo svi radovi koji se bave FACTS uređajima razmatraju ovaj problem [11-14]. Pronalaženje optimalnog podešavanja svih kontrolnih promjenljivih FACTS uređaja za različite svrhe istraživano je u [15-22]. S tim u vezi, možemo naći istraživanja za poboljšanje naponskog profila u distributivnoj mreži sa obnovljivim izvorima energije [15, 17], za maksimizaciju proizvodnje fotonaponskih sistema uz minimizaciju operativnih troškova [16], za efikasniju rekonstrukciju elektroenergetskih sistema sa vjetroelektranama [17], za poboljšanje naponskog profila sistema [22], poboljšanje kvaliteta napajanja [24, 25] i tako dalje.

Poboljšanje naponskog profila korišćenjem FACTS uređaja u jakoj je vezi sa minimizacijom gubitaka snage [15, 22]. Ova činjenica je detaljno istražena u [22] posmatrajući IEEE 9 i IEEE 30 testne sisteme. Međutim, u [22] autori su analizirali poboljšanje naponskog profila i minimizovanje gubitaka snage, samo pri konstantnom opterećenju, što nije realan slučaj u praksi. S druge strane, u [22] je evidentno izvijesno nepodudaranje podataka. Na primjer, podaci o sistemu ne odgovaraju grafičkom prikazu analiziranih mreža. Takođe, dobijeni rezultati minimalne vrijednosti gubitaka elektroenergetskog sistema bez SVC uređaja razlikuju se od rezultata objavljenim u mnogim radovima koji se bave sa tzv. *Optimal Power Flow (OPF)* - optimalnim protokom snage. U radu [22] dobijeno je da je minimalna vrijednost gubitaka snage u testnoj mreži IEEE 30, bez SVC uređaja, 2.86 MW, dok je u [26-30] vrijednost gubitaka elektroenergetskog sistema oko 3.1 MW ili više. Ista situacija je i sa IEEE 9-testnim sistemom. S druge strane, u [31] autori su analizirali uticaj SVC uređaja na IEEE 24-testnim sistemom sa tri vjetrogeneratora bez ikakvih razmatranja o varijacijama gubitaka snage, optimalnom čvoru za SVC uređaj i slično.

Pored velikih sistema, upotreba FACTS uređaja istražuje se i za sisteme mikro mreža [32-37]. Generalno, mikro-mreže su male energetske mreže, u smislu obima, snage ili nivoa napona, koje sadrže različitu generatorsku jedinicu, koja može da obezbijedi adekvatno snabdijevanje energijom po potrebi [36]. Njihov dizajn sa SVC uređajima, kada su iste povezane sa mrežom i kada funkcionišu u ostrvskim režimima,

može značajno poboljšati stabilnost napona, povećati faktor snage, smanjiti gubitke u elektroenergetskom sistemu, ublažiti harmonijska izobličenja i tako dalje [37]. Za prigušivanje oscilacija elektroenergetskog sistema mogu se koristiti i različiti FACTS uređaji i stabilizatori sistema napajanja (PSS) [38, 39].

U gore navedenim istraživanjima posmatraju se različite vrste elektroenergetskih sistema. U nekim slučajevima autori su posmatrali standardne IEEE testne sisteme [4, 8, 12, 13], dok su u drugim radovima autori posmatrali distributivne sisteme [15, 16].

Sa druge strane, problem optimalne lokacije FACTS uređaja dominantno je rješavan primjenom različitih metaheurističkih tehnika. Tehnike koje se mogu naći u literaturi su *Particle Swarm Optimization* (PSO) [4, 19, 20], *Genetic Algorithm* (GA) [5, 10, 20], *Hybrid Imperialist Competitive Algorithm genetic Algorithm* (HICAGA) [11], *Whale Optimization Algorithm* (WOA) [12], *Differential Evolution* (DE) [12], *Grey Wolf Optimization* (GWO) [12], *Quasi-Opposition based Differential Evolution* (QODE) [12], *Quasi-Opposition based Grey Wolf Optimization* (QOGWO) [12], *Differential Search* (DS) [13], *Simulated Annealing* (SA) [20], *Pattern Search* (PS) [20], *Backtracking Search Algorithm* (BSA) [20], *Gravitational Search Algorithm* (GSA) [20], *Asexual Reproduction Optimization* (ARO) [20]. Pregled radova koji se bave optimalnom lokacijom različitih FACTS uređaja u elektroenergetskim sistemima primjenom metaheurističkih tehnika optimizacije predstavljen je u [21]. Pored metaheurističkih metoda, problem optimalne lokacije SVC uređaja može se riješiti i korišćenjem Newton-Raphson metode [22], kao i korišćenjem netradicionalnih tehnika optimizacije [23]. Veliki broj postojećih optimizacionih metoda koje se bave optimalnom lokacijom SVC uređaja, radi postizanja boljih performansi sistema, poput manjih gubitaka u elektroenergetskom sistemu, ukazuju na neophodnost daljih istraživanja u ovoj naučnoj oblasti.

U ovom radu predstavljena je upotreba solvera CONOPT [26, 31, 40, 41] ugrađenog u programski paket GAMS. Prednosti solvera CONOPT u odnosu na druge tehnike optimizacije su brzina dobijanja rezultata i činjenica da ovaj solver uvijek

konvergira ka istom optimalnom rješenju za bilo koje početne uslove [26]. Poređenje solvera CONOPT i još četiri metaheurističke metode (PSO, GSA - *Gravitational search algorithm* [42, 43], *Artificial bee colony* – ABC algorithm - ABC algoritam [29] i DE [12, 44-46]) dato je u radu [47] gdje je pokazana njegova nadmoć u odnosu na pomenute algoritme.

Istraživanje predstavljeno u ovom radu ima dva glavna cilja. Prvi cilj ovog rada je testiranje rada SVC uređaja u uslovima promjene napona, kao i uticaj SVC uređaja na generisanje viših harmonika u izlaznoj struji. Drugi cilj ovoga rada je određivanje optimalne lokacije i parametara SVC uređaja za dvije funkcije cilja tj. kriterijumske funkcije - minimizacija gubitaka aktivne snage i minimizacija devijacije napona. U ovom radu proračuni će biti izvršeni na standardnim testnim sistemima - IEEE 9 i IEEE 30, sa i bez prisustva obnovljivih izvora energije, primjenom programa GAMS i pomenutog solvera CONOPT.

Kako bi se na adekvatan način prikazao doprinos, ovaj rad je organizovan na sljedeći način:

- **Prvo poglavlje** sadrži osnovne informacije o SVC uređaju: prednosti njegove primjene, strukturne karakteristike, princip rada i osnovni elementi. Nakon toga, biće spomenuta trenutna situacija sa upotrebom ovih uređaja u svijetu i samim tržištem.
- U **drugom poglavlju** su date opšte informacije o elektromagnetnoj kompatibilnosti uređaja sa napojnom mrežom, posljedicama viših harmonika, uticaju SVC uređaja na generisanje istih, načinima eliminacije viših harmonika i slično. U ovom poglavlju, kroz dva konkretna primjera pokazan je princip rada, ali i generisanje harmonika, prilikom primjene SVC uređaja. Konkretno, kroz primjere biće prikazan uticaj promjene napona u mreži na rad SVC uređaja, kao i uticaj SVC uređaja na harmonijsku distorziju izlazne struje.
- **Treće poglavlje** je rezervisano za priču o programu GAMS. Takođe, opisaće se način realizacije jednog GAMS modela, uz objašnjenje osnovnih elemenata

sintakse, strukture, naredbi i slično. Na kraju poglavlja biće opisan i solver CONOPT, korišćen u radu.

- U **četvrtom poglavlju** će biti dati podaci o testnim mrežama koje su korišćene, zatim detaljne jednačine koje opisuju i formulišu problem minimizacije gubitaka snage i devijacije napona uz osnovni problem kontrole toka snage u mreži. Za dva IEEE testna sistema sa 9 i 30 čvorova biće proračunati optimalni parametri za SVC uređaj, kao i optimalni čvor gdje bi trebalo priključiti SVC uređaj, u cilju: 1) minimizacije gubitaka, i 2) minimizacije devijacije napona u mreži. Analiziraće se različiti scenariji – konstantno opterećenje sistema, promjenljivo opterećenje sistema, kao i promjenljivo opterećenje sistema u slučaju postojanja vjetrogeneratora u mreži. Posebno će biti analiziran uticaj različitih profila brzine vjetra na vrijednost snage i optimalnu lokaciju SVC uređaja.
- Na samom kraju, u zaključku će biti sumirani dobijeni rezultati, sa odgovarajućim komentarima o potencijalnim poboljšanjima i idejama vezanim za dalje istraživanje.

POGLAVLJE 1

SVC

Statički VAr-kompensator (SVC) je jedan od uređaja koji pripada grupi fleksibilnih sistema za prenos naizmjenične struje (FACTS), a koji koriste komponente energetske elektronike za kontrolu protoka snage u mrežama. SVC reguliše napon na svom terminalu tako što kontroliše vrijednost reaktivne snage koja se injektira u sistem napajanja ili apsorbuje iz njega. Kada je napon sistema nizak, SVC stvara reaktivnu snagu (kapacitivni režim rada). Kad je napon sistema visok, on apsorbuje reaktivnu snagu (induktivni režim rada SVC-a). Kompenzacija reaktivne snage vrši se odgovarajućim manevrisanjem komponentama SVC uređaja. SVC je sa mrežom povezan preko spojnog transformatora, koji se priključuje između mreže i uređaja radi zaštite osjetljivih komponenti energetske elektronike [48]. Izgled jednog klasičnog postrojenja sa SVC uređajem dat je na slici 1.1, dok je izgled SVC transformatora prikazan na slici 1.2.

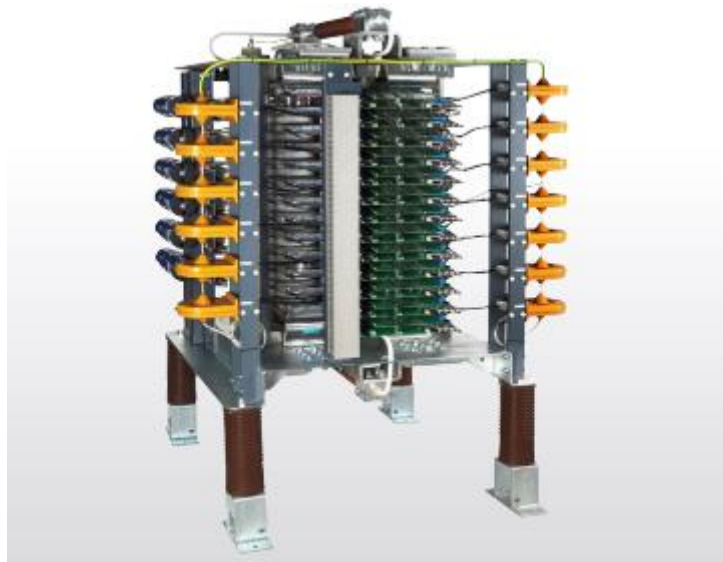


Slika 1.1. Primjer klasičnog SVC dizajna [49]



Slika 1.2. Izgled SVC transformatora [49]

Statički VAr kompenzator predstavlja paralelnu kombinaciju kontrolisane prigušnice i fiksnog ili varijabilnog kondenzatora. U cilju kontrole prigušnica koriste se osjetljive komponente energetske elektronike, tačnije SCR (eng. *Silicon Controlled Rectifier*) tiristori. Izgled tiristorskih ventila dat je na slici 1.3. Ugao paljenja tiristora kontroliše napon na induktoru i samim tim struju koja protiče kroz induktor. Na taj način može se kontrolisati vrijednost reaktivne snage induktora.



Slika 1.3. Izgled tiristorskih ventila [49]

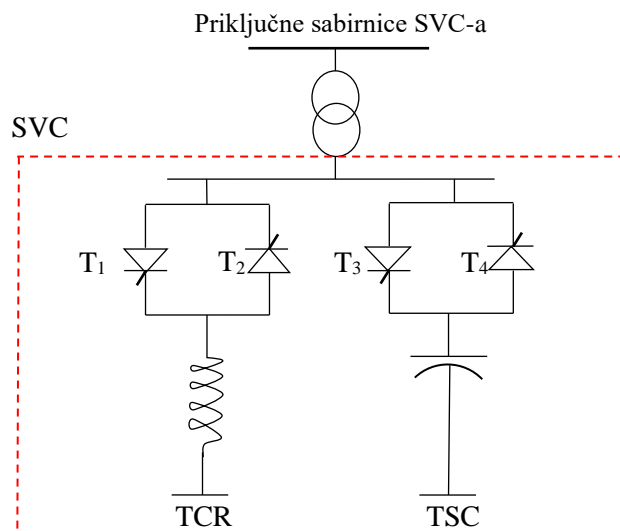
SVC je sposoban da gotovo kontinualno vrši kompenzaciju reaktivne snage u neograničenom opsegu bez ikakvog vremenskog odlaganja, tako da su neprekidna kompenzacija i brzina odziva dvije najvažnije karakteristike ovog uređaja. Najčešće korišćene SVC šeme su sljedeće:

1. *Thyristor Controlled Reactor (TCR)* - tiristorski kontrolisana prigušnica ,
2. *Thyristor Switched Capacitor (TSC)* - tiristorski uklopivi kondenzator,
3. samostalna prigušnica,
4. tiristorski kontrolisana prigušnica - fiksni kondenzator (TCR-FC eng. *Thyristor Controlled Reactor-Fixed Capacitor*) ,
5. tiristorski uklopivi kondenzator - tiristorski kontrolisana prigušnica (TSC TCR eng. *Thyristor Controlled Reactor- Thyristor Switched Capacitor*).

Prednosti statičkog VAr kompenzatora su:

- povećava se efikasnost prenosa snage u sistemu,
- poboljšava prelaznu stabilnost sistema,
- kontroliše ustaljeno stanje i privremene prenapone,
- poboljšava se faktor snage opterećenja, a samim tim i smanjuju se gubici [49].

Razumijevanje upravljačke strukture i dinamičkog ponašanja SVC-a je neophodno kako bi se definisalo odgovarajuće korišćenje kompenzatora. Osnovna struktura SVC uređaja koji se sastoji od TCR-a i TSC-a je prikazana na slici 1.4.

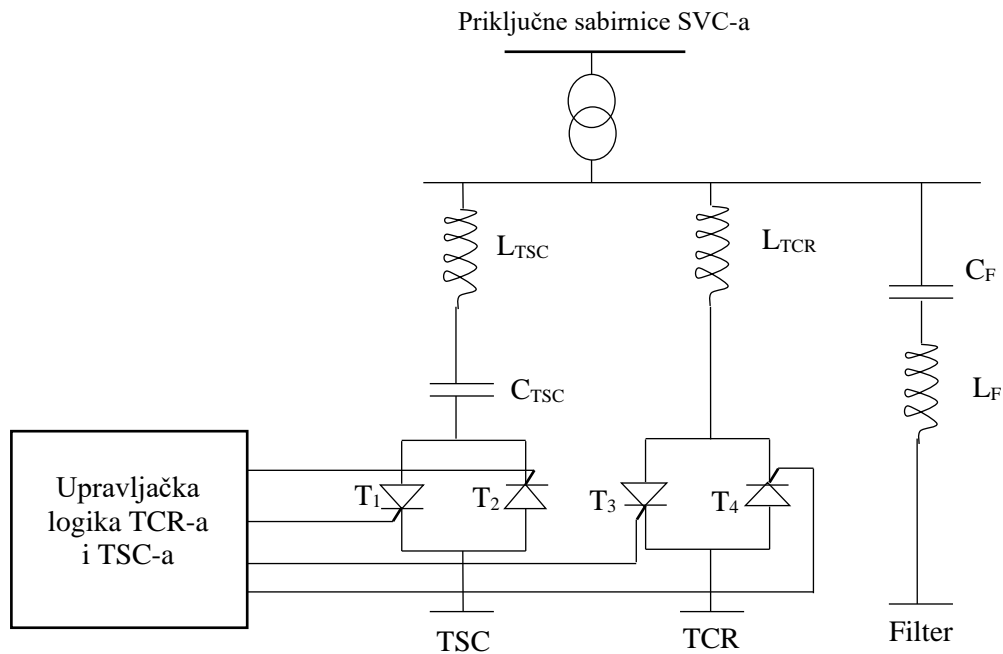


Slika 1.4. Prikaz strukture SVC-a TCR-TSC tipa

Kako bi se ispunio jedan od osnovnih ciljeva ugradnje SVC uređaja, a to je injektiranje reaktivne snage osnovne učestanosti, potrebno je paralelno na osnovnu šemu dodati i filter. Ovo je potrebno jer je u normalnom funkcionisanju TCR komponenta koja generiše više harmonika. Izgled filtra za eliminaciju harmonika dat je na slici 1.5. Takođe, prilikom priključivanja kondenzatora, koji se nalazi u sastavu TSC komponente, na naizmjenični napon kroz isti će proteći određena struja. Da bi se ta struja ograničila, potrebno je na red sa kondenzatorom dodati prigušnicu određene induktivnosti. Kompletna šema jednog SVC uređaja TCR-TSC tipa data je na slici 1.6.



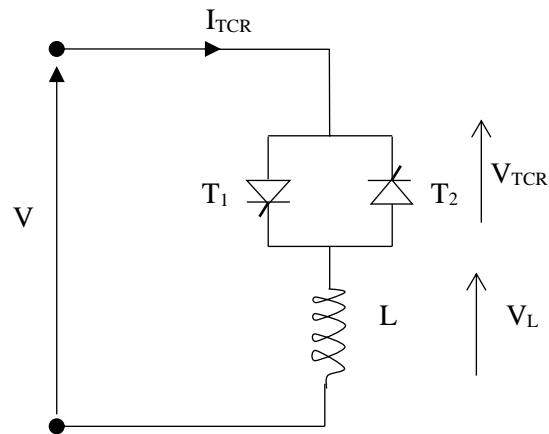
Slika 1.5. Izgled filtra za eliminaciju harmonika [49]



Slika 1.6. Prikaz strukture SVC-a sa filterom

1.1. Tiristorski kontrolisana prigušnica (TCR)

TCR se sastoji od fiksne prigušnice induktivnosti L i dvosmjernog tiristorskog ventila. U jednom ventilu postoji veći broj tiristora (u praksi najčešće od 10 do 40 tiristora) koji su serijski povezani kako bi zadovoljili potrebne tehničke zahtjeve. Dovođenjem impulsa na tiristore u ventilu, isti se dovodi u provodnost. Ventil će se automatski blokirati kada naizmjenična struja dostigne približno nultu vrijednost, u odsustvu signala paljenja. Gubici ovih uređaja su od 0.5 do 2% od ukupne vrijednosti reaktivne snage; stoga je jedna od pretpostavki za modelovanje da se otpor induktora može zanemariti. Sljedeća pretpostavka u modelovanju ovih uređaja jeste ta da je napon primjenjen na TCR sinusoidalni, što je za SVC uređaj, koji je paralelni uređaj, razumno jer napon napajanja predstavlja sabirnički napon. Tiristori su postavljeni simetrično pa je prema tome, najveći mogući ugao paljenja 180° . Šema TCR dijela SVC uređaja data je na slici 1.7, dok je njegov izgled dat na slici 1.8.



Slika 1.7. Prikaz TCR-a

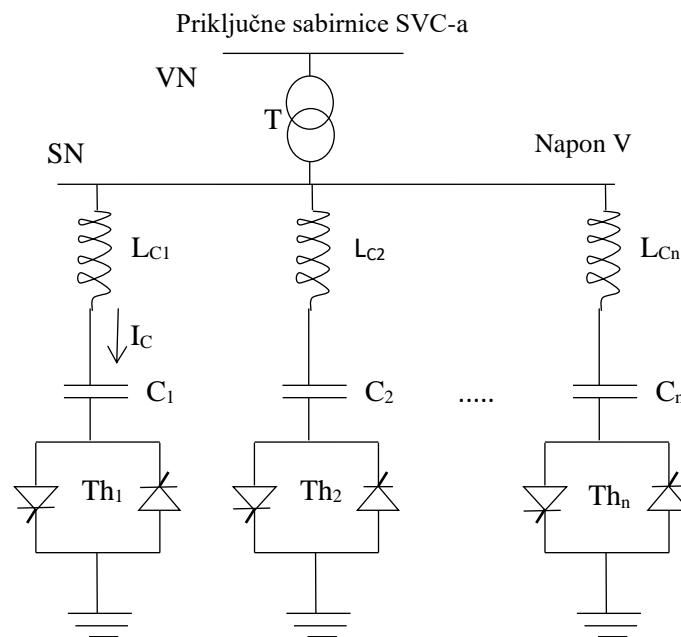


Slika 1.8. Izgled TCR dijela [49]

1.2. Tiristorski uklopivi kondenzator (TSC)

Tiristorski uklopivi kondenzator (TSC) takođe predstavlja osnovnu komponentu SVC uređaja. Međutim, ovaj dio SVC uređaja se razlikuje po dvije bitne stvari od TCR dijela. Kao prvo, u normalnom pogonu ne generiše više harmonike. Na drugom mjestu je i nemogućnost kontinualne regulacije. Tiristorski prekidači se koriste za uključivanje/isključivanje poprečnog kondenzatora, i na taj način se ostvaruje skokovita promjena reaktivne snage koja se injektira u elektroenergetski

sistem. Dakle, kod TSC-a se tiristori koriste kao prekidači u svrhu uključivanja/isključivanja kondenzatora. U većini realizacija postoji više paralelno vezanih kondenzatorskih grupa, kojima se nezavisno upravlja, tako da se stepeni podešavanja injektirane snage mogu učiniti vrlo malim, odnosno može se realizovati gotovo kontinualna regulacija. Šema TSC dijela dat je na slici 1.9, a realan izgled u okviru postrojenja dat je na slici 1.10.



Slika 1.9. Struktura TSC-a



Slika 1.10. Izgled TSC dijela u postrojenju [49]

1.3. Kontrola i ograničenja SVC-a

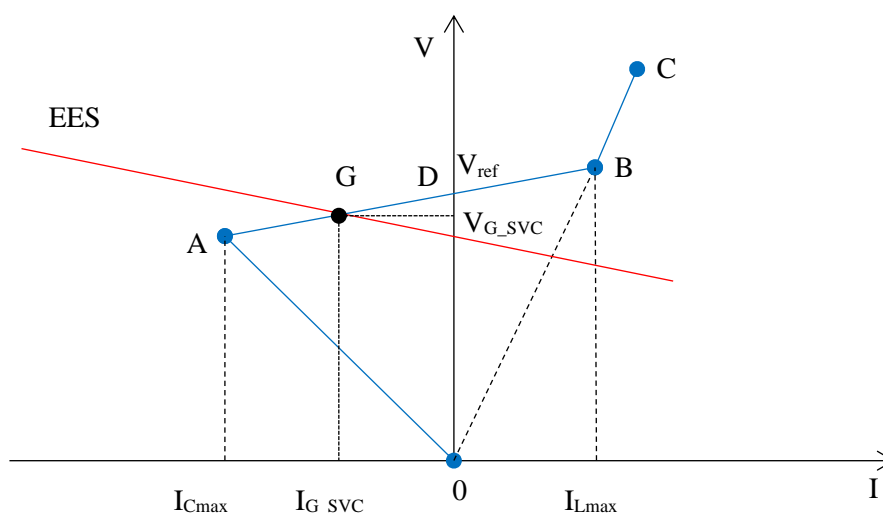
Kontrola SVC-a uređaja se ostvaruje posmatrajući tzv. strujno-naponsku karakteristiku (I-V ili V-I), koja se može opisati sa sljedeće tri jednačine:

$$V = V_{ref} + X_s I, \text{ SVC je u opsegu regulacije } (-B_{cmax} < B_c < B_{lmax})$$

$$V = \frac{I}{B_{cmax}}, \text{ SVC je potpuno kapacitivan } (B = B_{cmax})$$

$$V = \frac{I}{B_{lmax}}, \text{ SVC je potpuno induktivan } (B = B_{lmax})$$

gdje su: V - napon pozitivne sekvence (pu), V_{ref} - referentni napon (pu), I - reaktivna struja (pu/pbase) ($I > 0$ indicira da je struja induktivnog karaktera), X_s - nagib ili pad reaktanse (pu/pbase), gdje je $pbase$ odabrana bazna snaga, B_{cmax} - maksimalna kapacitivna susceptansa (pu/pbase) sa svim TSC-ovima u funkciji, i bez TCR-a, B_{lmax} - maksimalna induktivna susceptansa sa kompletno provodnim TCR-om, i bez TSC-a, $pbase$ – predstavlja baznu vrijednost snage, pu – jedinični sistem.



Slika 1.11. Stacionarna karakteristika SVC-a i EES-a

Tipična vrijednost za kontrolisani opseg napona je 10%. Na granicama dozvolje evrijednosti napona, SVC se transformiše u fiksnu reaktansu. Da bi se to spriječilo, potreban je nagib X_s da se izbjegnu krajnja ograničenja za male varijacije napona sabirnice. Tipične vrijednosti za nagib X_s su u opsegu od 0.02 do 0.05 pu u odnosu na odabranu baznu snagu SVC-a. SVC V-I karakteristika prikazana je na slici 1.11.

Kriva OABC (plava boja) predstavlja stacionarnu karakteristiku SVC-a. Sa druge strane crvenom bojom je predstavljena karakteristika EES, koja, kako se može vidjeti, ima negativni nagib. Duž OA predstavlja granicu u kapacitivnom području rada za SVC, dok je BC granica rada u induktivnom dijelu. Nagib segmenta OA definisan je ukupnom kapacitivnom susceptansom svih TSC koji su u pogonu u posmatranom SVC sistemu, dok je nagib segmenta BC određen induktivnom susceptansom TCR-a. Radna tačka je tačka G, koja predstavlja mjesto presijecanja ove dvije karakteristike. Nagib karakteristike AB je bitan jer omogućava paralelan rad više SVC uređaja povezanih na iste ili susjedne sabirnice. Takođe ovaj nagib spriječava da SVC često dostiže krajnje granice. V_{ref} je referentna vrijednost napona u slučaju kada je struja $I=0$ (tačka D na karakteristici AB).

SVC može raditi u dva različita režima:

- U režimu regulacije napona (napon se reguliše u unaprijed utvrđenim granicama),
- U režimu kontrole VAR (susceptansa SVC-a je konstantna).

Sve dok susceptansa SVC-a ostaje unutar maksimalne i minimalne vrijednosti koje su utvrđene na osnovu ukupne reaktivne snage kondenzatorskog dijela (B_{cmax}) i induktivnog dijela (B_{imax}), napon se reguliše prema referentnom naponu V_{ref} .

1.4. Kratak osvrt na proizvođače SVC uređaja u svijetu

Ključni igrači koji posluju na tržištu SVC uređaja u svijetu su: Rongxin Power Electronic Co., Ltd. (Kina), ABB Ltd. (Švajcarska), Siemens AG (Njemačka), General Electric (SAD), Eaton Corp plc (Irska), American Electric Power (SAD), Hyosung (Južna Koreja), NR Electric Co. Ltd. (Kina), Mitsubishi Electric Corp. (Japan), and American Superconductor Corp. (Kina).

Ove kompanije fokusirane su na proširenja i lansiranje novih proizvoda kako bi povećali svoj prihod. ABB je jedan od lidera na tržištu statičkih VAr kompenzatora. Kompanija se fokusira na ugovore i proširenja kako bi održala svoje prisustvo na tržištu širom svijeta. Kompanija ima ogromnu bazu kupaca sa dugoročnim ugovorima. Na primjer, u decembru 2014. godine, ABB je instalirao i pustio u rad četiri SVC-a kao dio projekta koji je dao Electric Transmission Texas, LLC (Austin) [52].

POGLAVLJE 2

Spektralna analiza izlazne struje SVC uređaja

Pored brojnih značajnih prednosti upotrebe SVC uređaja u EES-u, potrebno je ukazati i na neke nedostatke ugradnje istih. Tu se prije svega misli na generisanje viših harmonika u talasnom obliku izlazne struje SVC uređaja. U ovom poglavlju, kroz dva simulaciona modela ukazaće se na navedene pojave.

2.1. Talasni oblik izlazne struje SVC uređaja

Zadatak elektroenergetske mreže je da, između ostalog, potrošaču kontinuirano isporučuje „kvalitetnu“ energiju. Pod pojmom „kvalitetna“ energija podrazumijeva se da napon mreže mora biti sinusoidalnog talasnog oblika, efektivne vrijednosti u rasponu definisanom dozvoljenim granicama, kao i nominalne učestanosti.

Struja nelinearnog potrošača nije sinusoidalna, već je „bogata“ harmonicima. U tom slučaju harmonijska izobličenja struje dovode do izobličenja talasnog oblika napona. Taj talasni oblik odstupa od sinusoide, i osim osnovnog sadrži i više harmonike. Harmonici napona mogu smetati drugim potrošačima, a harmonici struje mogu izazvati brojne probleme u elektrodistributivnoj mreži (npr. pregrijavanje transformatora). Zbog svega navedenog, propisima su regulisana nelinearna izobličenja koja neki uređaj smije da proizvodi.

Elektromagnetna kompatibilnost uređaja i napojne mreže preklapa se sa pitanjima kvaliteta električne energije. Pod kvalitetom električne energije podrazumijeva se zadovoljenje određenih granica, prije svega u pogledu napona napajanja, čime se obezbijeduje da napajani uređaj-potrošač, ispravno radi. Ukoliko te granice nijesu zadovoljene, napajani uređaj može da radi pogrešno, prestane da radi ili da se pokvari. Parametri koji opisuju kvalitet električne energije su, između ostalog, neprekidnost napajanja potrošača, promjene napona (po efektivnoj vrijednosti, frekvenciji, ali i faznim razlikama kod trofaznih sistema), i sadržaj harmonika u talasnom obliku napona. U oblasti elektromagnetne kompatibilnosti pojam *total harmonic distortion (THD)* - ukupno harmonijsko izobličenje definiše se kao količnik efektivne vrijednosti svih viših harmonika i osnovnog (na osnovnoj učestanosti mrežnog napona). Međutim, THD se u nekim oblastima elektrotehnike definiše kao količnik efektivne vrijednosti svih viših harmonika i efektivne vrijednosti svih harmonika. Ako je THD mali, ove dvije definicije su praktično ekvivalentne.

Standardima je ograničeno harmonijsko izobličenje struje napajanja uređaja. Predviđena je kontrola harmonika učestanosti do 2kHz (do 40-og harmonika kada je osnovna učestanost 50 Hz). Standard IES 61000-2-2 definiše nivo kompatibilnosti za ukupno harmonijsko izobličenje napona mreže za napajanje od 8% [50].

Sumarno posmatrano, neki od negativnih efekata pojave viših harmonika su:

- Smetnje u upravljačkim kolima elektronskih uređaja,
- Smetnje u signalnim i komunikacionim kolima,
- Greške u mjerenju indukcionih vatmetara,
- Smetnje kod uređaja koji se kontrolišu signalima viših učestanosti,
- Vibracije kod obrtnih električnih mašina,
- Vibracije i buka kod transformatora i kalemova.

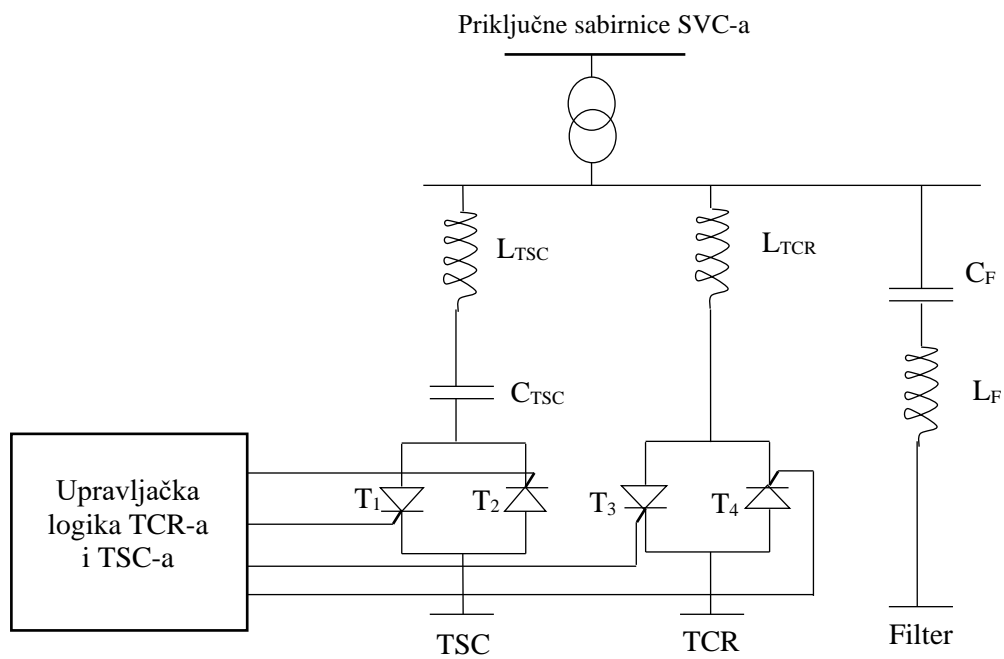
Nepovoljni efekti koji prate pojavu viših harmonika dužeg trajanja su [51]:

- Zagrijavanje kondenzatora.
- Javljaju se dodatni gubici (Džulovi) u mašinama (u namotajima statora) i transformatorima (u namotajima primara i sekundara) koji pojačavaju zagrijavanje.
- Povećavaju se gubici u gvožđu. Štaviše, kod obrtnih naizmjeničnih mašina dolazi i do pojave gubitaka u gvožđu rotora.
- Usljed dodatnih Džulovih gubitaka zagrijavaju se električni vodovi (nadzemni i podzemni).
- Pored svega toga, dolazi do povećavanja dielektričnih gubitaka u izolaciji.

U uslovima gdje se SVC obično primjenjuje, tj. u prenosnim i srednjenaponskim distributivnim mrežama, harmonijska distorzija napona je ograničena, pa je harmonijsko izobličenje uzrokovano SVC-om uglavnom posljedica rada tiristorskih ventila. Za rješavanje ovog problema se primjenjuju pasivni filteri. Ipak, u distributivnim mrežama niskog napona, ograničenja za harmonijska izobličenja napona (HDu) su veća od onih za srednji i visoki napon.

Kao jedna od osnovnih uloga funkcionalnog EES-a je svakako ispunjenje zahtjeva da se u sistem injektira „čista energija“, tj. struja osnovne učestanosti. S tim u vezi, a i da bi se riješili problemi koji su prethodno navedeni i koje prouzrokuje TCR komponenta, potrebno je dodati filter. Na osnovnoj šemi SVC-a se nalazi i priključni transformator, koji se veže između mreže i uređaja, a čije je postojanje važno zbog osjetljivih poluprovodničkih komponenata u SVC-u. Struktura takvog sistema prikazana je na slici 2.1. Ugradnjom filtera onemogućava se 'prodiranje' viših harmonika u elektroenergetski sistem. SVC po pravilu sadrži filtere za uklanjanje trećeg, petog i sedmog harmonika, dok se ostali harmonici višeg reda zanemaruju zbog vrlo malog uticaja na talasni oblik napona, odnosno struje u čvorištu u kome su

priključeni. Uglavnom se koriste tri vrste filtra za filtraciju viših harmonika struje: a) rezonantni, b) oslabljeni i c) aktivni filtri (sa poluprovodnicima). Uporedni prikaz tri vrste filtara dat je u Tabeli I.



Slika 2.1. Prikaz strukture SVC-a sa filterom

Tabela I - Uporedni pregled tri vrste filtera [51]

Vrsta filtera	Rezonantni	Oslabljeni	Aktivni
Opseg djelovanja	Na jednu učestanosti, veliki stepen smanjenja	na više učestanosti, manji stepen smanjenja harmonika struje svake od učestanosti	na više učestanosti, moguć veliki stepen smanjenja harmonika struje svake od učestanosti
Fleksibilnost/mogućnost podešavanja dejstva u toku rada	Ne postoji	Ne postoji	Potpuna fleksibilnost u okvirima ukupne nominalne struje
Opasnost od razdešenja/gubitka funkcije filtracije	Srednja	Mala	Ne postoji
Opasnost od preopterećenja	Realna	Realna	Ne postoji
Generisanje reaktivne snage osnovnog harmonika	Da	Da	Da, ali se ne isplati (treba ga koristiti samo ako preostane mogućnost strujnog opterećenja – do nominalne struje))
Kompleksnost	Srednje	Visoka	Veoma jednostavno
Cijena	Relativno niska	Relativno niska	Veoma visoka

Strujom prigušnice i vremenom provođenja TCR-a upravlja se putem tiristorskog prekidača. Tiristorima se upravlja putem ugla paljenja, a način regulacije zavisi od zahtjeva koji se postavljaju na TCR, odnosno na sam SVC. Regulacija je kontinuirano promjenljiva putem djelimičnog provođenja tiristora. Struja TCR-a može se kontinuirano mijenjati od nule (odgovara nultoj vrijednosti ugla provođenja), do maksimalne vrijednosti (ugao provođenja od 180°). Ugao paljenja označen je s α , dok je ugao provođenja tiristora označen sa σ . Ugao α može se mijenjati od 180° do 90° . Trenutna vrijednost struje i_{TCR} može se iskazati jednačinom:

$$i_{TCR} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\sqrt{2} \cdot V}{X_L} \cdot (\cos \alpha - \cos \omega t), \alpha < \omega t < \alpha + \sigma \\ 0, \alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi \end{array} \right\}, \quad (1)$$

gdje je V efektivna vrijednost priključenog napona, a X_L reaktansa osnovne frekvencije (fundamentalna reaktansa). Budući da se radi o nesinusoidalnom obliku struje TCR-a, prisutni su i viši harmonici koji negativno utiču na talasni oblik injektirane struje u

čvorištu priključka SVC-a, gdje se osnovna komponenta struje može iskazati jednačinom:

$$I_1 = B_{TCR}(\sigma) \cdot V, \quad (2)$$

gdje je $B_{TCR}(\sigma)$ regulacijska susceptansa TCR-a i u funkciji je ugla provođenja σ , što se može predstaviti jednačinom:

$$B_{TCR}(\sigma) = \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi \cdot X_L}, \quad (3)$$

Povezanost ugla provođenja i ugla paljenja može se iskazati jednačinom:

$$\sigma = 2 \cdot (\pi - \alpha). \quad (4)$$

Budući da struja i_{TCR} sadrži više harmonike, jednačinu (2) moguće je iskazati na način da se uzmu u obzir i viši harmonici (neparni). Rezultat je složeniji izraz za struju TCR-a koja u sebi objedinjuje i n -te harmonike prema relaciji:

$$I_n = \frac{V}{X_L} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \left[\frac{\sin \alpha \cdot \cos(n\alpha) - n \cdot \cos \alpha \cdot \sin(n\alpha)}{n \cdot (n^2 - 1)} \right], n = 2k + 1, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

Uticaj viših harmonika, a posebno se to odnosi za 13i, 15i, 17i i ostale, po pravilu se zanemaruje jer nema praktički nikakav uticaj na električne veličine u čvorištu priključka SVC-a. Problem nižih harmonika rješava se upotrebom različitih filtera (aktivnih ili pasivnih) koji se nalaze u samoj strukturi TCR-a, odnosno SVC-a. Budući da se SVC priključuje na sistem preko transformatora, nužno je da je SVC spojen u trougao, što rezultira prodiranjem tek 5. harmonika u sistem i svakog sljedećeg (neparnog). Što se tiče TSC-a, kada priključujemo kondenzator na naizmjenični sinusni napon, veliki iznos struje protekne kroz njega, ako je inicijalni napon na kondenzatoru različit od napona napajanja u samom trenutku uklapanja tiristora. Veličina promjene struje vrlo je visoka u odnosu na veličinu struje koju mogu podnijeti sami tiristori. Kako bi se ograničila ta promjena struje, nužno je umetnuti dodatnu prigušnicu u seriji s kondenzatorom i tiristorima L_{og} , a pored toga ona će onemogućiti i nastanak rezonancije s naizmjeničnom mrežom. Napon napajanja TSC-a definisan je izrazom:

$$v(t) = \sqrt{2} \cdot V \cdot \sin(\omega_0 t + \alpha), \quad (6)$$

gdje je ω kružna frekvencija. Pretpostavka je da se tiristori uklapaju u trenutku $t = 0$ s, s početnim uslovima definisanim sa:

$$i(t=0) = 0 \quad i \quad v_c(t=0) = V_{C0}. \quad (7)$$

Tada za struju TSC – a vrijedi:

$$i(t) = \sqrt{2} I_{AC} \cdot \cos(\omega_0 t + \alpha) - n \cdot B_C \cdot \left[V_{C0} - \frac{n^2}{n^2 - 1} \cdot \sqrt{2} \cdot V \cdot \sin \alpha \right] \cdot \sin(\omega_n t) - \sqrt{2} I_{AC} \cdot \cos \alpha \cdot \cos(\omega_n t), \quad (8)$$

gdje je:

$$I_{AC} = \frac{V \cdot B_C \cdot n^2}{n^2 - 1}, \quad (9)$$

Za parametre iz jednačina (8) i (9) važi:

$$n = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}, \quad \omega_n = n \cdot \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_{og} C_{isc}}}, \quad B_C = \frac{1}{X_C}. \quad (10)$$

Raspon vrijednosti napona V_{C0} kondenzatora kreće od 0 do (11).

$$\sqrt{2} V \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right). \quad (11)$$

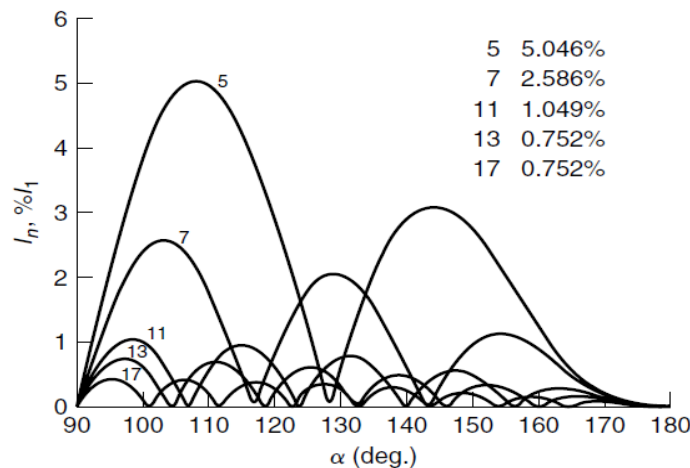
TCR djeluje kao promenljiva susceptansa. Promjena ugla paljenja direktno utiče na promjenu osnovne komponente struje, što dovodi do varijacije reaktivne snage koju apsorbuje reaktor jer je primijenjeni naizmjenični napon konstantan. Međutim, kako se ugao paljenja povećava preko 90° , struja postaje nesinusoidna i stvaraju se harmonici. Ako se dva tiristora aktiviraju simetrično u pozitivnom i negativnom poluciklusu, tada se proizvode samo neparne harmonijske komponente. Vrijednost rms harmonika n -tog reda izražena je kao funkcija od α u sljedećoj jednačini primjenjujući *Fourierovu* analizu:

$$I_n(\alpha) = \frac{V}{\omega L} \frac{2}{\pi} \left[-2 \frac{\cos \alpha}{n} \sin n\alpha + \frac{\sin(n-1)\alpha}{n-1} + \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} \right]$$

$$= \frac{V}{\omega L} \frac{4}{\pi} \left[\frac{\sin \alpha \cos(n\alpha) - n \cos \alpha \sin(n\alpha)}{n(n^2 - 1)} \right]$$
(12)

gdje je $n = 2k + 1$ i $k = 1, 2, 3, \dots$

Varijacija amplitude različitih harmonika prikazana je na slici 2.2. Vidi se da svi harmonici nemaju „pik“ pri istom uglu paljenja. Maksimalne vrijednosti raznih harmonijskih struja, svaka izražena u procentima od osnovne komponente, navedene su na slici 2.2.



Slika 2.2. Varijacija amplitude različitih harmonika [48]

Trofazni, 6-pulsni TCR sadrži tri jednofazna TCR-a povezana u trougao. Kalem u svakoj fazi je podijeljen na dvije polovine, po jedan na svakoj strani anti-paralelno spojenog tiristorskog para. Ako su naponi trofaznog napajanja izbalansirani, tri reaktorske jedinice identične, i takođe ako su svi tiristori simetrično otvoreni - s jednakim uglovima paljenja u svakoj fazi - tada impulsi simetričnih struja rezultiraju generisanjem samo neparnih harmonika. Procentualne vrijednosti harmonijskih struja u odnosu na onu osnovne učestanosti - i u fazama i što se tiče linijskih provodnika - su iste. Trougao kao veza tri jednofazna TCR-a sprečava da trostruki (tj. višestruki treći) harmonici prodiru u prenosne vodove. Otkazivanje 3-eg i višestrukih trećih

harmonika može se objasniti na sljedeći način: Neka su i_{ABn} , i_{BCn} i i_{CAn} fazne struje n -tog harmonika u odgovarajućim granama trougla, a neka su i_{An} , i_{Bn} i i_{Cn} linijske struje u odgovarajućim granama. Struje trećeg harmonika su izražene kao:

$$\begin{aligned}
 i_{AB3} &= a_3 \cos(3\omega t + \phi_3) \\
 i_{BC3} &= a_3 \cos\left(3\omega t + \phi_3 - 3\frac{2\pi}{3}\right) \\
 &= a_3 \cos(3\omega t + \phi_3 - 2\pi) \\
 i_{CA3} &= a_3 \cos\left(3\omega t + \phi_3 - 3\frac{4\pi}{3}\right) \\
 &= a_3 \cos(3\omega t + \phi_3 - 4\pi)
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Prema tome:

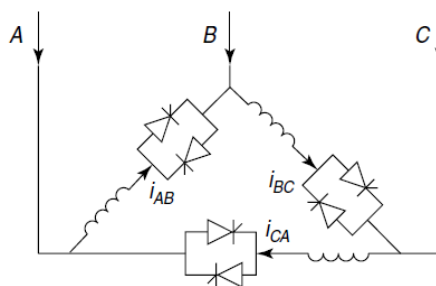
$$i_{AB3} = i_{BC3} = i_{CA3} \tag{14}$$

Sve tri struje su u fazi i kruže u trouglu sistema tiristora, formirajući sistem nulte sekvence. Iz toga slijedi da se struje trećeg harmonika smanjuju na nulu, kako slijedi:

$$i_{A3} = i_{AB3} - i_{CA3} = 0. \tag{15}$$

Takođe:

$$i_{B3} = 0, \quad i_{C3} = 0. \tag{16}$$



Slika 2.3. Fazne i linijske struje u trouglu [48]

Pobliža analiza otkriva da se ne samo treći harmonik, već i svi trostruki harmonici eliminišu. Stoga sve harmonijske komponente reda $3p + 3$, gdje je $p=0, 1, 2$,

3, . . . (3, 9, 15, 21, 27, itd.) ne mogu teći tokom uravnoteženog rada. Slična analiza može se uraditi za 5. i 7. harmonijsku struju. Za peti harmonik važi:

$$\begin{aligned}
 i_{AB5} &= a_5 \cos(5\omega t + \phi_5) \\
 i_{BC5} &= a_5 \cos\left(5\omega t + \phi_5 - 5\frac{2\pi}{3}\right) \\
 &= a_5 \cos\left(5\omega t + \phi_5 - \frac{4\pi}{3}\right) \\
 i_{CA5} &= a_5 \cos\left(5\omega t + \phi_5 - 5\frac{4\pi}{3}\right) \\
 &= a_5 \cos\left(5\omega t + \phi_5 - \frac{2\pi}{3}\right)
 \end{aligned} \tag{17}$$

Fazni pomaci za tri struje u trouglu jasno pokazuju da peti harmonik predstavlja sistem struja negativne sekvence. Isto važi za harmonike reda $6p + 5$, gdje je $p=0, 1, 2, 3, \dots$ (5, 11, 17, itd). Za 7. harmonik je:

$$\begin{aligned}
 i_{AB7} &= a_7 \cos(7\omega t + \phi_7) \\
 i_{BC7} &= a_7 \cos\left(7\omega t + \phi_7 - \frac{2\pi}{3}\right) \\
 i_{CA7} &= a_7 \cos\left(7\omega t + \phi_7 - \frac{4\pi}{3}\right)
 \end{aligned} \tag{18}$$

Fazni pomaci otkrivaju da 7i harmonik i svi ostali harmonici reda $6p + 1$, gdje je $p=0, 1, 2, 3, \dots$ (7, 13, 19, itd.) sačinjavaju sistem pozitivne sekvence. Prethodno navedeni strogi uslovi za uravnotežen rad možda neće biti u potpunosti ispunjeni u stvarnosti. Na primjer, kalemovi možda nijesu identični u sve tri faze ili naponi napajanja možda neće biti uravnoteženi. Ova neravnoteža rezultuje emitovanjem nekarakterističnih harmonika, uključujući trostruke harmonike u vodovima. Jačina ovih svojstvenih harmonika je u normalnim okolnostima neznatna, ali tokom težih poremećaja može doći do nejednakog paljenja tiristora u pozitivnoj i negativnoj poluperiodi. Ovo stanje rezultira stvaranjem jednosmjerne struje, koja je dovoljna da izazove zasićenost spojnog transformatora.

2.2. Simulacioni rezultati

Koristeći programski paket MATLAB-*Simulink*, i realizacijom dva simulaciona modela u istom, biće analiziran rad SVC uređaja. U prvom slučaju, analiziraće se rad SVC uređaja u uslovima promjene napona u mreži. S druge strane, u drugom primjeru, analiziraće se vrijednost viših harmonika u talasnom obliku struje SVC-a.

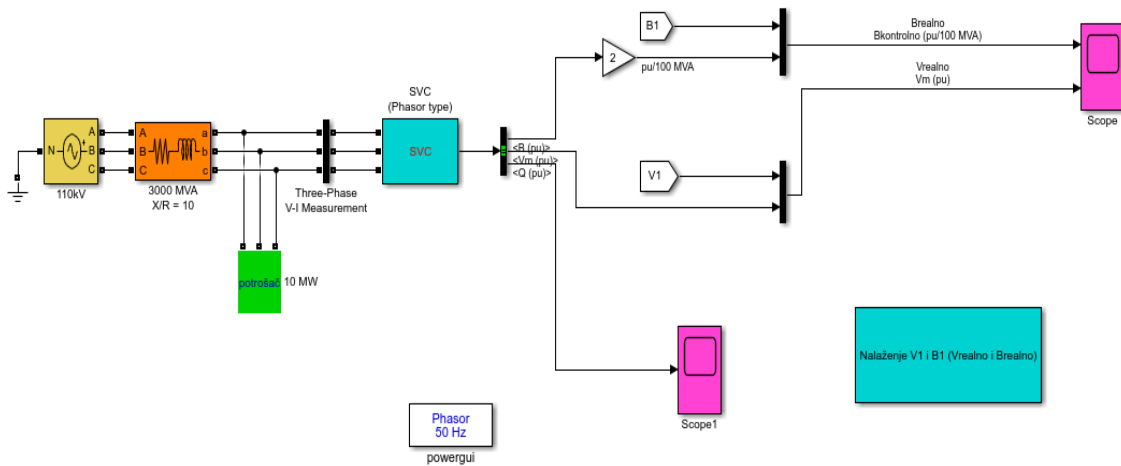
2.2.1. Rad SVC uređaja u EES-u u uslovima promjene napona

U cilju analize rada SVC uređaja u EES-u u uslovima promjene napona posmatrana je šema jednog prostog EES-a prikazana na slici 2.4. Na ovoj slici koristi se programabilni izvor napona, koji preko otporničko-induktivne mreže napaja jedan konstantan potrošač od 10 MW, zajedno sa SVC uređajem. U simulaciji je korišćen sistem 110 kV, 3000 MVA. Kad je napon sistema nizak, SVC generiše reaktivnu snagu (SVC je kapacitivni). Kad je napon sistema visok, SVC apsorbuje reaktivnu snagu (SVC je induktivan). Opseg SVC-a je podešen na +200 MVar kapacitivno i 100 MVar induktivno. Trajanje simulacije je podešeno na 3s.

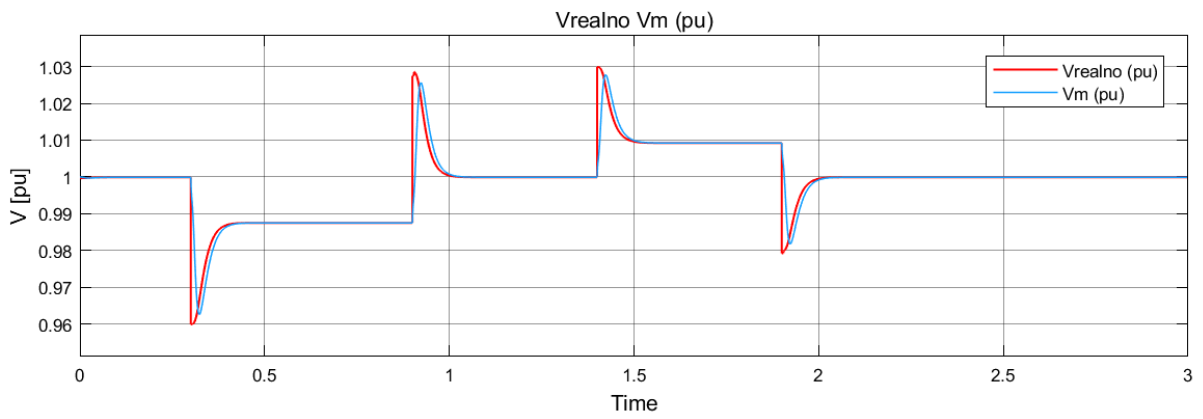
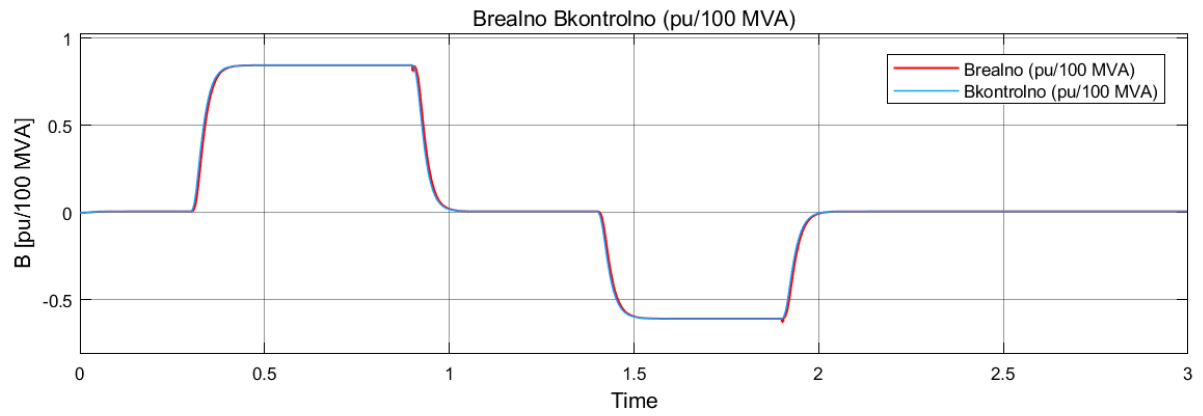
Trofazni programibilni izvor napona koristi se za promjenu napona u sistemu i posmatranje performansi, odnosno reakcija, SVC-a. U početku napon mreže je podešen na nazivnu vrijednost. Zatim se napon sukcesivno smanjuje (0.96 pu u $t = 0.3$ s), vraća se na 1 pu u $t = 0.9$ s, povećava se (1.03 pu u $t = 1.4$ s) i konačno se vraća na nazivni napon (1 pu u $t = 1.9$ s).

Na slici 2.4 prikazan je izgled simulacionog modela u Simulinku, sa svim pripadajućim blokovima. Na slici 2.5 prikazani su grafici koji pokazuju kako *Brealno*

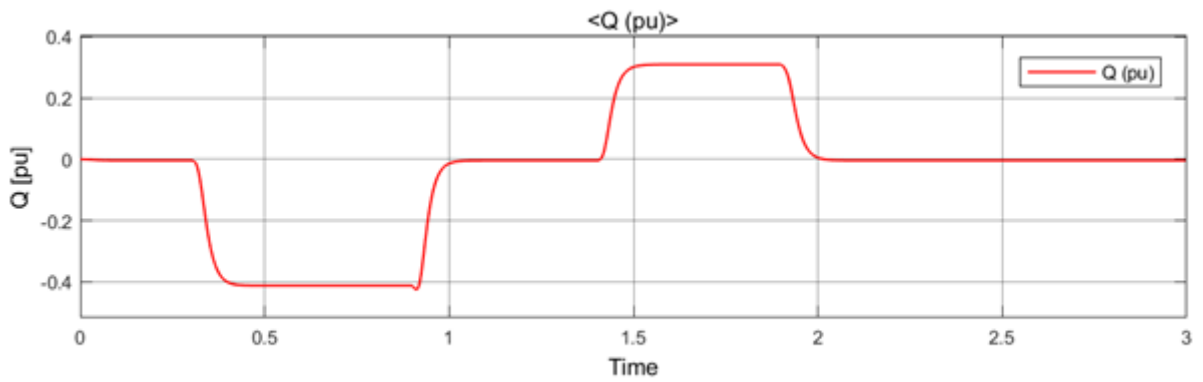
prati $B_{kontrolno}$ kontrolni signal iz regulatora napona, kao i kako V_{realno} prati V_m , koji predstavlja izlaz iz mjernog sistema SVC-a. Grafik na slici 2.6 je takođe zanimljiv, i najvažniji u ovoj simulaciji, jer pokazuje šta se dešava sa reaktivnom snagom SVC uređaja prilikom ovakvih manipulacija naponom, odnosno gdje se ona proizvodi, a gdje apsorbuje, tj.gdje je kapacitivna, a gdje induktivnog tipa.



Slika 2.4. Izgled simulacionog modela



Slika 2.5. Grafici B_1 i $B_{kontrolno}$, kao i V_1 i V_m



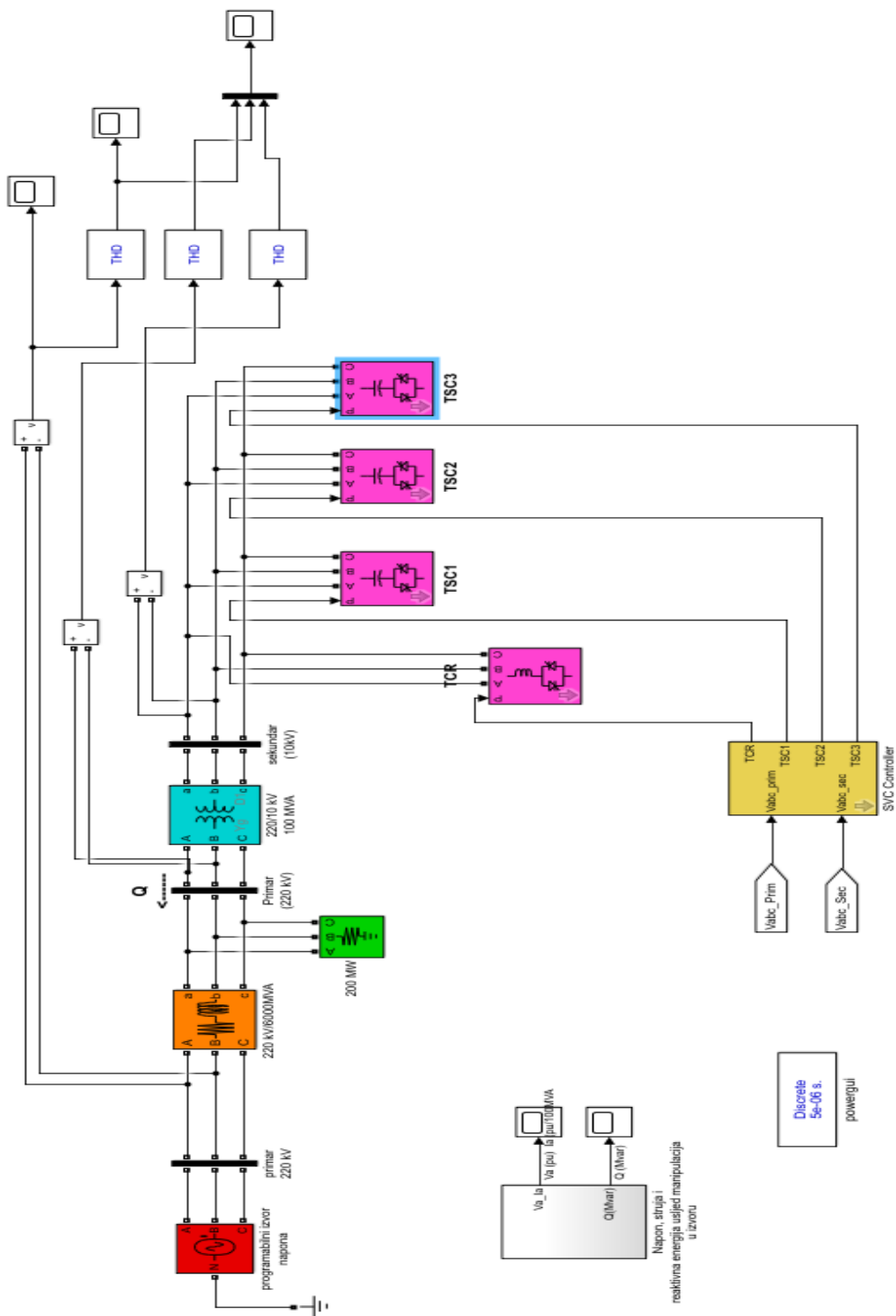
Slika 2.6. Reaktivna snaga SVC uređaja prilikom promjene napona

2.2.2. Harmonijska distorzija izlazne struje SVC uređaja

U drugom simulacionom modelu koristi se detaljan model SVC topologije koji uključuje tiristorski kontrolisanu prigušnicu (TCR) i tiristorski uklopivi kondenzator (TSC). U ovom slučaju korišćena je diskretna simulacija sa fiksnim vremenskim korakom od $50\mu\text{s}$. Izgled simulacionog modela prikazan je na slici 2.7.

Model se sastoji od 220 kV / 10 kV, 100 MVA spojnog transformatora, jednog TCR-a i tri bloka TSC-a (TSC1 TSC2 TSC3) povezane na sekundarnoj strani transformatora. Uključivanje i isključivanje TSC-ova omogućava diskretnu varijaciju sekundarne reaktivne kapacitivne snage, dok fazna kontrola TCR-a omogućava kontinuiranu promjenu induktivne snage.

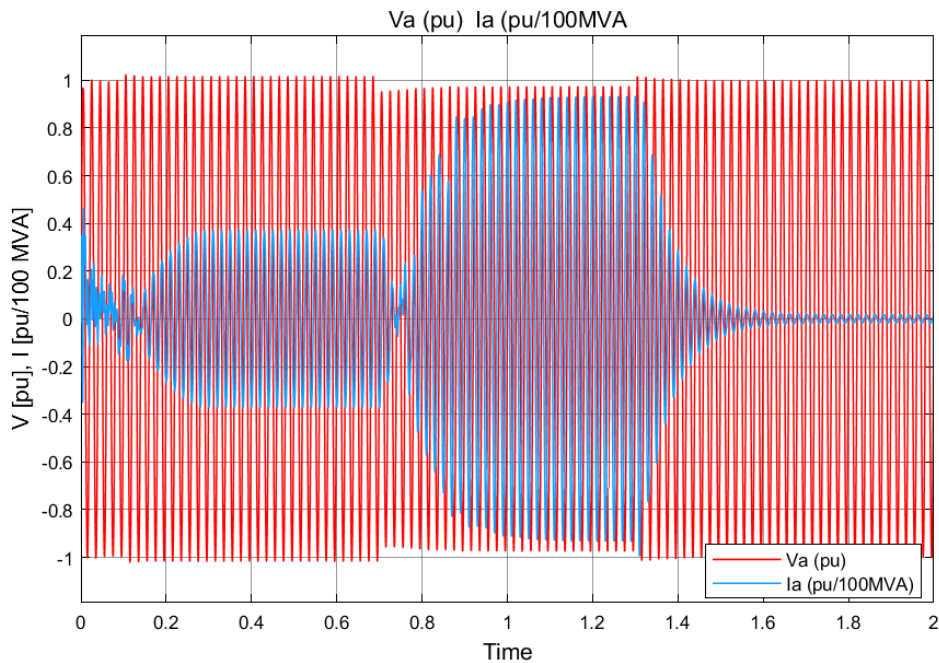
Svaki trofazni element povezan je u trougao, tako da se tokom normalnog uravnoteženog rada svi treći harmonici, i oni djeljivi sa 3, poništavaju sa stanovišta mreže. Izvor napona preko mreže napaja jedan konstantan potrošač snage 200 MW. Unutrašnji napon ekvivalentnog sistema može se mijenjati pomoću trofaznog programabilnog bloka izvora napona.



Slika 2.7. Izgled simulacionog modela

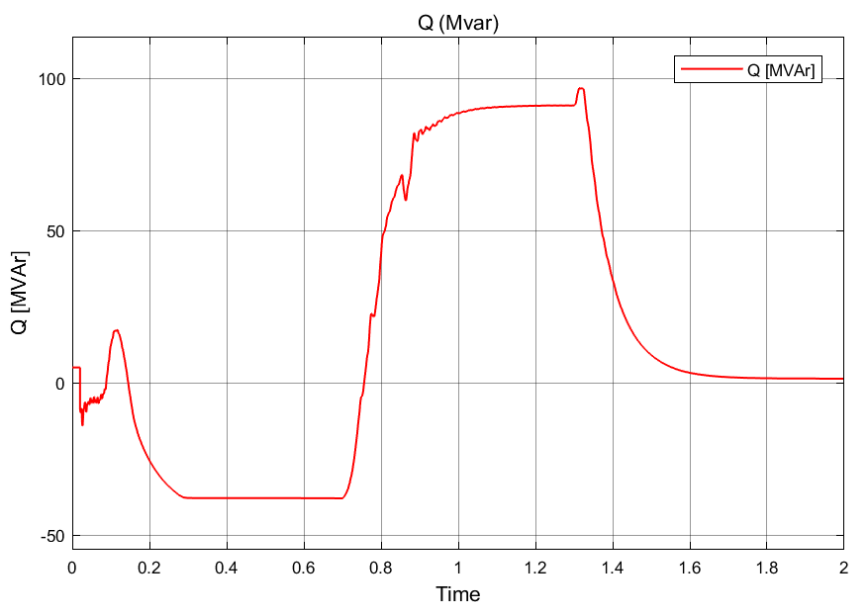
U početku je izvor napona podešen na 1 pu (referentni napon). Zatim se u trenutku $t=0.1$ s napon povećava na 1.02 pu. Ova radna tačka se dobija kada je TSC1 u

pogonu i TCR gotovo pri punoj provodljivosti, a reaktivna snaga se apsorbira. U $t = 0.7$ s napon se naglo smanjuje na 0.96 pu. U ovom slučaju, SVC reaguje generisanjem reaktivne. Konačno, u $t = 1.3$ s napon se povećava na 1.0 pu, a reaktivna snaga SVC-a se smanjuje na nulu. Oblik napona i struje, za vrijeme ovih manipulacija, kada je vrijeme simulacije podešeno na 2 s, može se vidjeti na slici 2.8, dok su već opisane promjene u reaktivnoj snazi prikazane na slici 2.9.

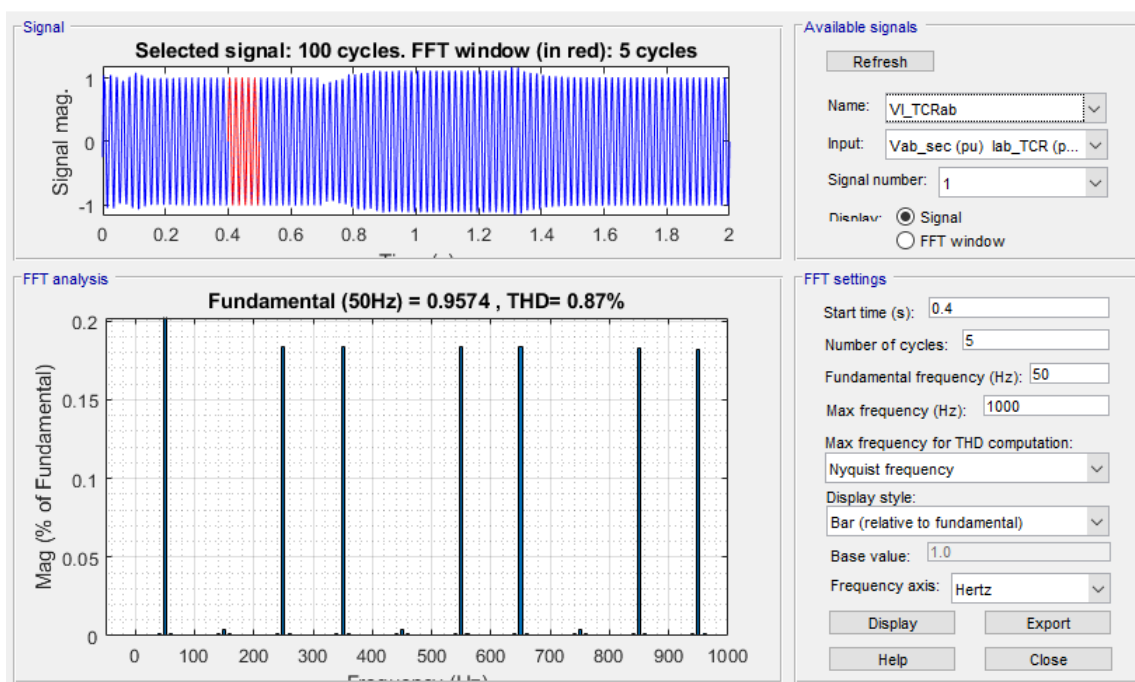


Slika 2.8. Promjene napona i struje usljed manipulacije naponom u izvoru

Kao što je već poznato, u normalnom pogonu TSC-ovi ne proizvode više harmonike, što ne važi za TCR komponentu SVC uređaja. Kako je TCR vezan u trougao, treći, kao i svi harmonici koji predstavljaju cjelobrojne umnoške trećeg harmonika, na taj način biće eliminisani, dok će se ostali neparni harmonici pojaviti, ali će njihove amplitude opadati sa povećanjem frekvencije. Prethodno naglašeno može se potvrditi posmatrajući sliku 2.10 na kojoj se vide amplitude viših harmonika koje TCR proizvodi, ali i vrijednost THD-a.



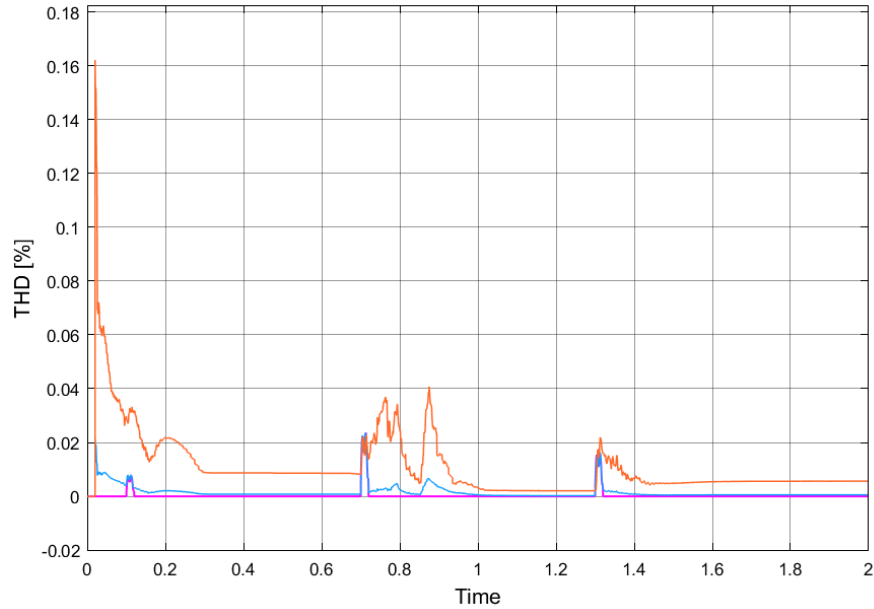
Slika 2.9. Promjene reaktivne snage SVC-a



Slika 2.10. Viši harmonici proizvedeni od strane TCR-a

Na slici 2.11 mogu se vidjeti rezultati tri proračuna THD blokova. Crvenom bojom označen je proračun THD-a za napone na primarnoj strani. Sasvim je jasno da su rezultati za ovaj slučaj najlošiji. Transformator kao element u mreži koji donekle „pegla“ talasne oblike napona, smanjujući uticaj viših harmonika vrši svoju ulogu što

je vidljivo u kasnijim rezultatima (plava i roza boja). TCR unosi dodatne male nečistoće, međutim rezultati su i dalje u granicama dozvoljenih (THD ispod 8% za napon), što je zadovoljavajuće.



Slika 2.11. Rezultati tri THD bloka

Simulacioni rezultati su pokazali da se pri upotrebi SVC uređaja javljaju harmonijska izobličenja i da je parametre komponenata uređaja potrebno izabrati na odgovarajući način kako bi se ova izobličenja eliminisala. Takođe, oba primjera su pokazala princip rada SVC uređaja sa stanovišta injektiranja i apsorbovanja reaktivne snage u uslovima smanjenja i povećanja napona, respektivno.

POGLAVLJE 3

GAMS

GAMS (eng. *General Algebraic Modeling System*) je program za matematičku optimizaciju. Ovaj program je dizajniran za modelovanje i rješavanje različitih vrsta problema - linearnih, nelinearnih, kao i problema sa cijelim brojevima. Jedne od glavnih karakteristika ovog programa su takođe njegova dostupnost za upotrebu na različitim računarskim platformama, dok su modeli prenosivi sa jedne platforme na drugu. Zbog toga je veoma popularan u oblasti naučnih istraživanja. Ovaj program omogućava korisnicima da implementiraju različite algoritme i kombinuju različite solvere. Još jedna važna dobra osobina GAMS programa je i što su razvijeni GAMS modeli opisani u sažetim, lako čitljivim algebarskim izrazima.

Treba napomenuti da je GAMS prvobitno dizajniran za aplikacije koje se odnose na ekonomiju i menadžment. Međutim, njegove veoma dobre karakteristike dovele su do toga da danas ovaj „alat“ koristi sve više pripadnika različitih inženjerskih i naučnih disciplina.

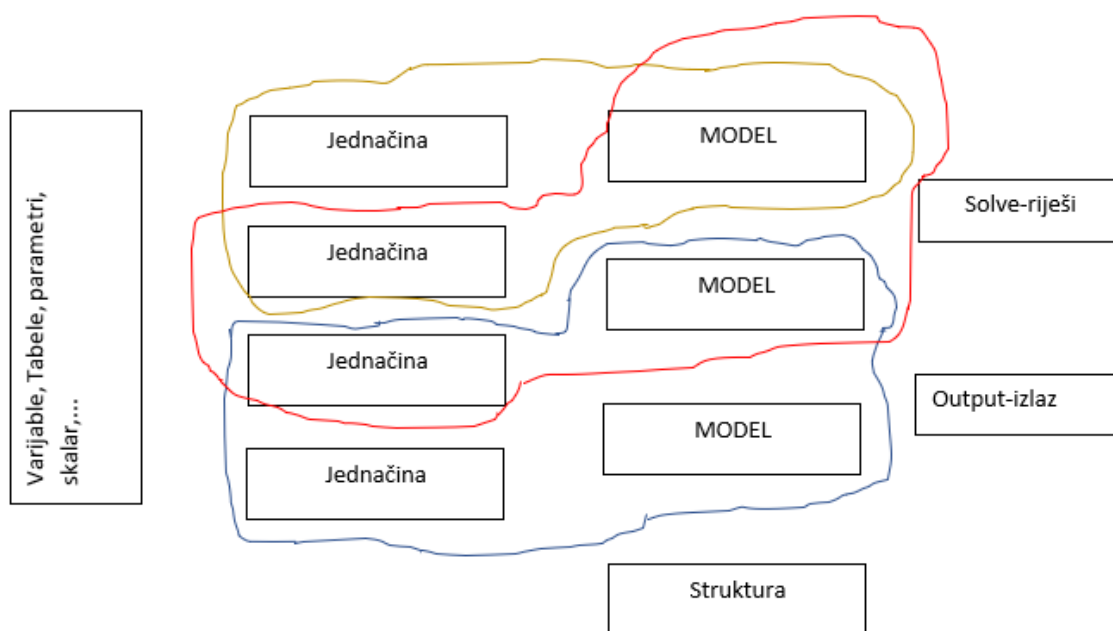
3.1. GAMS struktura

GAMS model sastoji se od sljedećih glavnih elemenata:

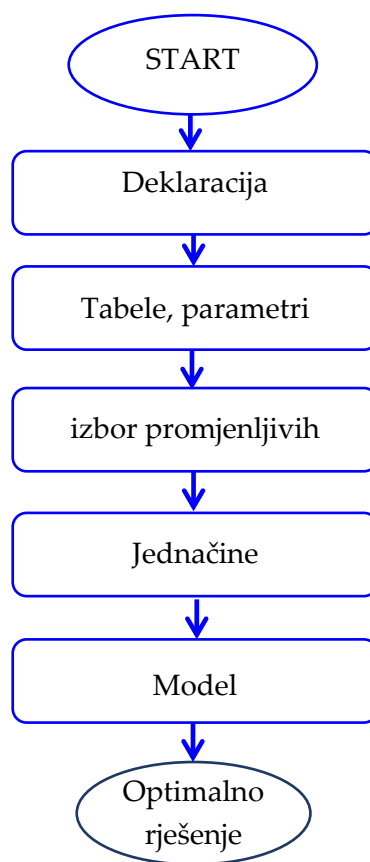
- **setovi,**
- *data-podaci,*

- *variables*-promjenljive,
- *equations*-jednačine,
- **model** i
- *output*.

Setovi se koriste za definisanje indeksa u modelima. Na primjer, ako rješavamo neki problem elektroenergetskog sistema pomoću GAMS-a, definišu se setovi generatorskih jedinica, setovi sabirnica itd. **Podaci** se mogu definisati u različitim tipovima: parametri (podaci se unose kao lista), tabele (podaci se unose kao tabela) ili skalar (ovo je poseban slučaj liste sa jednim elementom). **Varijable** su setovi odluka. U svakom slučaju, promjenljive treba definisati iako su nepoznate prije rješavanja modela. Uopšte, one mogu biti različitih tipova: slobodne, pozitivne, negativne, binarne i cijeli brojevi. Da bi se definisao odnos između podataka i promjenljivih, GAMS model zahtijeva definisanje **jednačina**. Ovaj dio se može realizovati kao jedna kompaktna jednačina, ili kao skup jednačina. Glavni dio programa je definicija funkcije cilja, koja takođe predstavlja određenu jednačinu. Međutim, u GAMS kodu **model** je zajednički naziv za set jednačina, koji takođe uključuje i ciljnu funkciju. Konačno, **output** predstavlja prezentaciju rezultata. Rezultati u GAMS-u mogu se zapisati / predstaviti u GAMS okruženju ili se mogu izvući u Excel datoteku. Iz tog razloga, GAMS je veoma popularan jer se rezultati zapisani u programu Excel mogu učitati sa mnogim drugim programima [41]. Struktura GAMS koda i elementi prikazani su na slici 3.1, dok je opšti dijagram toka GAMS koda prikazan na slici 3.2.



Slika 3.1. Opšta struktura GAMS koda



Slika 3.2. Opšti tok GAMS koda

3.2. Opšta pravila u GAMS-u

Program GAMS, kao i bilo koji drugi program, ima svoja pravila i karakteristike obilježavanja. Neka od njih su sljedeća:

- GAMS datoteka ima ekstenziju predstavljenu sufiksom „.gms“. Na primjer: „*OptimalPowerFlowProblem.gms*“.

- Svaki element (indeks, parametar, jednačina ...) prvo treba deklarirati. Nakon deklaracije, bilo koji od elemenata može se referencirati, dodijeliti ili koristiti.

- Uputstvo mora pratiti tačka i zarez (;). Na primjer, sljedeći red:

```
Parameter SOC0 (bus); SOC0 (bus) = 0,2 * SOCmax (bus);
```

definiše parametar *State of Charge* i definiše njegovu vrijednost, dok sve navedeno prate tačka i zarez.

- Red koji započinje sa * je komentar. Na primjer, sljedeća linija:

```
* Parameter SOC0 (bus);
```

predstavlja neki komentar o parametru *State Of Charge*.

- Prvi znak imena elementa mora biti abecedni. Takođe, ime elementa ima najviše 9 alfanumeričkih znakova.

- U GAMS-u se može naći puno rezervisanih reči. Na primjer, riječi „sets“, „parameter“ i tako dalje su rezervisane riječi.

3.3. Solver CONOPT

U GAMS-u je implementiran veliki broj solvera za modele matematičkog programiranja. Međutim, u GAMS-u možemo formulirati modele u mnogo različitih

tipova problemskih klasa. To znači da solver može biti sposoban da riješi više vrsta modela. Na primjer, solver BARON se može koristiti za rješavanje LP (*Linear Programming*), NLP (*Non-Linear Programming*), MIP (*Mixed Integer Programming*), i tako dalje.

Solver CONOPT jedan je od najefikasnijih solvera ugrađenih u GAMS programu za rješavanje problema iz oblasti koja se tiče elektroenergetskih sistema. Glavne karakteristike solvera CONOPT su sljedeće:

- dizajniran je za velike modele,
- pogodan je za modele sa nelinearnim ograničenjima,
- može da rješava druge izvode funkcija,
- iako je dizajniran za modele sa glatkim funkcijama, može se primijeniti i na modele koji nemaju diferencijabilne funkcije, i konačno,
- nudi vrlo brzo rješenje.

Solver CONOPT je implementiran kroz tri aktivne set metode. Prva metoda je metoda gradijentne projekcije; druga je algoritam sekvencijalnog linearnog programiranja, a treća metoda je algoritam sekvencijalnog kvadratnog programiranja. Ovaj solver ima „algoritamske prekidače“ koji automatski otkrivaju najbolji metod za rješavanje određenog problema. Iz tog razloga, CONOPT je veoma brz solver. Štaviše, traženo vrijeme računanja GAMS-a je znatno kraće u poređenju sa drugim tehnikama, poput različitih metoda metaheuristike. Kao primjer, upoređivanje vremena rješavanja problema optimalnog protoka snage između CONOPT solvera ugrađenog u GAMS programu i PSO (*Partical Swarm Optimzation*), GSA (*Gravitational Search Algorithm*), ABCA (*Artificial Bee Colony Algorithm*) i WDO (*Wind Driven Optimization*) predstavljeno u Tabeli II. U ovom slučaju koriste se standardne IEEE mreže za testiranje (9-sabirnica, 14-sabirnica i 30-sabirnica). Takođe, svi eksperimenti su realizovani na istom računaru (2,5 GHz Intel Core i7, 8 GB RAM-a) [26].

Tabela II - Poređenje vremena izvršenja za OPF (Optimal Power Flow) [26]

	Optimizacioni algoritam/solver	IEEE 9 testni sistem	IEEE 14 testni sistem	IEEE 30 testni sistem
Vrijeme izvršenja u [s] za funkciju minimizacije troškova goriva (MFC)	PSO	2.126728	5.314809	17.82697
	GSA	2.244032	6.164463	18.86064
	ABC	4.474348	12.99995	38.64705
	WDO	1.689555	6.232187	18.63043
	GAMS/CONOPT	0.078	0.085	0.093
Vrijeme izvršenja u [s] za funkciju minimizacije ukupnih gubitaka snage (MTPL)	PSO	2.59023	6.069107	16.93375
	GSA	2.273988	6.343528	18.92881
	ABC	4.57543	13.23358	38.05651
	WDO	2.289727	6.504237	19.09615
	GAMS/CONOPT	0.073	0.075	0.092

Primjer:

Da bi se bolje predstavila sintaksa GAMS-a, ali i dolazak do rezultata preko ovog programa, u ovom dijelu je predstavljen jedan konkretan problem koji je opisan na sljedeći način:

Pronalaženje minimalne vrijednosti ciljne funkcije (OF):

$$OF = x_1 + 3x_2 + 5x_3$$

ako je:

$$x_1 + x_2 \geq 4$$

$$x_3 + x_2 \geq 6$$

$$x_1 + 2x_3 = 2$$

Formulacija predstavljenog problema u GAMS okruženju predstavljena je na slici 3.3. Na ovoj slici su takođe dati komentari o svim dijelovima koda.

The screenshot shows a GAMS IDE window with the following code and annotations:

```

Variables x1, x2, x3, OF;

Equations eq1, eq2, eq3, eq4;

eq1.. OF=e=x1+3*x2+5*x3;
eq2.. x1+2*x2=g=4;
eq3.. x3+x2=g=6;
eq4.. x1+2*x3=e=2;

Model BASICEXAMPLE1 /all/;

Solve BASICEXAMPLE1 using LP min OF;

Display x1.l, x2.l, x3.l, OF.l;

```

Annotations (from top to bottom):

- Definicija varijabli (points to `Variables` line)
- Definicija jednačina (points to `Equations` line)
- Formulacija „e=“ znači „jednako je“... (points to `eq1..`)
- Formulacija „g=“ znači „veće od“ (points to `eq2..`)
- Definicija imena GAMS modela (points to `Model` line)
- Ovo znači—mi rješavamo model čije je ime BASICEXAMPLE1; koristeći linearno programiranje, i cilj je da se minimizuje objektna funkcija OF (points to `Solve` line)
- Prikaz rezultata (points to `Display` line)
- Simbol „.l“ znači „level“ vrijednost (points to `x1.l` in `Display` line)

Slika 3.3. Primjer GAMS koda

Nakon pokretanja razvijenog GAMS koda, dobijaju se rezultate. U konkretnom slučaju, rješenje posmatranog matematičkog zadatka predstavljeno je na slici 3.4.

```

General Algebraic Modeling System
Execution

----      14 VARIABLE x1.L          =      -3.000
          VARIABLE x2.L          =       3.500
          VARIABLE x3.L          =       2.500
          VARIABLE OF.L          =      20.000

EXECUTION TIME      =      0.000 SECONDS      3 MB

```

Slika 3.4. Rješenje posmatranog matematičkog problema

POGLAVLJE 4

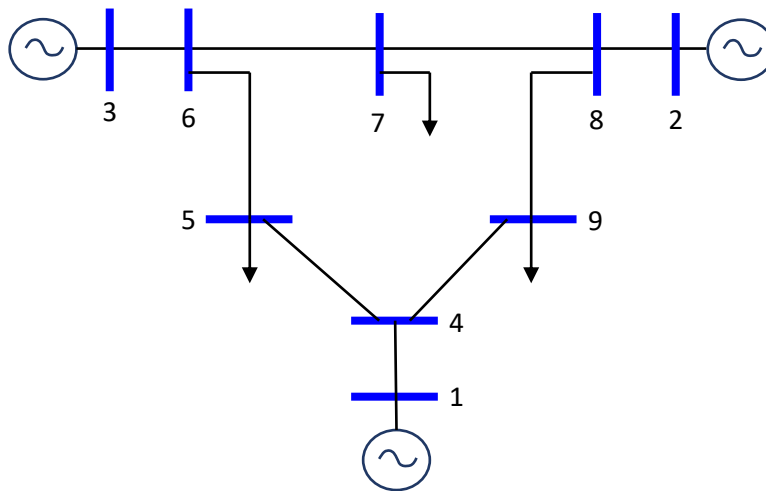
OPTIMALNA LOKACIJA SVC UREĐAJA U EES-U

U ovom poglavlju bavićemo se pronalaženjem optimalne lokacije, tj. čvora EES u koji treba da se priključi SVC uređaj. U tom cilju biće posmatrane IEEE 9-testna i IEEE 30-testna mreža, dok je ciljna funkcija minimizacija gubitaka aktivne snage, u prvom slučaju, i minimizacija devijacije napona, u drugom slučaju. Prvo je izračunat optimalni protok snage za testne sisteme bez SVC uređaja. Poslije toga je u svaki čvor redom priključen SVC uređaj i pronađena je optimalna lokacija i optimalna vrijednost SVC uređaja pri kojoj su ukupni gubici snage (ali i odstupanje naponskog profila) minimalni. Svi proračuni su rađeni za slučaj sa i bez vjetrogeneratora u mreži, kao obnovljivog izvora energije. Informacije o testnim elektroenergetskim mrežama, generatorima, vodovima, kao i brzini vjetra date su detaljno u ovom poglavlju. Svi proračuni su rađeni u programu GAMS, korišćenjem ugrađenog solvera CONOPT. Neki dijelovi samog koda algoritma za optimizaciju dati su u nastavku, radi jasnoće i boljeg razumijevanja procesa dobijanja rezultata.

4.1. Podaci o elektroenergetskim mrežama

U narednom dijelu teksta biće opisane elektroenergetske mreže na kojima su se vršili proračuni - IEEE testne mreže sa 9 i 30 čvorova.

Slika 4.1. prikazuje standardnu IEEE 9-testnu mrežu sa tri generatora u čvorovima 1, 2 i 3 sa maksimalnom snagom od 250, 300 i 270 MW, respektivno. U ovoj mreži postoje tri potrošača, u čvorovima 5, 7 i 9. Podaci o mreži dati su u sljedećim tabelama, koje su date u vidu slika iz modela iz programa GAMS. Slika 4.2 prikazuje podatke generatora, slika 4.3 podatke sabirnica, dok su na slici 4.4 prikazani podaci o prenosnim vodovima.



Slika 4.1. Izgled IEEE 9- testne mreže

```

table podaci_Generatora (*,*) "Podaci o generatorima"
    uCvoru  Pmax  Pmin  col  co2  co3  Qmax  Qmin  RU  RD
1          1    250   10  150   5    0.11  300  -300  15  15
2          2    300   10  600  1.2  0.085  300  -300  25  25
3          3    270   10  335   1    0.1225  300  -300  30  30
;

```

Slika 4.2. Podaci o generatorima za IEEE 9-testnu mrežu

```

table podaci_Sabirnica (*,*) "Podaci o sabirnicama"
      tip    Pd    Qd    maxVm    minVm
1       3     0     0     1.1     0.9
2       2     0     0     1.1     0.9
3       2     0     0     1.1     0.9
4       1     0     0     1.1     0.9
5       1    90    30     1.1     0.9
6       1     0     0     1.1     0.9
7       1   100    35     1.1     0.9
8       1     0     0     1.1     0.9
9       1   125    50     1.1     0.9
;

```

Slika 4.3. Podaci o sabirnicama za IEEE 9-testnu mrežu

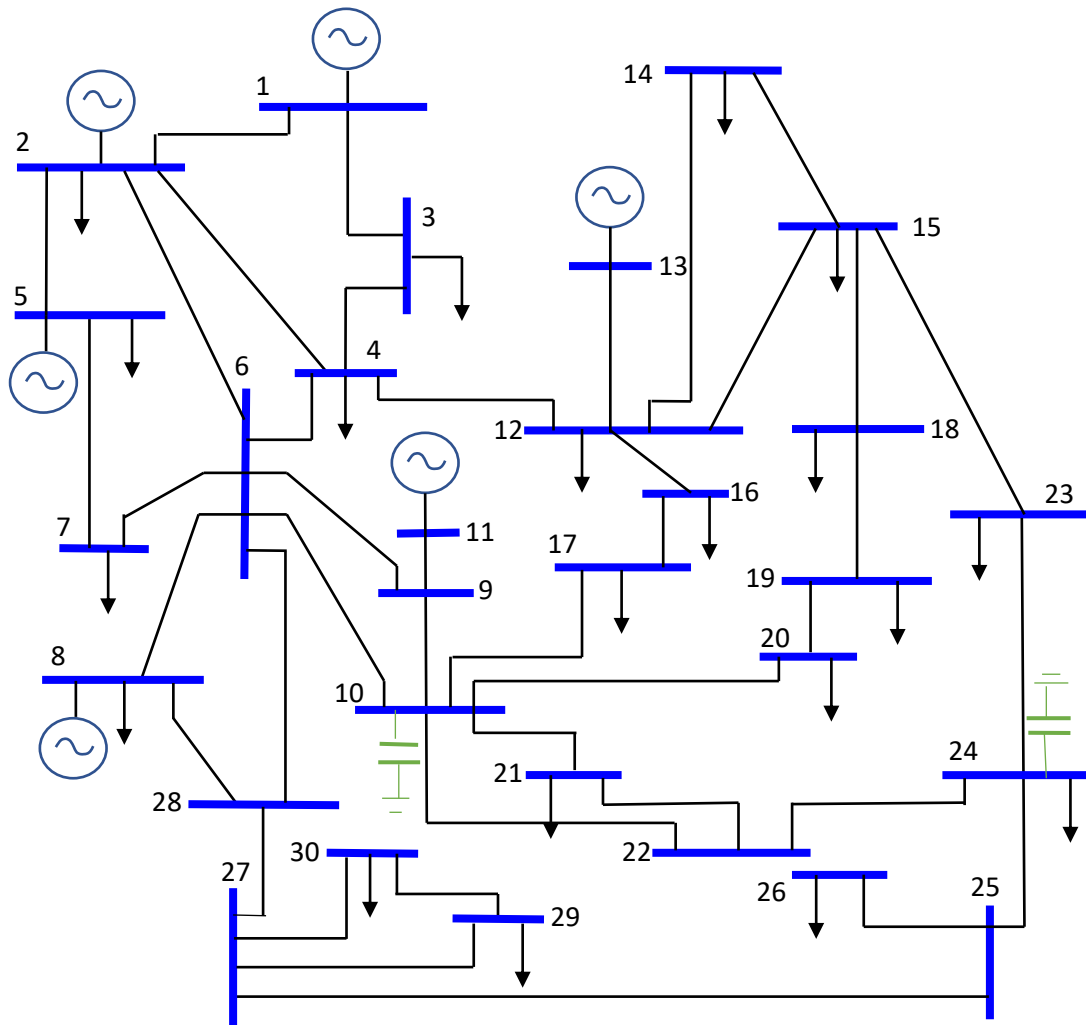
```

table line_Data (*,*,*,*) "Transmission line data"
      BusStatus    R    X    Bc    Ratio    Pij_max    Asngle
1.4.1             1     0  0.0576    0         1         250     0
3.6.1             1     0  0.0586    0         1         300     0
4.5.1             1  0.017  0.092  0.158         1         250     0
5.6.1             1  0.039  0.17  0.358         1         150     0
6.7.1             1  0.0119  0.1008  0.209         1         150     0
7.8.1             1  0.0085  0.072  0.149         1         250     0
8.2.1             1     0  0.0625    0         1         250     0
8.9.1             1  0.032  0.161  0.306         1         250     0
9.4.1             1  0.01  0.085  0.176         1         250     0
;

```

Slika 4.4. Podaci o prenosnim vodovima za IEEE 9-testnu mrežu

Slika 4.5 prikazuje standardnu IEEE 30-testnu mrežu sa šest generatora koji se nalaze u čvorovima 1, 2, 5, 8, 11 i 13. U ovoj mreži postoji takođe i 21 potrošač. Podaci o mreži dati su u sljedećim tabelama, koje su, kao i za prethodnu mrežu, ovdje date u vidu slika iz modela iz programa GAMS. Slika 4.6 prikazuje podatke generatora, slika 4.7 podatke sabirnica, dok su na slici 4.8 prikazani podaci o prenosnim vodovima.



Slika 4.5. Izgled IEEE 30-testne mreže

```
table podaci_Generatora (*,*) "Podaci o generatorima"
uCvoru Pmax Pmin col co2 co3 Qmax Qmin RU RD
1 1 200 50 0 2 0.00375 200 -20 65 85
2 2 80 20 0 1.75 0.0175 100 -20 12 22
3 5 50 15 0 1 0.0625 80 -15 12 15
4 8 35 10 0 3.25 0.00834 60 -15 8 16
5 11 30 10 0 3 0.025 50 -10 6 9
6 13 40 12 0 3 0.025 60 -15 8 16
;
```

Slika 4.6. Podaci o generatorima za IEEE 30-testnu mrežu


```
table podaci_Sabirnica (*,*) "Podaci o sabirnicama"
```

	tip	Pd	Qd	maxVm	minVm
1	3	0	0	1.10	0.90
2	2	21.7	12.7	1.10	0.90
3	1	2.4	1.2	1.10	0.90
4	1	7.6	1.6	1.10	0.90
5	2	94.2	19	1.10	0.90
6	1	0	0	1.10	0.90
7	1	22.8	10.9	1.10	0.90
8	2	30	30.0	1.10	0.90
9	1	0	0	1.10	0.90
10	1	5.8	2.0	1.10	0.90
11	2	0	0	1.10	0.90
12	1	11.2	7.5	1.10	0.90
13	2	0	0	1.10	0.90
14	1	6.2	1.6	1.10	0.90
15	1	8.2	2.5	1.10	0.90
16	1	3.5	1.8	1.10	0.90
17	1	9	5.8	1.10	0.90
18	1	3.2	0.9	1.10	0.90
19	1	9.5	3.4	1.10	0.90
20	1	2.2	0.7	1.10	0.90
21	1	17.5	11.2	1.10	0.90
22	1	0	0	1.10	0.90
23	1	3.2	1.6	1.10	0.90
24	1	8.7	6.7	1.10	0.90
25	1	0	0	1.10	0.90
26	1	3.5	2.3	1.10	0.90
27	1	0	0	1.10	0.90
28	1	0	0	1.10	0.90
29	1	2.4	0.9	1.10	0.90
30	1	10.6	1.9	1.10	0.90

Slika 4.7. Podaci o sabirnicama za IEEE 30-testni sistem

```

table line_Data (*,*,*,*) "Podaci o vodovima"
      statusVoda      R      X      Bc      odnos      Pij_max      ugao
1.2.1      1      0.0192      0.0575      0.0528      1      130      0
1.3.1      1      0.0452      0.1852      0.0408      1      130      0
2.4.1      1      0.057      0.1737      0.0368      1      65      0
3.4.1      1      0.0132      0.0379      0.0084      1      130      0
2.5.1      1      0.0472      0.1983      0.0418      1      130      0
2.6.1      1      0.0581      0.1763      0.0374      1      65      0
4.6.1      1      0.0119      0.0414      0.009      1      90      0
5.7.1      1      0.046      0.116      0.0204      1      70      0
6.7.1      1      0.0267      0.082      0.017      1      130      0
6.8.1      1      0.012      0.042      0.009      1      32      0
6.9.1      1      0      0.208      0      1.078      65      0
6.10.1     1      0      0.556      0      1.069      32      0
9.11.1     1      0      0.208      0      1      65      0
9.10.1     1      0      0.11      0      1      65      0
4.12.1     1      0      0.256      0      1.032      65      0
12.13.1    1      0      0.14      0      1      65      0
12.14.1    1      0.1231      0.2559      0      1      32      0
12.15.1    1      0.0662      0.1304      0      1      32      0
12.16.1    1      0.0945      0.1987      0      1      32      0
14.15.1    1      0.221      0.1997      0      1      16      0
16.17.1    1      0.0824      0.1932      0      1      16      0
15.18.1    1      0.107      0.2185      0      1      16      0
18.19.1    1      0.0639      0.1292      0      1      16      0
19.20.1    1      0.034      0.068      0      1      32      0
10.20.1    1      0.0936      0.209      0      1      32      0
10.17.1    1      0.0324      0.0845      0      1      32      0
10.21.1    1      0.0348      0.0749      0      1      32      0
10.22.1    1      0.0727      0.1499      0      1      32      0
21.22.1    1      0.0116      0.0236      0      1      32      0
15.23.1    1      0.1      0.202      0      1      16      0

22.24.1    1      0.115      0.179      0      1      16      0
23.24.1    1      0.132      0.27      0      1      16      0
24.25.1    1      0.1885      0.3292      0      1      16      0
25.26.1    1      0.2544      0.38      0      1      16      0
25.27.1    1      0.1093      0.2087      0      1      16      0
28.27.1    2      0      0.396      0      1.068      65      0
27.29.1    1      0.2198      0.4153      0      1      16      0
27.30.1    1      0.3202      0.6027      0      1      16      0
29.30.1    1      0.2399      0.4533      0      1      16      0
8.28.1     1      0.0636      0.2      0.0428      1      32      0
6.28.1     1      0.0169      0.0599      0.013      1      32      0
;
```

Slika 4.8. Podaci o prenosnim vodovima za IEEE 30-testnu mrežu

4.2. Osnovne jednačine za minimizaciju gubitaka i devijacije napona

Ulogu optimizacione funkcije (OF) kod optimalnih tokova snage u EES-u mogu igrati: cijena, devijacija napona, smanjenje emisije CO₂, gubici aktivne snage ili se funkcija optimizacije može postaviti kao kombinacija prethodnih sa odgovarajućim faktorom zastupljenja svake od njih.

U ovom radu posmatrana su dva slučaja. U prvom slučaju optimizaciona funkcija je predstavljena u vidu minimizacije gubitaka aktivne snage, dok u drugom slučaju njenu ulogu igra devijacija napona. Funkcije koje se obrađuju su, dakle *minimization of total power losses* (MTPL)-minimizacija ukupnih gubitaka snage i *minimization of total voltage deviation* (MTVD)-minimizacija devijacije napona, Ove funkcije se mogu predstaviti na sljedeći način:

$$MTPL = \sum_{i,j \in N_b} G_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2 \cdot V_i \cdot V_j \cdot \cos(\delta_{ij})), [MW] \quad (1)$$

$$MTVD = \sum_{i \in N_b} \frac{(1-V_i)^2}{V_i^2} [pu] \quad (2)$$

gdje je N_b broj čvorova, $i, j=1, \dots, N_b$, G_{ij} je konduktansa između čvorova i i j ; V_i i V_j su naponi i -og i j -og čvora, respektivno, i δ_{ij} je razlika između uglova napona čvorova i i j .

Implementacije prethodnih jednačina u GAMS-u su sljedeće:

```
sum((i,j,t),g(i,j)/2*(V(i,t)*V(i,t)+V(j,t)*V(j,t)-2*V(i,t)*V(j,t)*cos(delta(j,t)-delta(i,t))))
|sum((i,t),(1-V(i,t))/V(i,t)*(1-V(i,t))/V(i,t))
```

Balansne jednačine aktivne i reaktivne snage u čvorovima su date sljedećim jednačinama:

$$P_{bus,t}^g + P_{bus,t}^w - P_{bus,t}^L = \sum_{node} P_{bus,node,t}, \quad (3)$$

$$Q_{bus,t}^g - Q_{bus,t}^L = \sum_{node} Q_{bus,node,t} \quad (4)$$

gdje $P_{bus,node,t}$ i $Q_{bus,node,t}$ reprezentuju aktivnu i reaktivnu snagu kroz vodove, respektivno. $P_{bus,t}^g$ and $Q_{bus,t}^g$ predstavljaju aktivnu i reaktivnu snagu generatora, respektivno. $P_{bus,t}^W$ je snaga vjetra, i $P_{bus,t}^L$ i $Q_{bus,t}^L$ su aktivna i reaktivna snaga potrošača, respektivno.

Aktivna i reaktivna snaga vodova, se računa preko sljedećih izraza, respektivno:

$$P_{ij} = G_{ij}U_i^2 - U_iU_j \left[G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}) \right], \quad i, j \in N_b \wedge i \neq j \quad (5)$$

$$Q_{ij} = -U_i^2 \left(B_{ij} + \frac{B_{Cij}}{2} \right) - U_iU_j \left[G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}) \right], \quad i, j \in N_b \wedge i \neq j \quad (6)$$

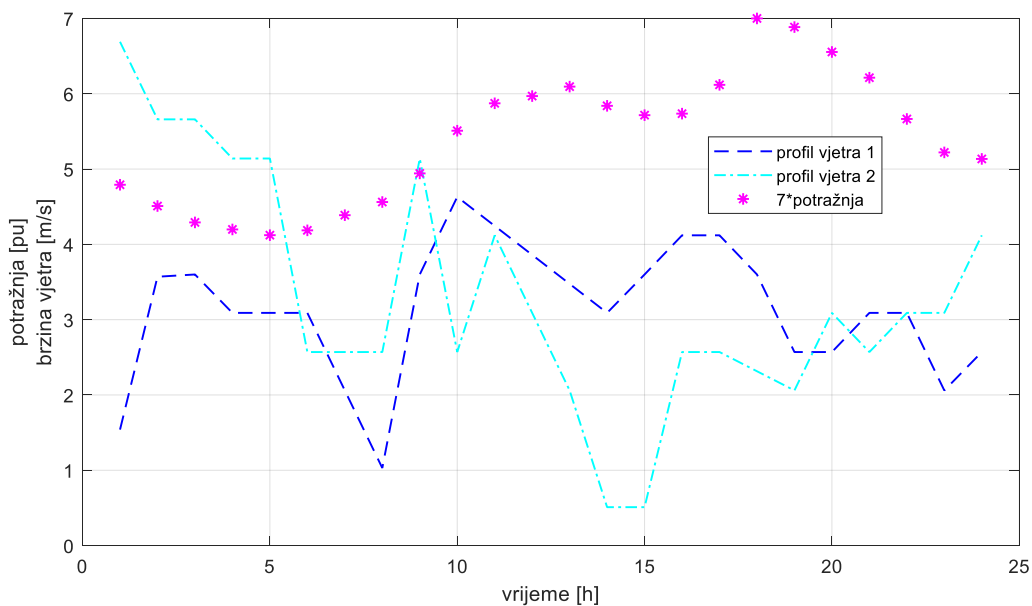
Međutim, svaki optimizacioni problem ima određena ograničenja. U ovom slučaju, mora se obratiti pažnja na to koja su tehnička ograničenja. Na primjer, tu se prije svega misli na ograničenja maksimalne snage mreže, minimalne i maksimalne aktivne i reaktivne snage koje mogu proizvesti generatori, dok termalne jedinice i vodovi imaju svoja ograničenja koja su data na sljedeći način:

$$\begin{aligned} -S_{bus,node}^{\max} &\leq S_{bus,node,t} \leq S_{bus,node}^{\max} \\ P_g^{\min} &\leq P_{g,t} \leq P_g^{\max} \\ Q_g^{\min} &\leq Q_{g,t} \leq Q_g^{\max} \\ P_{g,t} - P_{g,t-1} &\leq RU_g \\ P_{g,t-1} - P_{g,t} &\leq RD_g \end{aligned} \quad (7)$$

gdje je $S_{maxbus,node}$ maksimalna prividna snaga, koja može teći kroz prenosni vod u [MVA]. Aktivna i reaktivna snaga su limitirane gornjom i donjom granicom snage, koju generatorske jedinice mogu da proizvedu. Kako svaka termalna jedinica ima koeficijent porasta snage odnosno pada snage, isti su limitirani sa koeficijentima *ramp-up* (RU_g) i *ramp-down* (RD_g).

4.3. Profil vjetra i izlazna snaga vjetroturbine

Kod traženja optimalne lokacije SVC uređaja, posmatrana je i mreža koja sadrži vjetrogenerator. Talasni oblici vjetra dati su na slici 4.9. Takođe, grafička prezentacija krive opterećenja u roku od 24h data je na slici 4.9. Naime, na ovoj slici su data dva profila vjetra i to iz dva realna slučaja za datume 01.12.2019. i 5.1.2020. godine, za grad Dharan (Nepal).

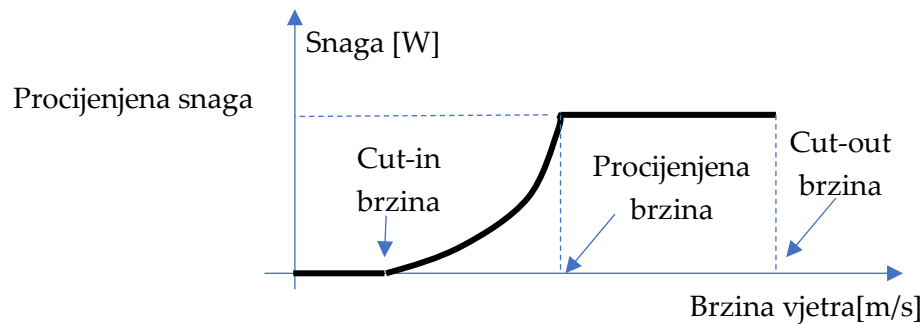


Slika 4.9. Grafici dva profila vjetra i profila opterećenja

Snaga vjetra je izračunata preko sljedećeg obrasca:

$$P_{w,t} = \begin{cases} 0 & w_t < w_{CI} \quad \text{or} \quad w_t \geq w_{CO} \\ P_w^{\max} \frac{w_t - w_{CI}}{w_R - w_{CI}} & w_{CI} \leq w_t < w_R \\ P_w^{\max} & w_R \leq w_t < w_{CO} \end{cases} \quad (8)$$

gdje je P^{max_w} procijenjena snaga vjetra, w_t brzina vjetra u trenutku t , w_{CI} je *cut-in* brzina vjetra, w_{CO} je *cut-out* brzina vjetra i w_R procijenjena brzina vjetra. Slika 4.10 prikazuje kako se izlazna snaga vjetra mijenja sa brzinom vjetra za vjetro-turbinu.



Slika 4.10. Tipična kriva zavisnosti snage vjetra od brzine vjetra

4.4. REZULTATI

U ovom potpoglavlju, određivanje optimalne lokacije SVC uređaja u EES-u, kao i vrijednost optimalne snage, sprovedeno je za nekoliko slučajeva:

- SLUČAJ 1 – optimalna lokacija SVC uređaja za konstantno opterećenje kada su optimizaciona funkcija ukupni gubici snage (OF=MTPL)

- SLUČAJ 2 – optimalna lokacija SVC uređaja za varijabilno opterećenje u sistemu bez vjetroelektrane kada su optimizaciona funkcija ukupni gubici aktivne snage (OF=MTPL)

- SLUČAJ 3 – optimalna lokacija SVC uređaja za varijabilno opterećenje u sistemu sa vjetroelektranom kada je optimizaciona funkcija ukupni gubici aktivne snage (OF=MTPL)

- SLUČAJ 4 - optimalna lokacija SVC uređaja za konstantno opterećenje kada je optimizaciona funkcija devijacija napona (OF=MTVD)

- SLUČAJ 5 - optimalna lokacija SVC uređaja za varijabilno opterećenje u sistemu bez vjetroelektrane kada je optimizaciona funkcija devijacija napona (OF=MTVD)

- SLUČAJ 6 - optimalna lokacija SVC uređaja za varijabilno opterećenje u sistemu sa vjetroelektranom kada je optimizaciona funkcija devijacija napona (OF=MTVD)

4.4.1. SLUČAJ 1 – optimalna lokacija SVC uređaja za konstantno opterećenje (OF=MTPL)

Rezultati optimalnih tokova snage u cilju minimizacije gubitaka za IEEE testne sisteme sa 9 i 30 čvorova bez SVC uređaja, dati su u Tabelama III i IV, respektivno. Nakon toga sproveden je sljedeći postupak - SVC uređaj je priključivan u svaki, negeneratorski čvor, redom, i za svaku poziciju je proračunavata vrijednost reaktivne snage SVC uređaja pri kojoj su gubici u mreži minimalni. Na taj način, nađena je optimalna lokacija, kao i optimalna reaktivna snaga uređaja, kako bi se zadovoljila ciljna funkcija. Ovi rezultati su, takođe, kao i prethodni dati u naredne dvije tabele.

Tabela III - Gubici snage (Ploss) u [MW] bez i sa SVC-om za IEEE 9-testnu mrežu

	Ploss [MW]	
bez SVC uređaja:	2.3157972	
SVC uređaj u čvoru:	Ploss [MW]	Optimalna vrijednost Qsvc [MVar]
4	2.3029	31.962
5	2.3157	7.811
6	2.3033	28.347
7	2.3157	16.992
8	2.3157	48.066
9	2.2429	28.504

Tabela IV - Gubici snage (Ploss) u [MW] bez i sa SVC-om za IEEE 30-testnu mrežu

		Ploss [MW]
bez SVC uređaja:		3.1361950
SVC uređaj u čvoru:	Ploss [MW]	Optimalna vrijednost Qsvc [MVar]
3	3.1283570	7.88470
4	3.1102065	20.22564
6	3.0935250	30.533385
7	3.1051779	13.46546
9	3.0595039	35.83722
10	3.0663123	23.01893
12	3.1361950	9.94304
14	3.1270511	3.33737
15	3.0790903	12.11422
16	3.1164431	6.32258
17	3.0808191	12.75020
18	3.0849214	7.83266
19	3.0753885	8.64813
20	3.0824500	8.70667
21	3.0117611	19.28986
22	3.0215217	18.06944
23	3.0615291	9.28462
24	2.9937435	13.83753
25	3.0782495	7.47845
26	3.0832614	3.83518
27	3.1104100	7.02192
28	3.1103671	13.42805
29	3.1100272	3.54662
30	3.1036651	3.66248

U ovom slučaju optimalna lokacija za mrežu od 9 čvorova je čvor 9, dok je za mrežu sa 30 čvorova proračunima utvrđeno da je najbolje mjesto u kojem se može ugraditi SVC uređaj - čvor 24. Minimalna vrijednost ukupnih gubitaka snage je 2.2429 MW za testnu mrežu sa 9 čvorova, dok je ta vrijednost za mrežu od 30 čvorova 2.9937 MW, što su manje vrijednosti od onih koje su dobijene za slučajeve prije priključivanja uređaja. Imajući u vidu prethodno navedeno, može se zaključiti da se efikasnost elektroenergetskog sistema može poboljšati sa ovim uređajem. Za sistem od 9 čvorova

redukcija gubitaka snage je 3%, dok je za sistem sa 30 čvorova zabilježeno smanjenje gubitaka snage od oko 4%.

U ovom slučaju, tokom procesa optimizacije vrijednost reaktivne snage SVC uređaja nije bila limitirana. Stoga, iz prethodnih tabela se može vidjeti da su neke optimalne vrijednosti reaktivne snage SVC uređaja dosta veće u odnosu na druge. Rezultati proračuna reaktivne snage SVC uređaja, u cilju minimizacije ukupnih gubitaka snage kada je maksimalna raspoloživa reaktivna snaga SVC uređaja limitirana, su prezentovani u Tabelama V i VI, za mreže sa 9 i 30 čvorova, respektivno. Očigledno, postavljanje gornje granice reaktivne snage SVC uređaja nema veliki uticaj na vrijednost gubitaka aktivne snage. Ako je reaktivna snaga SVC uređaja ograničena na 10 MVAr, u slučaju IEEE 9-testne mreže, minimalni ukupni gubici snage su 2.2699 MW, što je veoma blisko optimalnoj vrijednosti reaktivne snage SVC uređaja za minimalne gubitke (2.2429MW). Za veća ograničenja reaktivne snage SVC uređaja, vrijednosti gubitaka aktivne snage su još bliže optimalnom rješenju (vidjeti rezultate za čvor 9 koji su boldovani). Sličan zaključak može biti donijet i za veću posmatranu testnu mrežu. Ako je reaktivna snaga SVC uređaja limitirana na 10 MVAr, minimalni ukupni gubici snage su 3.004 MW, dok su gubici snage kada nema ovakvih ograničenja 2.9937453 MW.

Tabela V - Gubici snage (Ploss) [MW] u IEEE 9-testnoj mreži sa SVC uređajem kada je vrijednost Qsvc ograničena

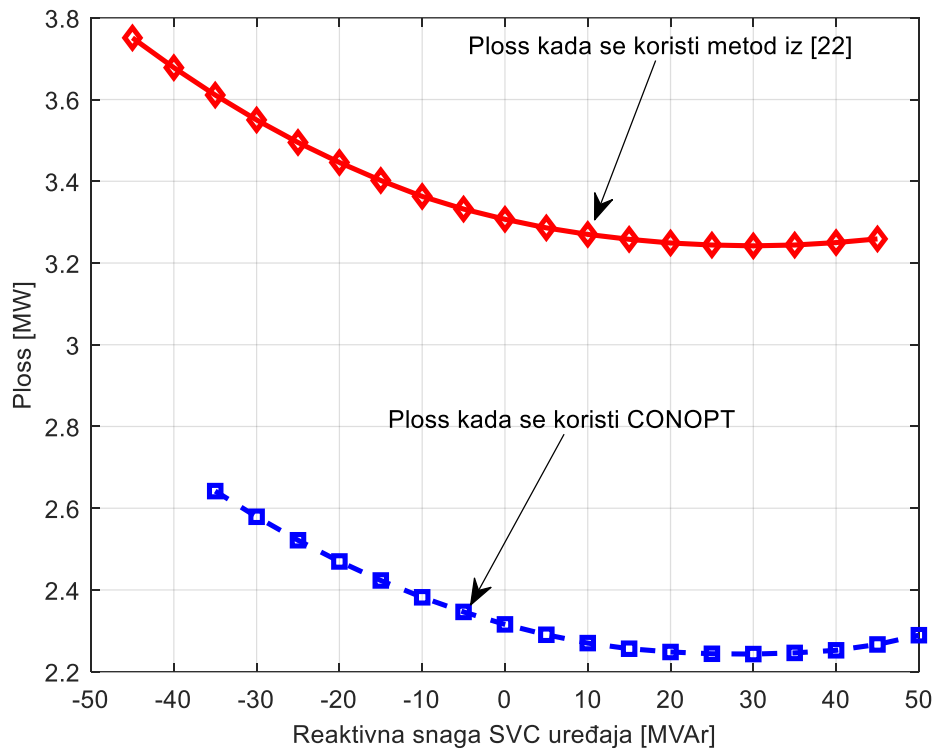
	Qsvc max=10 MVar		Qsvc max=15 MVar		Qsvc max=20 MVar	
SVC u čvoru:	Ploss	Qsvc	Ploss	Qsvc	Ploss	Qsvc
4	2.3029	8.6	2.3029	8.6	2.3029	20.0
5	2.3082	7.8	2.3082	7.8	2.3082	7.8
6	2.3157	-4.1	2.3157	-5.5	2.3157	-6.9
7	2.3054	10.0	2.3035	15.0	2.3033	17.0
8	2.3157	10.0	2.3157	15.0	2.3157	20.0
9	2.2699	10.0	2.2562	15.0	2.2482	20.0
	Qsvc max=25 MVar		Qsvc max=30 MVar		Qsvc max=35 MVar	
SVC u čvoru:	Ploss	Qsvc	Ploss	Qsvc	Ploss	Qsvc
4	2.3029	25.0	2.3029	30.0	2.3029	11.2
5	2.3082	7.8	2.3082	7.8	2.3082	7.8
6	2.3157	-8.3	2.3157	-9.7	2.3157	-23.3
7	2.3033	17.0	2.3033	17.0	2.3033	17.0
8	2.3157	25.0	2.3157	30.0	2.3157	-4.4
9	2.2438	25.0	2.2429	28.5	2.2429	28.5

Tabela VI - Gubici snage (Ploss) [MW] u IEEE 30-testnoj mreži sa SVC uređajem kada je vrijednost Qsvc ograničena

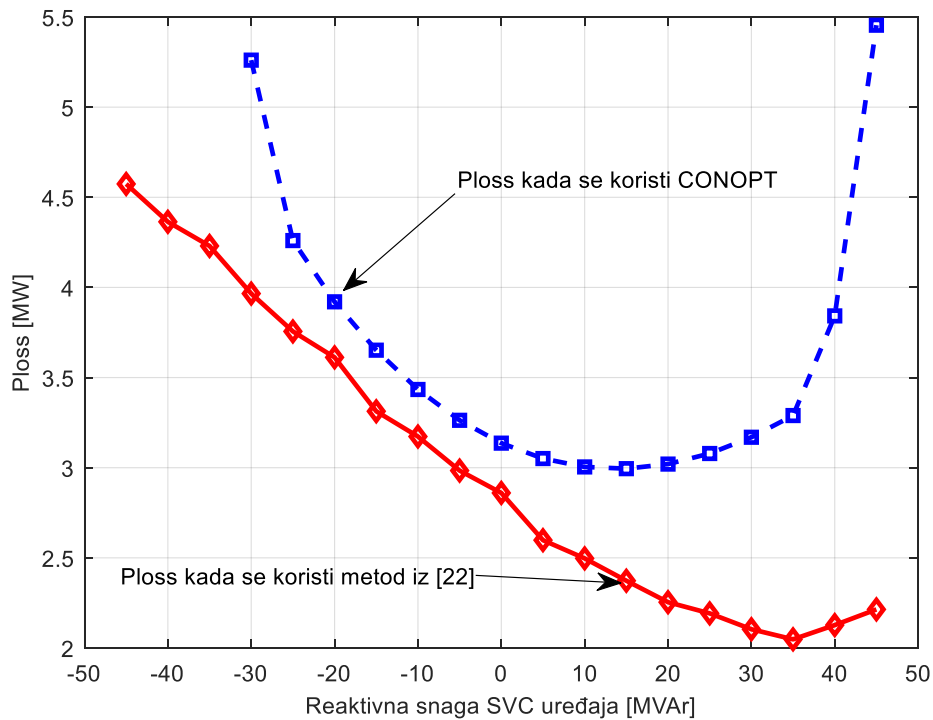
SVC u čvoru:	Qsvc max=10 MVar		Qsvc max=20 MVar		Qsvc max=30 MVar	
	Ploss	Qsvc	Ploss	Qsvc	Ploss	Qsvc
3	3.1283	7.9	3.1283	7.9	3.1283	7.9
4	3.1168	10.0	3.1102	20.0	3.1102	20.2
6	3.1127	10.0	3.0985	20.0	3.0935	30.0
7	3.1072	10.0	1.1051	13.5	3.1051	13.5
9	3.1039	10.0	3.0800	20.0	3.0646	30.0
10	3.0883	10.0	3.0674	20.0	3.0663	23.0
12	3.1361	10.0	3.1361	14.2	3.1361	30.0
14	3.1270	3.33	3.1270	3.33	3.1270	3.33
15	3.0807	10.0	3.0790	12.1	3.0790	12.1
16	3.1164	6.32	3.1164	6.32	3.1164	6.32
17	3.0833	10.0	3.0808	12.8	3.0808	12.8
18	3.0849	7.83	3.0849	7.83	3.0849	7.83
19	3.0753	8.64	3.0753	8.64	3.0753	8.64
20	3.0824	8.7	3.0824	8.7	3.0824	8.7
21	3.0399	10.0	3.0117	19.3	3.0117	19.3
22	3.0438	10.0	3.0215	18.1	3.0215	18.1
23	3.0615	9.28	3.0615	9.28	3.0615	9.28
24	3.0043	10.0	2.9937	13.8	2.9937	13.8
25	3.0782	7.47	3.0782	7.47	3.0782	7.47
26	3.0832	3.83	3.0832	3.83	3.0832	3.83
27	3.1104	7.02	3.1104	7.02	3.1104	7.02
28	3.1120	10.0	3.1103	13.4	3.1104	13.4
29	3.1100	3.54	3.1100	3.54	3.1100	3.54
30	3.1036	3.66	3.1036	3.66	3.1036	3.66

Uticaj reaktivne snage SVC uređaja, kada se on nalazi u optimalnom čvoru, na gubitke elektroenergetskog sistema prikazan je na slici 4.11 za IEEE 9-testni i na slici 4.12 za IEEE 30-testni sistem. Na ovim slikama predstavljeni su i rezultati dobijeni u [22]. Kao što se može vidjeti, solver CONOPT ugrađen u GAMS-u dao je različite vrijednosti za gubitke elektroenergetskog sistema u poređenju sa rezultatima predstavljenim u [22]. Rezultati dobijeni upotrebom solvera CONOPT u slučaju bez SVC uređaja, za oba posmatrana elektroenergetska sistema, odgovaraju rezultatima OPF predstavljenim u [27]. Dakle, optimalno rješenje, dobijeno korišćenjem solvera CONOPT, dobija se sa većom tačnošću u poređenju sa *Newton-Raphson* metodom [22].

Rezultati predstavljeni u [22] su dobijeni korišćenjem klasične *Newton-Raphson* metode koja ima puno nedostataka (zahtijeva tačnu početnu vrijednost; funkcija i njeni derivati treba da budu kontinuirani u opsegu koji se pretražuje, itd.)



Slika 4.11. Uticaj reaktivne snage SVC uređaja, kada je on lociran u čvoru 9 za IEEE 9-testnu mrežu [47]



Slika 4.12. Uticaj reaktivne snage SVC uređaja, kada je on lociran u čvoru 24 za IEEE 30-testnu mrežu [47]

4.4.2. SLUČAJ 2 - optimalna lokacija SVC uređaja za varijabilno opterećenje u sistemu bez vjetroelektrane (OF=MTPL)

U ovom slučaju vršeni su proračuni za sisteme, kada je potrošnja varijabilna, odnosno kada se posmatra period od 24h. Ovo je slučaj u kom se posmatra situacija bez prisustva vjetrogeneratora.

Najprije, izračunate su vrijednosti minimalnih gubitaka aktivne snage u mreži bez SVC uređaja. Navedeni rezultati su dati u Tabelama VII i VIII, za mreže IEEE 9-testi IEEE 30-test, respektivno. Nakon toga, SVC je priključivan u svaki negeneratorski čvor, redom, a u cilju minimizacije optimizacione funkcije. Na taj način nađena je kako optimalna lokacija uređaja, tako i vrijednost njegove optimalne snage. Ovi rezultati su takođe dati u navedenim tabelama.

Tabela VII - Gubici snage (Ploss) [MW] za IEEE 9-testnu mrežu za slučaj varijabilnog opterećenja

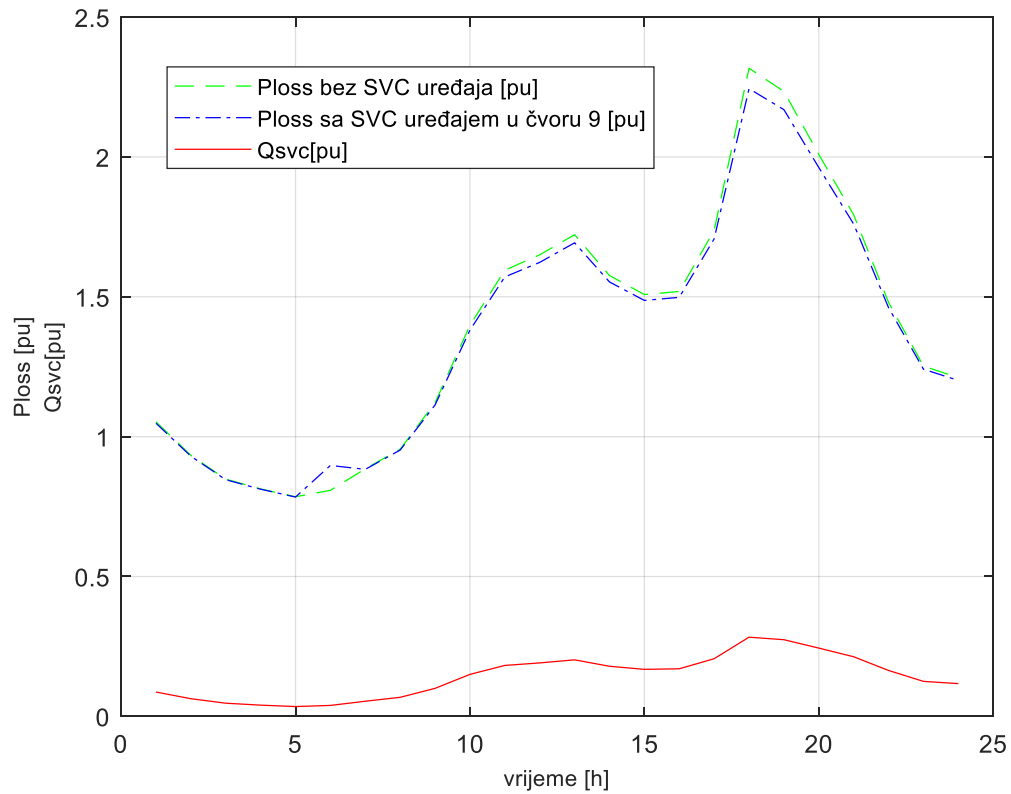
	Ploss [MW]
bez SVC uređaja:	32.203
SVC uređaj u čvoru:	Ploss [MW]
4	33.175
5	33.065
6	33.203
7	33.120
8	33.203
9	32.726

Tabela VIII - Gubici snage (Ploss) [MW] za IEEE 30-testnu mrežu za slučaj varijabilnog opterećenja

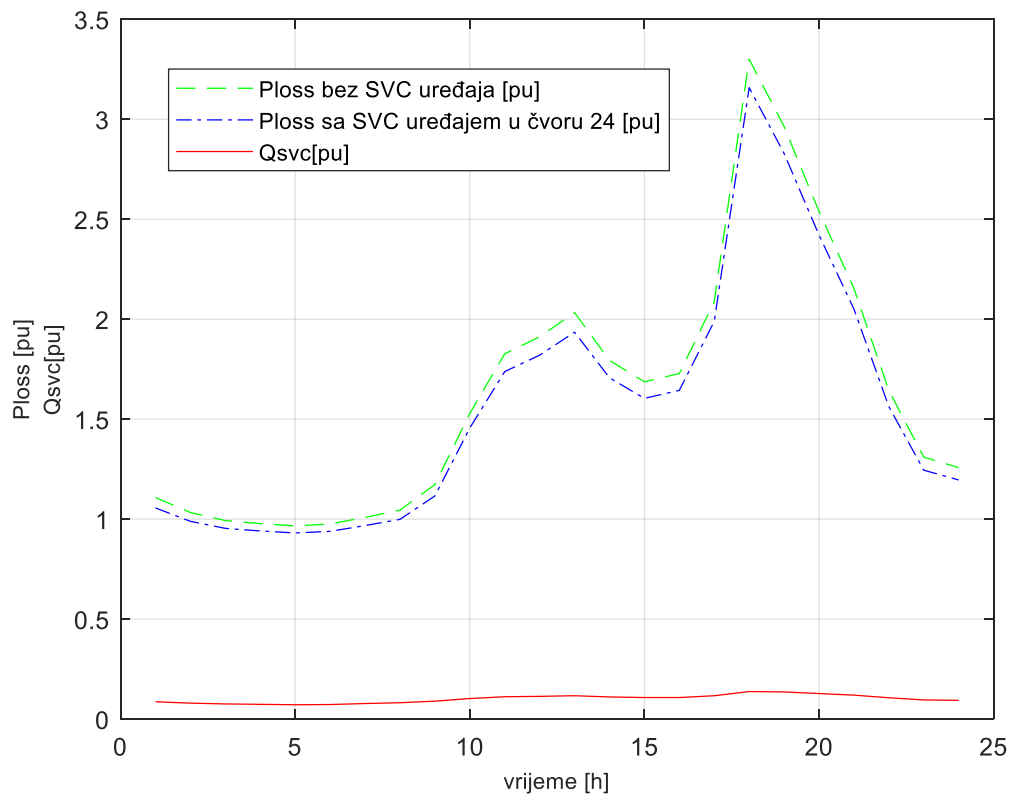
	Ploss [MW]				
bez SVC uređaja:	39.048				
SVC u čvoru:	Ploss [MW]	SVC u čvoru:	Ploss [MW]	SVC u čvoru:	Ploss [MW]
3	38.986	14	38.926	22	37.647
4	38.783	15	38.324	23	38.097
5	39.048	16	38.815	24	37.246
6	38.627	17	38.409	25	38.388
7	38.703	18	38.405	26	38.393
9	38.238	19	38.292	27	38.831
10	38.285	20	38.397	28	38.805
12	39.048	21	37.516	29	38.774
				30	38.693

Optimalna lokacija SVC uređaja za IEEE 9-testnu mrežu je čvor 9 (minimalni gubici snage su 32.726 MW), i čvor 24 za IEEE 30-testnu mrežu (minimalni gubici snage su 37.246 MW). Prema tome, ako postoji SVC u mreži gubici su manji nego u slučaju kada nemamo priključen isti. U slučaju manje testne mreže gubici su manji za oko 0.5MW, dok je za veću mrežu taj iznos oko 1.8MW. To znači da je redukcija ukupnih gubitaka snage za mrežu od 9 čvorova veoma mala i iznosi oko 1.5%, a za mrežu sa 30 čvorova, 4.1%. Na slici 4.13 prikazani su gubici snage u vremenu za IEEE 9-testnu bez i sa SVC uređajem, kao i promjena reaktivne snage u vremenu za optimalni čvor. Na slici 4.14 prikazano je isto za slučaj IEEE 30-testne mreže. 3D grafici (vrijeme-čvor-

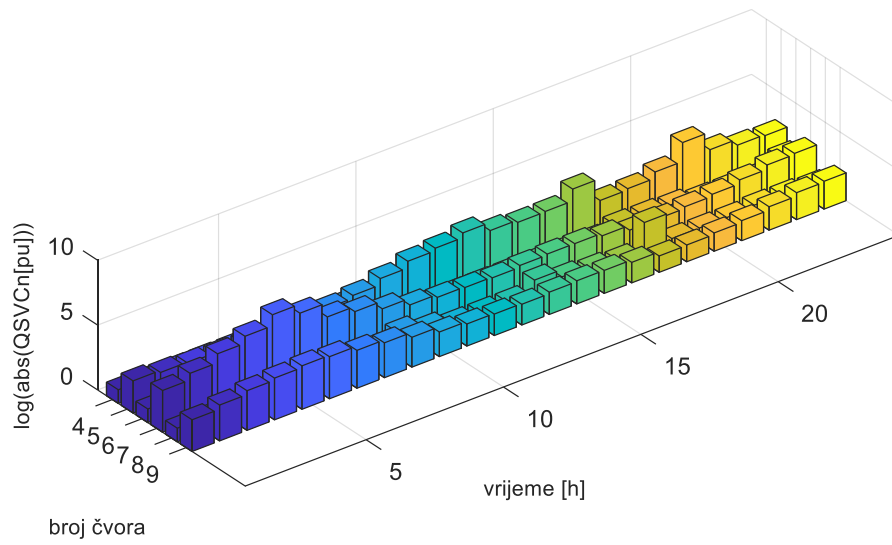
reaktivna snaga) za mreže sa 9 i 30 čvorova su prikazani na slikama 4.15 i 4.16, respektivno.



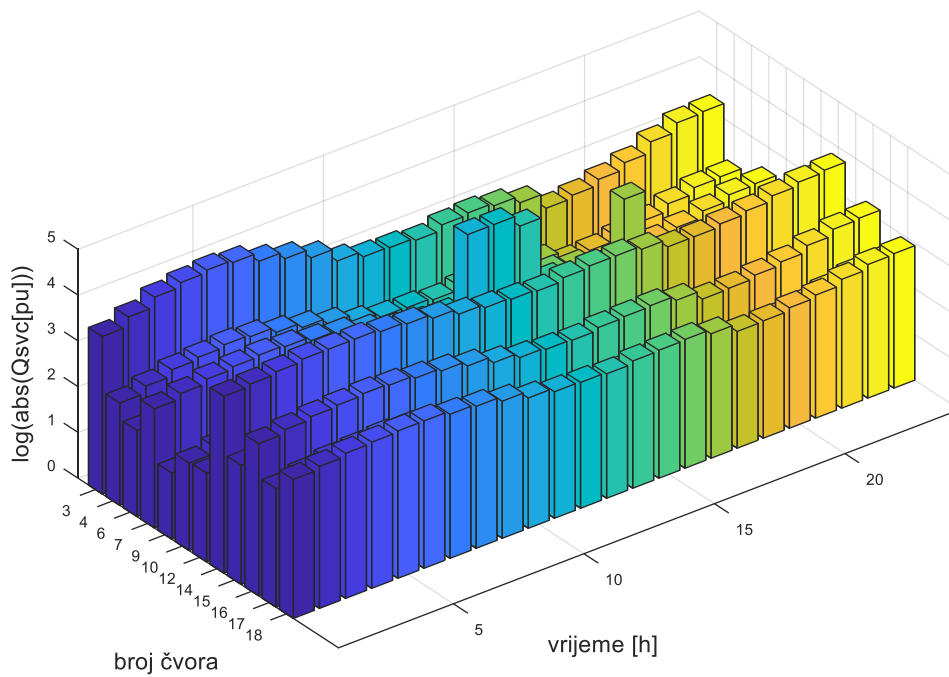
Slika 4.13. Ukupni gubici snage za IEEE 9-testnu mrežu bez i sa SVC uređajem i Q_{SVC} za optimalni čvor



Slika 4.14. Ukupni gubici snage za IEEE 30-testnu mrežu bez i sa SVC uređajem u optimalnom čvoru, kao i Q_{svc} za optimalni čvor



Slika 4.15. 3D graf zavisnosti (vrijeme-čvor-reaktivna snaga) za IEEE 9-testnu mrežu



Slika 4.16. 3D graf zavisnosti (vrijeme-čvor- Q_{svc}) za IEEE 30-testnu mrežu

Kao što se može vidjeti SVC ima najveći uticaj na vremenski interval oko maksimalnog opterećenja (Slike 4.13 i 4.14). Reaktivna snaga SVC uređaja varira u toku dana i svoj maksimum dostiže u trenutku maksimalnog opterećenja, kako za optimalni tako i za druge čvorove. U toku prethodnih proračuna vrijednost Q_{SVC} nije ograničena, pa se može primijetiti da je u nekim trenucima potražnja za količinom reaktivne snage SVC veoma visoka.

4.4.3. SLUČAJ 3 - optimalna lokacija SVC uređaja za varijabilno opterećenje u sistemu sa vjetroelektranom (OF=MTPL)

U ovom dijelu proračun je sproveden za dvije pomenute mreže kada iste sadrže vjetroelektranu. U oba sistema, vjetrogenerator je priključen u čvor 5, pri čemu je uzeto da je njegova snaga 70MW. Procedura određivanja optimalne lokacije za SVC je ista kao i u SLUČAJU 2. Dobijeni rezultati za testne IEEE mreže od 9 i 30 čvorova bez SVC uređaja su dati u Tabelama IX i X, respektivno.

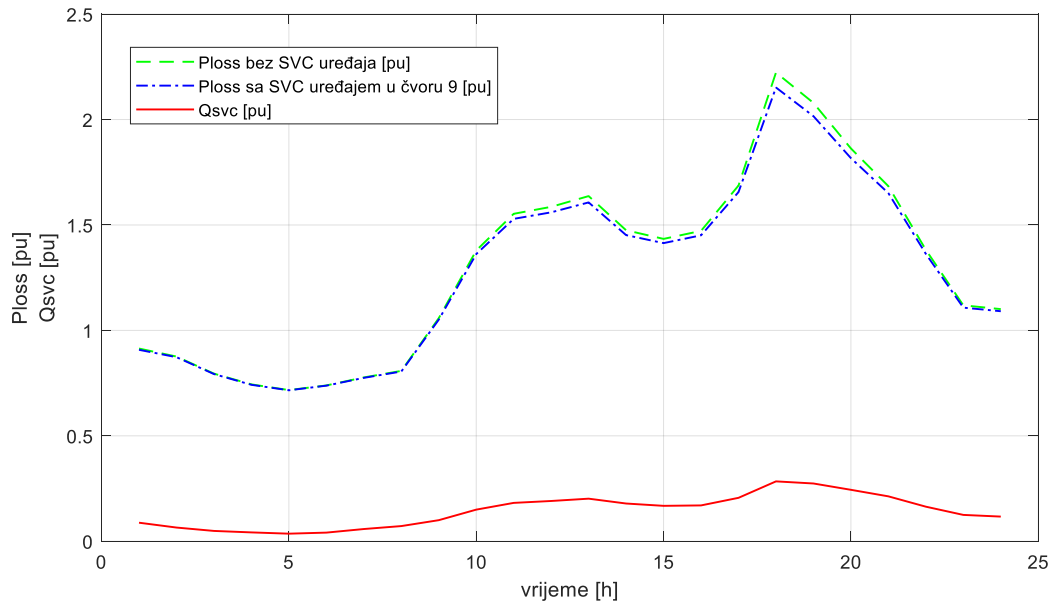
Tabela IX - Gubici snage (Ploss) [MW] za IEEE 9-testnu mrežu za slučaj vjetroelektrane u čvoru 5

	Ploss [MW]
bez SVC uređaja	31.102
SVC uređaj u čvoru:	Ploss [MW]
4	31.081
6	31.102
7	31.020
8	31.102
9	30.630

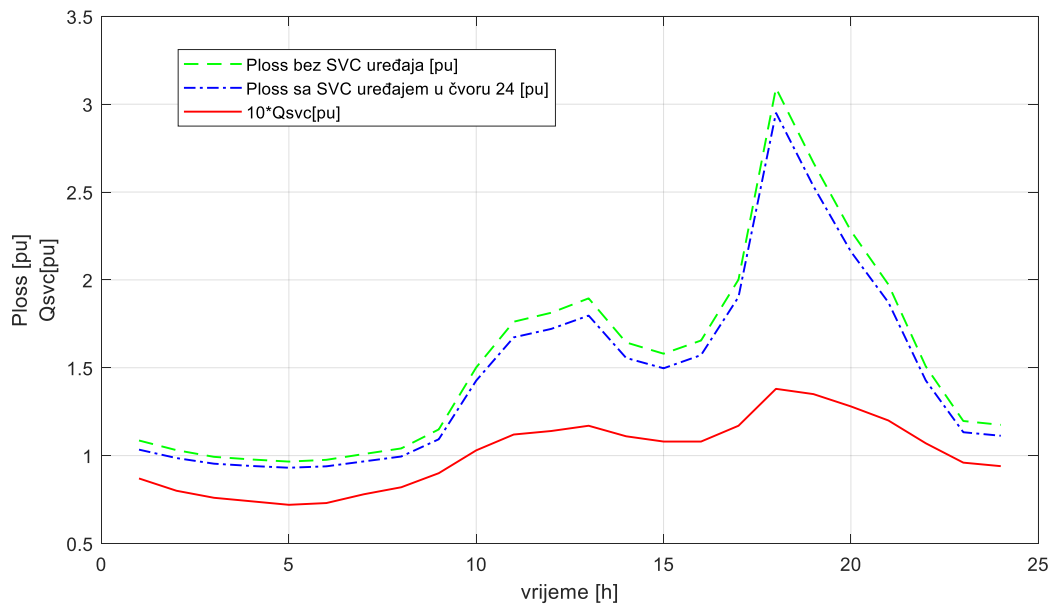
Tabela X - Gubici snage (Ploss) [MW] za IEEE 30-testnu mrežu za slučaj vjetroelektrane u čvoru 5

		Ploss [MW]			
bez SVC uređaja:		36.972			
SVC u čvoru:	Ploss [MW]	SVC u čvoru:	Ploss [MW]	SVC u čvoru:	Ploss [MW]
3	36.911	15	36.252	23	36.025
4	36.709	16	36.741	24	35.176
6	36.558	17	36.338	25	36.315
7	36.634	18	36.332	26	36.319
9	36.170	19	36.219	27	36.757
10	36.213	20	36.324	28	36.732
12	36.972	21	35.445	29	36.699
14	36.851	22	35.576	30	36.619

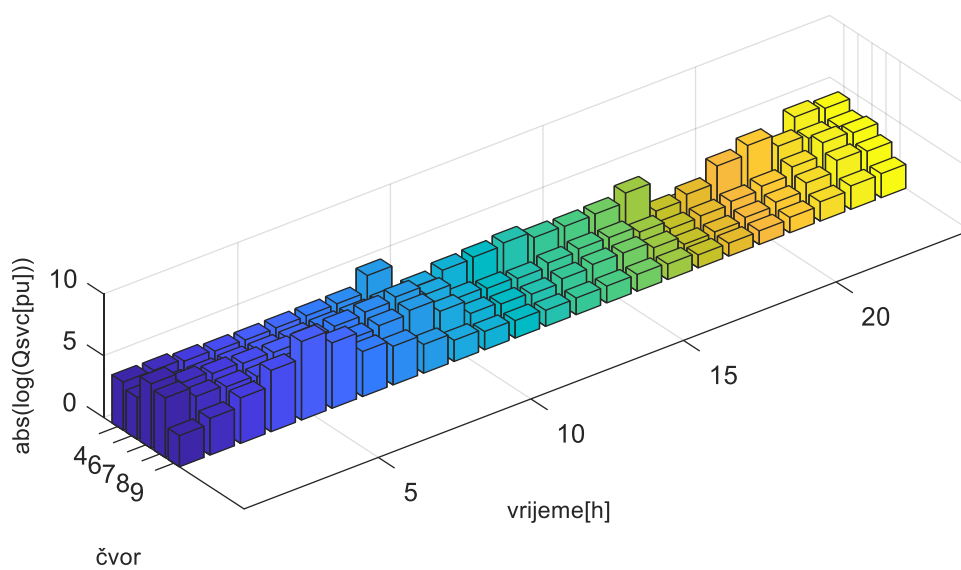
Nakon toga, testirani su svi negeneratorski čvorovi kako bi se našla optimalna vrijednost snage SVC uređaja, koja će dovesti do minimalnih gubitaka snage. Dobijeni rezultati su takođe dati u prethodne dvije tabele, za obje mreže. U mreži sa 9 čvorova, kada je prisutan vjetrogenerator optimalna lokacija SVC uređaja je čvor 9, i u tom slučaju gubici snage iznose 30.63 MW, što je oko 0.5 MW manje od gubitaka bez SVC uređaja. Može se zaključiti da je za IEEE 9-testnu mrežu poboljšanje efikasnosti sistema dodavanjem ovog FACTS uređaja, veoma malo. Što se tiče IEEE 30-testne mreže situacija je znatno drugačija. Naime, u ovom slučaju optimalna lokacija je čvor 24, a minimalna vrijednost gubitaka snage je 35.176 MW, što je oko 1.7 MW manje od situacije bez SVC uređaja. Dakle, smanjenje gubitaka je za ovu mrežu oko 4.5%. Gubici snage u zavisnosti od vremena, za slučaj bez i sa SVC uređajem u optimalnoj lokaciji, kao i optimalna vrijednost reaktivne snage Q_{SVC} u optimalnom čvoru dati su na slikama 4.17 i 4.18 za mreže sa 9 i 30 čvorova, respektivno. 3D grafovi zavisnosti (vrijeme-čvor-reaktivna snaga od SVC) za IEEE 9-test i IEEE 30-test mreže, dati su na slikama 4.19 i 4.20, respektivno. Posmatrajući 3D graf zavisnosti, može se primijetiti da postojanje vjetra itekako utiče na profil reaktivne snage SVC uređaja u toku dana za sve čvorove. Takođe, treba napomenuti da prilikom proračuna vrijednost Q_{SVC} nije bila limitirana.



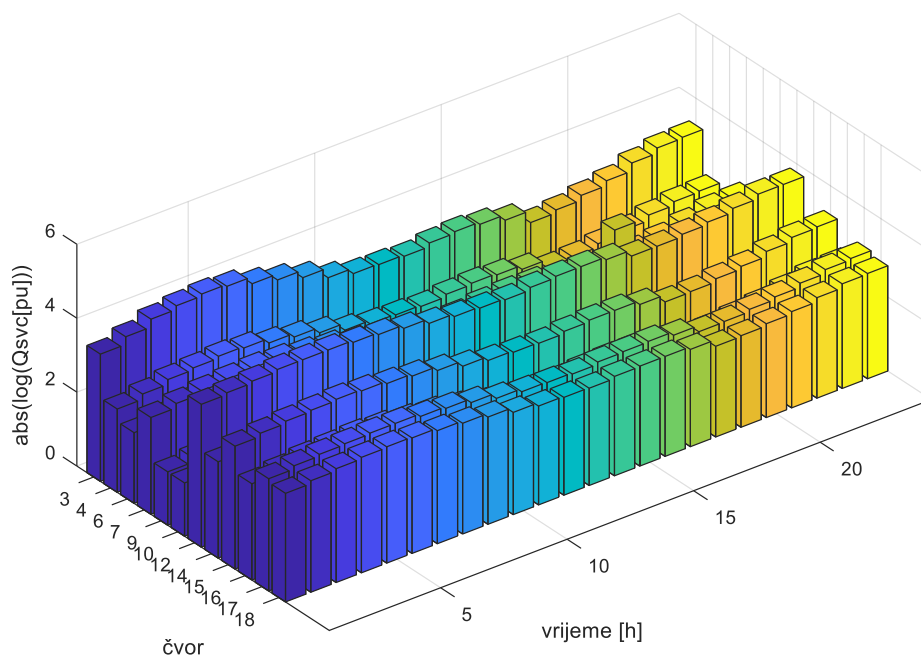
Slika 4.17. Gubici snage (Ploss)[MW] bez i sa SVC uređajem, kao i Q_{SVC} za SVC u optimalnom čvoru



Slika 4.18. Gubici snage (Ploss) [MW] bez i sa SVC uređajem, kao i Q_{SVC} za SVC u optimalnom čvoru



Slika 4.19. 3D graf zavisnosti (vrijeme-čvor-reaktivna snaga SVC uređaja) za IEEE 9-testnu mrežu



Slika 4.20. 3D graf zavisnosti (vrijeme-čvor-reaktivna snaga SVC) za IEEE 30-testnu mrežu

U nastavku proučavan je različit profil vjetra od onog dosad korišćenog. Proračuni su rađeni na IEEE 9-testnom sistemu. Podaci o vjetru su, kao što je prethodno rečeno, na početku poglavlja uzeti iz dva realna slučaja, za datume 1.12.2019. i 5.1.2020.godine, za grad Dharan u Nepal. Snaga vjetra je, kao i prvom testiranju, 70 MW. U toku optimizacionog procesa vrijednost reaktivne snage SVC uređaja nije ograničena. Rezultati gubitaka bez i sa SVC uređajem za mrežu sa 9 čvorova za drugi profil vjetra su dati u Tabeli XI.

Tabela XI - Gubici (Ploss) [MW] za drugi profil vjetra za IEEE 9-testnu mrežu

	Ploss [MW]
bez SVC uređaja:	30.532
SVC uređaj u čvoru:	Ploss [MW]
4	30.512
6	30.532
7	30.447
8	30.532
9	30.059

4.4.4. SLUČAJ 4 – optimalna lokacija SVC uređaja za konstantno opterećenje (OF=MTVD)

Rezultati optimalnih tokova snage u cilju minimizacije devijacije napona za IEEE testne sisteme sa 9 i 30 čvorova bez SVC uređaja, dati su u Tabelama XII i XIII, respektivno. Nakon toga sproveden je sljedeći postupak - SVC uređaj je priključivan u svaki, negeneratorski čvor, redom, i za svaki proračunavata je vrijednost reaktivne snage SVC uređaja pri kojoj je devijacija napona u mreži minimalna. Na taj način, nađena je optimalna lokacija, kao i optimalna reaktivna snaga uređaja, kako bi se zadovoljila ciljna funkcija. Ovi rezultati su, takođe, kao i prethodni dati u naredne dvije tabele.

Tabela XII - Devijacija napona [pu] za IEEE 9-testnu mrežu bez i sa SVC uređajem

	devijacija napona [pu]	
bez SVC uređaja:	0.0010836	
SVC uređaj u čvoru:	devijacija napona [pu]	optimalna vrijednost Qsvc[MVar]
4	0.0006189	54.6
5	0.0008263	22.2
6	0.0010662	12.3
7	0.0009796	17.5
8	0.0009430	31.2
9	0.0002430	39.3

Tabela XIII - Devijacija napona [pu] za IEEE 30-testnu mrežu bez i sa SVC uređajem

	devijacija napona [pu]	
bez SVC uređaja:	0.0185606	
SVC uređaj u čvoru:	devijacija napona [pu]	optimalna vrijednost Qsvc[MVar]
3	0.0181797	26.2
4	0.0172001	46.4
6	0.0152263	75.0
7	0.0174560	61.5
9	0.0122287	60.3
10	0.0081543	62.5
12	0.0130689	61.8
14	0.0149559	35.0
15	0.0102230	56.4
16	0.0144020	31.6
17	0.0109691	48.2
18	0.012365	31.1
19	0.124405	28.4
20	0.0119956	31.1
21	0.0072412	54.9
22	0.0066110	55.4
23	0.0084880	33.0
24	0.0044609	35.4
25	0.0079056	20.4
26	0.0103426	12.1
27	0.0094761	17.8
28	0.0139577	42.7
29	0.0108848	11.1
30	0.0107712	10.6

U ovom slučaju optimalna lokacija za mrežu od 9 čvorova je čvor 9, dok je za mrežu sa 30 čvorova proračunima utvrđeno da je najbolje mjesto u kojem se može ugraditi SVC uređaj čvor 24. Minimalna vrijednost ukupne devijacije napona je 0.0002430 pu za testnu mrežu sa 9 čvorova, dok je ta vrijednost za mrežu od 30 čvorova 0.0044609 pu, što su manje vrijednosti od onih koje su dobijene za slučajeve prije priključivanja uređaja. Za sistem od 9 čvorova smanjenje devijacije napona je 23%, dok je za sistem sa 30 čvorova zabilježeno smanjenje od oko 25%.

U ovom slučaju, tokom procesa optimizacije vrijednost reaktivne snage SVC uređaja nije bila limitirana. Stoga, iz prethodnih tabela se može vidjeti da su neke vrijednosti optimalne vrijednosti reaktivne snage SVC uređaja dosta više u odnosu na druge. Rezultati proračuna reaktivne snage SVC uređaja, u cilju minimizacije ukupne devijacije napona kada je maksimalna raspoloživa reaktivna snaga SVC uređaja limitirana, su prezentovani u Tabelama XIV i XV, za mreže sa 9 i 30 čvorova, respektivno. Očigledno, postavljanje gornje granice reaktivne snage SVC uređaja ima veliki uticaj na devijaciju napona. Ako je reaktivna snaga SVC uređaja ograničena na 10 MVar, u slučaju IEEE 9-testne mreže, minimalna devijacija napona je 0.0007013 pu, što je različito od devijacije napona za optimalnu vrijednost reaktivne snage SVC uređaja za 0.0004583 pu. Za veća ograničenja reaktivne snage SVC uređaja, vrijednosti devijacije napona su bliže optimalnom rješenju (vidjeti rezultate za čvor 9 koji su boldovani). Sličan zaključak može biti donijet i za veću testnu mrežu. Ako je reaktivna snaga SVC uređaja limitirana na 10 MVar, minimalna ukupna devijacija napona je 0.0124485 pu, dok je ona kad nema ograničenja ovakve vrste 0.0044609 pu.

Tabela XIV - Devijacija napona [pu] u IEEE 9-testnoj mreži sa SVC uređajem kada je vrijednost Q_{svc} ograničena

Qsvc max=10MVar		Qsvc max=15MVar			Qsvc max=20MVar	
SVC u čvoru:	dev.napona	Qsvc	dev.napona	Qsvc	dev.napona	Qsvc
4	0.0009268	10.0	0.0008606	15.0	0.0008025	20.0
5	0.0009009	10.0	0.0008517	15.0	0.0008286	20.0
6	0.0010668	10.0	0.0010662	12.3	0.0010662	12.3
7	0.0009980	10.0	0.0009816	15.0	0.0009796	17.5
8	0.0010075	10.0	0.0009806	15.0	0.0009609	20.0
9	0.0007013	10.0	0.0005551	15.0	0.0004379	20.0
Qsvc max=25MVar		Qsvc max=30MVar			Qsvc max=35MVar	
SVC u čvoru:	dev.napona	Qsvc	dev.napona	Qsvc	dev.napona	Qsvc
4	0.0007526	25.0	0.0007106	30.0	0.0006767	35.0
5	0.0008263	22.2	0.0008263	22.2	0.0008263	22.2
6	0.0010662	12.3	0.0010662	12.3	0.0010662	12.3
7	0.0009796	17.5	0.0009796	17.5	0.0009796	17.5
8	0.0009485	25.0	0.0009432	30.0	0.0009430	31.2
9	0.0003489	25.0	0.0002872	30.0	0.0002523	35.0

Tabela XV - Devijacija napona[pu] u IEEE 30-testnoj mreži sa SVC uređajem kada je vrijednost Q_{svc} ograničena

Qsvc max=10MVar		Qsvc max=20 MVar			Qsvc max=30MVar	
SVC u čvoru:	dev.napona	Qsvc	dev.napona	Qsvc	dev.napona	Qsvc
3	0.0183560	10.0	0.0182163	20.0	0.0181797	26.2
4	0.0181171	10.0	0.0177260	20.0	0.0174056	30.0
6	0.0177892	10.0	0.0170971	20.0	0.0164841	30.0
7	0.0182224	10.0	0.0179485	20.0	0.0177368	30.0
9	0.0169518	10.0	0.0155556	20.0	0.0143684	30.0
10	0.0153773	10.0	0.0128012	20.0	0.0108205	30.0
12	0.0172227	10.0	0.0160519	20.0	0.0150503	30.0
14	0.0167461	10.0	0.0155890	20.0	0.0150291	30.0
15	0.0158186	10.0	0.0136364	20.0	0.0120025	30.0
16	0.0166390	10.0	0.0152894	20.0	0.0144653	30.0
17	0.0157316	10.0	0.0135962	20.0	0.0121144	30.0
18	0.0150898	10.0	0.0130849	20.0	0.0123714	30.0
19	0.0148837	10.0	0.0129238	20.0	0.0124405	28.4
20	0.0148905	10.0	0.0127653	20.0	0.0120032	30.0
21	0.0146003	10.0	0.0115492	20.0	0.0093633	30.0
22	0.0144174	10.0	0.0112152	20.0	0.0089089	30.0
23	0.0141127	10.0	0.0109363	20.0	0.0088897	30.0
24	0.0124485	10.0	0.0080824	20.0	0.0052954	30.0
25	0.0103883	10.0	0.0079084	20.0	0.0079056	20.4
26	0.0105466	10.0	0.0103426	12.1	0.0103426	12.1
27	0.0110395	10.0	0.0094761	17.8	0.0094761	17.8
28	0.0170273	10.0	0.0157623	20.0	0.0147904	30.0
29	0.0109525	10.0	0.0108848	11.1	0.0108848	11.1
30	0.0107926	10.0	0.0107712	10.6	0.0107712	10.6

4.4.5. SLUČAJ 5 - optimalna lokacija SVC uređaja za varijabilno opterećenje u sistemu bez vjetroelektrane (OF=MTVD)

U ovom slučaju vršeni su proračuni za sisteme, kada je potrošnja varijabilna, odnosno kada se posmatra period od 24h. Takođe, ovo je slučaj kod koga nemamo zastupljene vjetroelektrane. Najprije, izračunate su vrijednosti minimalnih devijacija napona za slučaj optimalnog toka snaga bez SVC uređaja, i ti rezultati su dati u Tabelama XVI i XVII, za IEEE 9-test i IEEE 30-test mreže, respektivno. Nakon toga, SVC je priključivan u svaki negeneratorski čvor, redom, u cilju minimizacije objektivne funkcije. Na taj način nađena je optimalna lokacija uređaja. Ovi rezultati su takođe dati u pomenutim dvijema tabelama.

Tabela XVI - Devijacija napona [pu] za IEEE 9-testnu mrežu za slučaj varijabilnog opterećenja

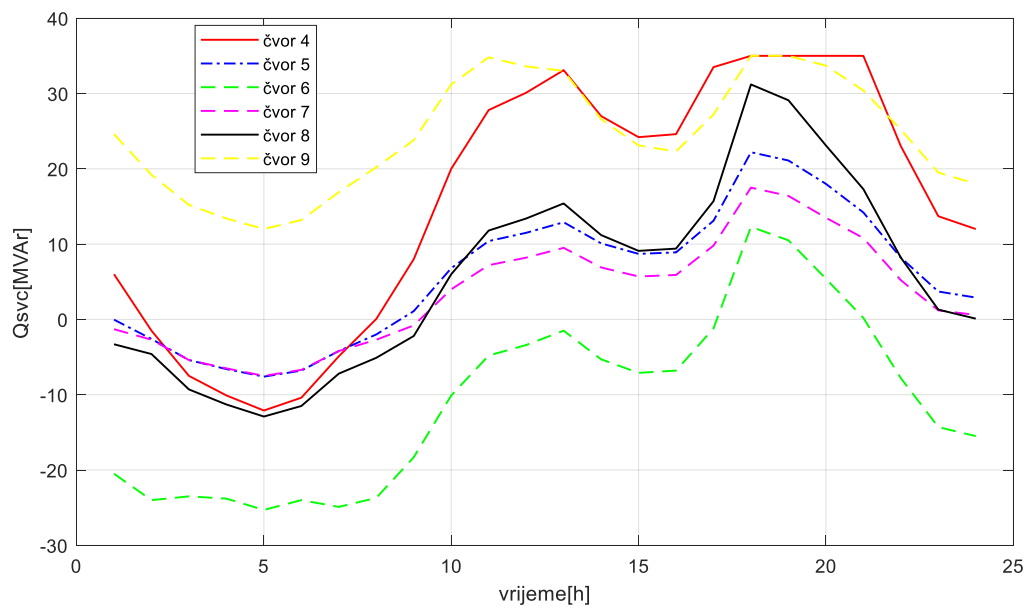
devijacija napona[pu]	
bez SVC uređaja:	0.009
SVC uređaj u čvoru:	devijacija napona [pu]
4	0.007
5	0.008
6	0.009
7	0.009
8	0.009
9	0.004

Tabela XVII - Devijacija napona [pu] za IEEE 30-testnu mrežu za slučaj varijabilnog opterećenja

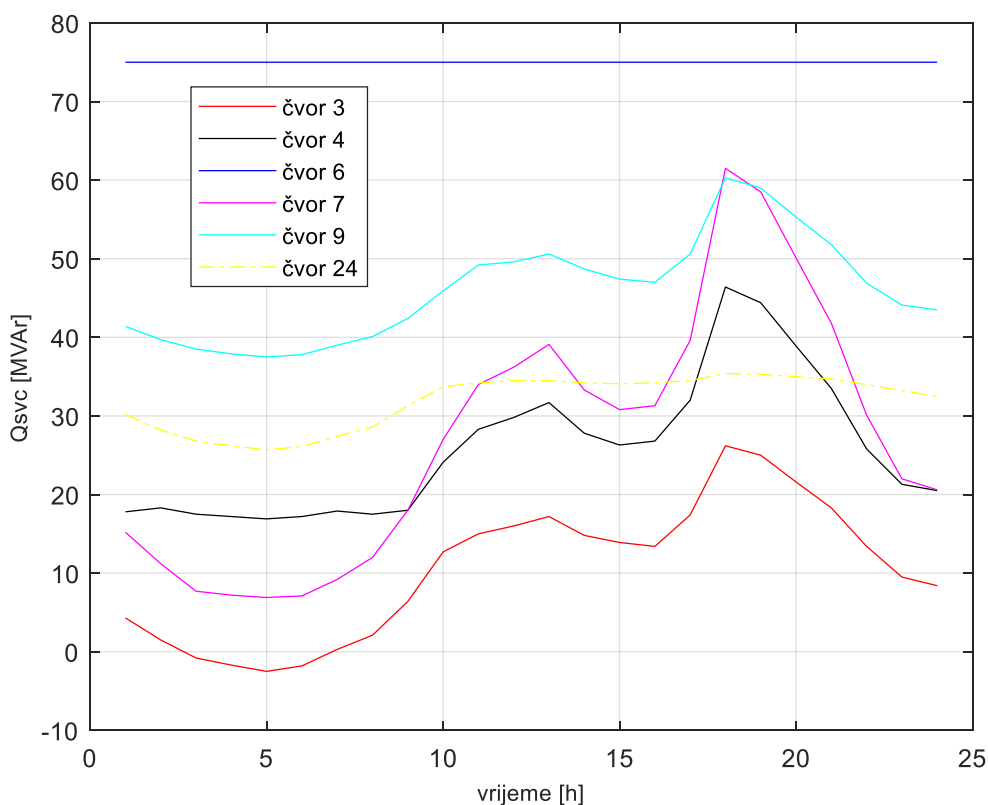
devijacija napona[pu]	
bez SVC uređaja:	0.244
SVC uređaj u čvoru:	devijacija napona [pu]
3	0.242
4	0.234
6	0.207
7	0.237
9	0.164
10	0.109
12	0.170
14	0.195
15	0.133
16	0.187
17	0.144
18	0.159
19	0.160
20	0.154
21	0.097
22	0.089
23	0.106
24	0.055
25	0.110
26	0.143
27	0.133
28	0.188
29	0.152
30	0.150

Optimalna lokacija SVC uređaja za IEEE 9-testnu mrežu je čvor 9 (minimalna devijacija napona je 0.004 pu), i čvor 24 za IEEE 30-testnu mrežu (minimalna devijacija napona je 0.055 pu). Ukoliko je SVC u mreži devijacija je manja nego u slučaju kada nije priključen isti. U slučaju manje testne mreže devijacija napona je manja za oko 0.005 pu, dok je za veću mrežu taj iznos oko 0.189 pu. To znači da je redukcija devijacije napona za mrežu sa 9 čvorova veoma velika i iznosi 45%, a za mrežu sa 30 čvorova, oko 23%.

Na slikama 4.21 i 4.22 prikazana je promjena Q_{SVC} u vremenu za svaki čvor u koji je priključivan SVC, za IEEE 9-test i IEEE 30-test mrežu, respektivno. Sa slika se može primijetiti da Q_{SVC} svoj maksimum dostiže u trenutku kada imamo najveće opterećenje. U ovom slučaju reaktivna snaga SVC uređaja je ograničena na 35 MVAR, za manju, a 75MVAR za veću mrežu. Na slici 4.22 prikazana je promjena Q_{SVC} za pet prvih negeneratorskih čvorova, i čvor 24, kao optimalni.



Slika 4.21. Promjena Q_{SVC} u funkciji vremena za sve negeneratorske čvorove kod IEEE 9-testne mreže



Slika 4.22. Promjena Q_{svc} u funkciji vremena za sve negeneratorske čvorove kod IEEE 30-testne mreže

4.4.6. SLUČAJ 6 - optimalna lokacija SVC uređaja za varijabilno opterećenje u sistemu sa vjetroelektranom (OF=MTVD)

U ovom dijelu proračun se vrši za dvije pomenute mreže, kada one sadrže vjetroelektranu. U oba sistema, vjetrogenerator je priključen u čvor 5, pri čemu je njegova snaga 70MW. Procedura određivanja optimalne lokacije za SVC je ista kao i u SLUČAJU 5. Dobijeni rezultati za mreže od 9 i 30 čvorova bez SVC uređaja su dati u Tabelama XVIII i XIX, respektivno.

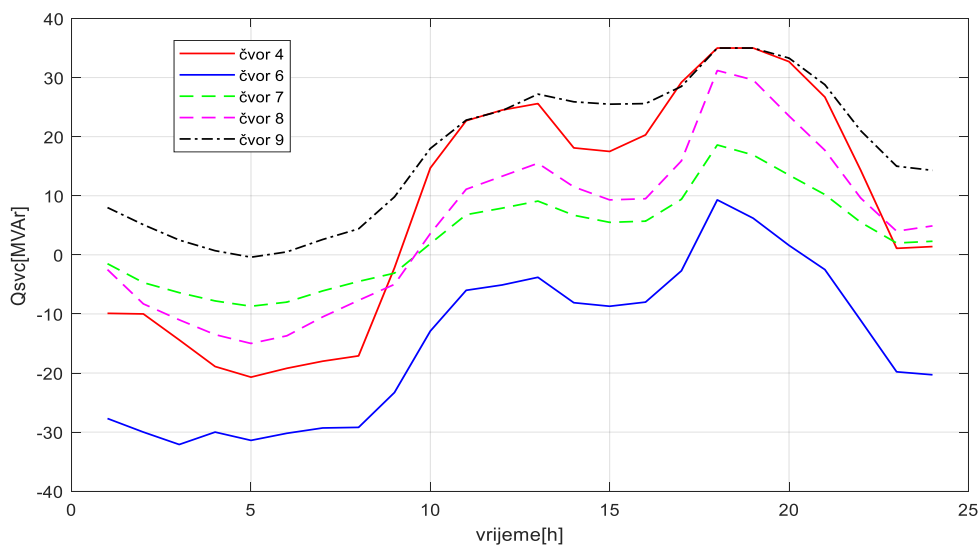
Tabela XVIII - Devijacija napona [pu] za IEEE 9-testnu mrežu kada je u čvoru 5 priključena vjetroelektrana

devijacija napona[pu]	
bez SVC uređaja:	0.009
SVC uređaj u čvoru:	devijacija napona [pu]
4	0.007
6	0.008
7	0.009
8	0.008
9	0.004

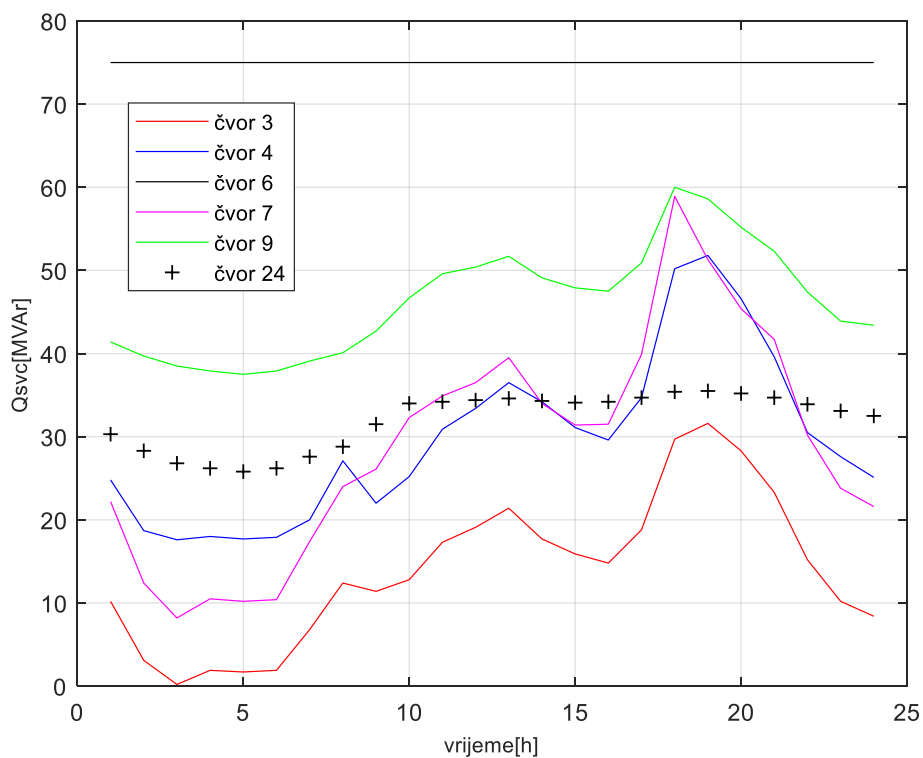
Tabela XIX Devijacija napona [pu] za IEEE 30-testnu mrežu kada je u čvoru 5 priključena vjetroelektrana

devijacija napona[pu]	
bez SVC uređaja:	0.245
SVC uređaj u čvoru:	devijacija napona [pu]
3	0.242
4	0.232
6	0.205
7	0.237
9	0.164
10	0.109
12	0.170
14	0.196
15	0.133
16	0.187
17	0.144
18	0.159
19	0.160
20	0.154
21	0.097
22	0.089
23	0.106
24	0.055
25	0.111
26	0.143
27	0.133
28	0.189
29	0.152
30	0.151

Nakon toga, testirani su svi negeneratorski čvorovi kako bi se našla optimalna vrijednost snage SVC uređaja, koja će dovesti do optimalne devijacije napona. Dobijeni rezultati su takođe dati u prethodne dvije tabele, za obje mreže. U mreži sa 9 čvorova, kada je prisutan vjetrogenerator optimalna lokacija SVC uređaja je čvor 9, i u tom slučaju devijacija napona iznosi 0.004 pu, što je za 0.005 pu manje od devijacije napona bez SVC uređaja. Može se zaključiti da je za IEEE 9-testnu mrežu poboljšanje performansi sistema dodavanjem ovog FACTS uređaja, veoma veliko. Što se tiče IEEE 30-testne mreže situacija je nešto drugačija. Naime, u ovom slučaju optimalna lokacija je čvor 24, a minimalna vrijednost devijacije napona je 0.055, što je oko 0.190 pu manje od situacije bez SVC uređaja. Na slikama 4.23 i 4.24 data je promjena Q_{SVC} u vremenu za negeneratorske čvorove za mreže od 9 i 30 čvorova, respektivno. Kao i u prethodnom slučaju, primijećuje se ista situacija, tj. maksimalna vrijednost Q_{SVC} je za vrijeme najveće potrošnje. Takođe, i ovdje je gornja granica reaktivne snage ovog FACTS uređaja ograničena na 35 MVAR u slučaju manje mreže i 75 MVAR u slučaju veće. Na slici 4.24 prikazan je grafik promjene reaktivne snage SVC uređaja za prvih 5 negeneratorskih čvorova, i čvora 24, kao optimalnog.



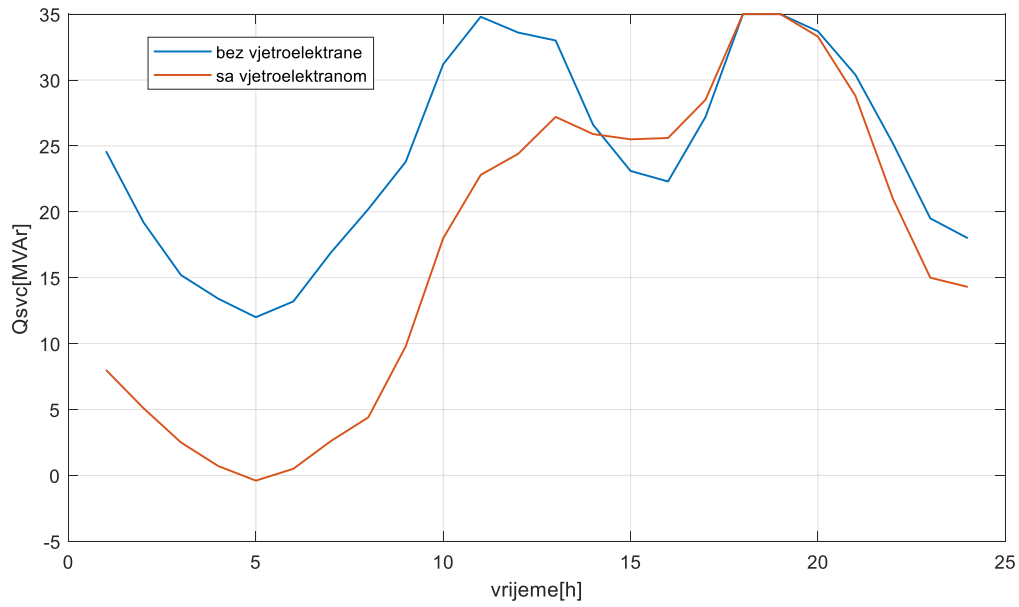
Slika 4.23. Promjena Q_{SVC} u funkciji vremena za sve negeneratorske čvorove kod IEEE 9-testne mreže



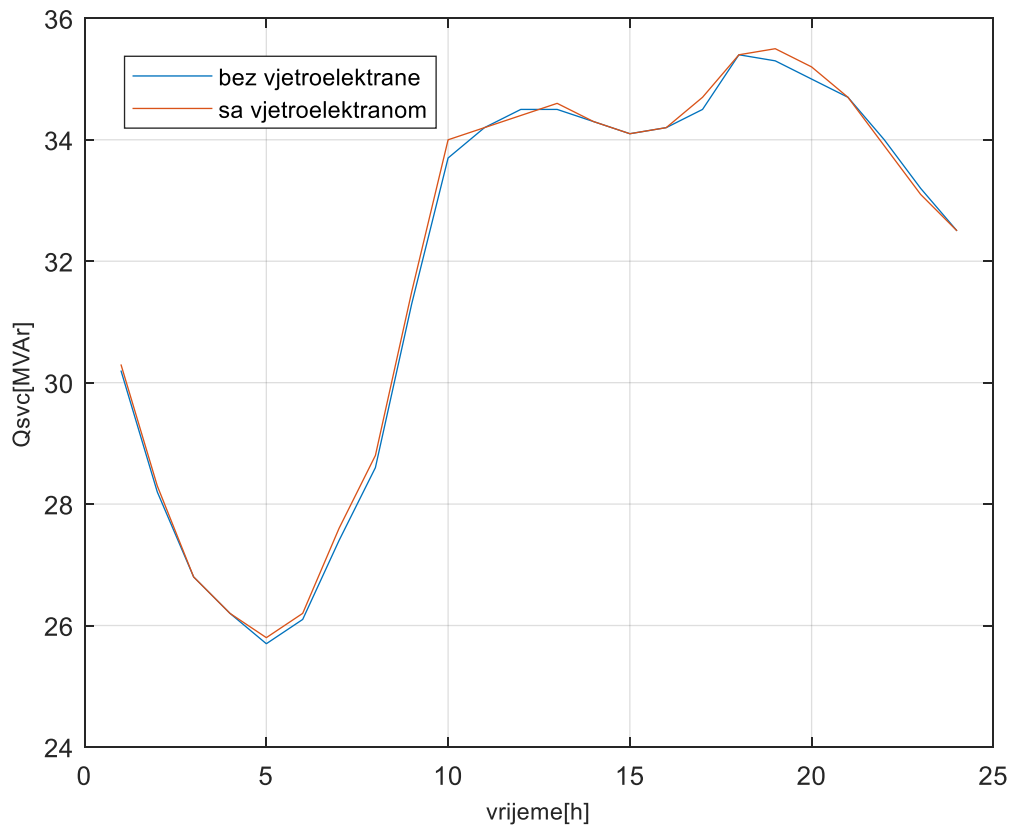
Slika 4.24. Promjena Q_{svc} u funkciji vremena za sve negeneratorske čvorove kod IEEE 30-testne mreže

Na slikama 4.25 i 4.26 dati su grafici reaktivne snage SVC uređaja u sistemu bez i sa vjetroelektranom, za optimalni čvor, za IEEE 9-test i IEEE 30-test mrežu, respektivno. Dakle, to je u prvom slučaju čvor 9, dok je u drugom slučaju to 24.

Pokazalo se da od izbora čvora, i vrijednosti snage Q_{svc} zavisi i vrijednost pulsacija napona i iznos njene optimalne vrijednosti. Samim tim od svega navedenog zavisi i cijena SVC uređaja, kao i vrijednost harmonijskih izobličenja.



Slika 4.25. Promjena Q_{svc} u funkciji vremena za optimalni čvor 9 bez i sa vjetrom



Slika 4.26. Promjena Q_{svc} u funkciji vremena za optimalni čvor 24 bez i sa vjetrom

POGLAVLJE 5

ZAKLJUČAK

U ovom magistarskom radu analiziran je uticaj optimalne lokacije i parametara SVC uređaja na vrijednost ukupnih gubitaka aktivne snage i ukupne devijacije napona u testnim sistemima sa 9 i 30 čvorova.

Prva cjelina magistarskog rada posvećena je problemu generisanja viših harmonika od strane TCR-a, dijela SVC uređaja, u izlaznoj struji samog uređaja. Detaljno je analiziran matematički model uređaja, kao i formule vezane za napon i struju djelova SVC uređaja. Prikazani su načini na koji se mogu eliminisati treći, i svaki sljedeći viši harmonik koji predstavlja cjelobrojni umnožak trećeg harmonika. Takođe, prikazan je i, u literaturi, najčešće korišćen način rješenja problema pojave viših harmonika zasnovan na upotrebi filtera. Data je i komparativna tabela, u kojoj su upoređene tri vrste filtera po raznim kriterijumima, kao što su: opseg djelovanja, opasnost od preopterećenja, kompleksnost, cijena itd. Na kraju prve cjeline data su i dva primjera, koja su na slikovit način, koristeći *Simulink*, prikazala uticaj promjene napona na rad SVC uređaja, i harmonijsku distorziju u izlaznoj struji SVC uređaja priključenog na mrežu.

Druga cjelina magistarskog rada posvećena je problemu nalaženja optimalne lokacije i parametara SVC uređaja u testnim mrežama IEEE 9 i IEEE 30, u raznim uslovima, kako bi se postigle što bolje performanse sistema. U ovom radu opisan je postupak i demonstrirana uspješna primjena solvera CONOPT, koji je ugrađen u programu GAMS, u cilju određivanja optimalne lokacije i parametara SVC uređaja. U

proračunima korišćene su sljedeće kriterijumske funkcije: minimizacija gubitaka aktivne snage u prvom, i minimizacija devijacije napona u drugom slučaju. Rezultati dobijeni korišćenjem CONOPT-a, u slučaju konstantne vrijednosti opterećenja, su poređeni sa rezultatima koji su dobijeni primjenom Newton-Raphsonovog metoda u [22], po kriterijumu tačnosti. Takođe, data je i komparativna analiza CONOPT-a i različitih metaheurističkih metoda u pogledu brzine izvršavanja programa. Generalni zaključak je da se CONOPT uspješno može primijeniti za rješavanje navedenog problema, ali i da je po kriterijumima tačnosti i brzine rada ubjedljivo bolji od klasičnih metaheurističkih metoda.

Dobijeni rezultati primjenu mogu naći u fazi projektovanja mreže sa SVC uređajem, kako bi se našla njegova optimalna lokacija, u cilju postizanja što boljih performansi sistema. Takođe, primjenom realizovanog metoda određuje se i vrijednost reaktivne snage SVC uređaja, pa se na osnovu toga može procijenjivati njegov harmonijski uticaj na mrežu. Realizovani metod i sam postupak se može primijeniti na različite EES-e, bez obzira da li oni sadrže obnovljive izvore energije ili ne.

Budući rad moguće je bazirati na postavljanje više različitih FACTS uređaja i traženju optimalnog mjesta za sve njih, radi maksimalnog smanjenja troškova proizvodnje električne energije, minimizacije gubitaka snage ili devijacije napona u sistemu. Korisno bi bilo razmotriti i uključivanje TCSC-a (*Thyristor Controlled Series Capacitor*), kao rednog FACTS uređaja, ali i najmodernijeg i po najnovijim istraživanjima najproduktivnijeg FACTS uređaja, a to je kombinovani UPFC (*Unified Power Flow Controller*).

LITERATURA

1. Ismael, S.M.; *et al.* State-of-the-art of hosting capacity in modern power systems with distributed generation. *Renew. Energy* **2019**, *130*, 1002–1020.
2. Dixon, J; *et al.* Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-Art Review. *Proceedings of the IEEE* **2005**, *93*, 2144-2164.
3. Nadeem, M.; Imran, K.; Khattak, A.; Ulasyar, A.; Pal, A.; Zeb, M.Z.; Khan, A.N.; Padhee, M. Optimal Placement, Sizing and Coordination of FACTS Devices in Transmission Network Using Whale Optimization Algorithm. *Energies* **2020**, *13*, 753.
4. Mondal, D.; *et al.* Optimal placement and parameter setting of SVC and TCSC using PSO to mitigate small signal stability problem. *Int. Journal of El. Power & Energy Systems* **2012**, *42*, 334-340.
5. Chang, CS.; Qizhi, Y. Fuzzy bang–bang control of static VAR compensators for damping system-wide low-frequency oscillations. *Electr Power Syst Res* **1999**, *49*, 45–54.
6. Hemeida, MG.; Hegazy, R.; Mohamed, M.H. A comprehensive comparison of STATCOM versus SVC-based fuzzy controller for stability improvement of wind farm connected to multi-machine power system. *Electr Eng* **2017**, *99*, 1–17.
7. Darabian, M.; Jalilvand, A. A power control strategy to improve power system stability in the presence of wind farms using FACTS devices and predictive control. *Int J Electr Power Energy Syst* **2017**, *85*, 50–66.
8. Huang, J.S.; *et al.* Loadability of power systems and optimal SVC placement. *Int. Journal of El. Power & Energy Systems* **2013**, *45*, 167-174.
9. Ghahremani, E.; Kamwa, I. Optimal placement of multiple-type FACTS devices to maximize power system loadability using a generic graphical user interface. *IEEE Trans. on Power Systems*, **2013**, *28*, 764-778.
10. Gerbex, S.; *et al.* Optimal location of multi-type FACTS devices in a power system by means of genetic algorithms. *IEEE Trans. on Power Systems* **2001**, *16*, 537-544.
11. Basiri-Kejani, M.; Gholipour, E. Two-level procedure based on HICAGA to determine optimal number, locations and operating points of SVCs in Isfahan–Khuzestan power system to maximise loadability and minimise losses, TVD and SVC installation cost. *IET Generation, Transmission & Distribution* **2016**, *10*, 4158-4168.
12. Raj, S. ; Bhattacharyya, B. Optimal placement of TCSC and SVC for reactive power planning using Whale optimization algorithm. *Swarm and Evolutionary Computation* **2018**, *40*, 131-143,
13. Mahdad, B; Srairi, K. Adaptive differential search algorithm for optimal location of distributed generation in the presence of SVC for power loss reduction in distribution system. *Int. Journal of Engineering Science and Technology* **2016**, *19*, 1266-1282.
14. Belati, E.A.; *et al.* Allocation of Static Var Compensator in Electric Power Systems Considering Different Load Levels. *J Control Autom Electr Syst* **2019**, *30*, 1–8.

15. Savić, A; Djurišić, Ž. Optimal sizing and location of SVC devices for improvement of voltage profile in distribution network with dispersed photovoltaic and wind power plants. *Applied Energy* **2014**, 134, 114-124.
16. Xu, X.; *et al.* Optimal SVC placement for Maximizing Photovoltaic Hosting Capacity in Distribution Network. *IFAC-papers online* **2018**, 51, 356-361.
17. Elmitwally, A.; Eladl, A. Planning of multi-type FACTS devices in restructured power systems with wind generation *Int. Journal of El. Power & Energy Systems* **2016**, 77, 33-42.
18. Duan, C.; *et al.*, FACTS Devices Allocation via Sparse Optimization. *IEEE Trans. Power Systems* **2016**, 31, 1308-1319.
19. Benabid, R.; *et al.*, Optimal location and setting of SVC and TCSC devices using non-dominated sorting particle swarm optimization. *Electric Power Systems Research* **2009**, 79, 1668-1677.
20. Jordehi, R., Brainstorm optimisation algorithm (BSOA): An efficient algorithm for finding optimal location and setting of FACTS devices in electric power systems. *Int. Journal of El. Power & Energy Systems* **2015**, 69, 48-57.
21. Ahmad, A.A.; Sirjani, R., Optimal placement and sizing of multi-type FACTS devices in power systems using metaheuristic optimisation techniques: An updated review. *Ain Shams Engineering Journal* **2019**, in press, ()
22. Singh, B.; Agrawal, G., Enhancement of voltage profile by incorporation of SVC in power system networks by using optimal load flow method in MATLAB/Simulink environments. *Energy Reports* **2018**, 4, 418-434.
23. Sebaa, K.; *et al.*, Location and tuning of TCPSTs and SVCs based on optimal power flow and an improved cross-entropy approach. *Int. Journal of El. Power & Energy Systems* **2014**, 54, 536-545.
24. Subasri, C.K.; Charles Raja, S, Venkatesh P. Power quality improvement in a wind farm connected to grid using FACTS device. *Power Electron Renew Energy Syst* **2015**, 326, 1203–12.
25. Liao, H.; Milanović, J. On capability of different FACTS devices to mitigate a range of power quality phenomena. *IET Gener Transm Distrib* **2017**, 11, 2002–2012
26. Čalasan, M.; *et al.*, CONOPT solver embedded in GAMS for optimal power flow. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* **2019**, 11, 046301
27. Warid, W.; *et al.* Optimal Power Flow Using the Jaya Algorithm. *Energies* **2016**, 9, 678-696.
28. Reddy, S.S; Panigrahi, B.K. Optimal power flow using clustered adaptive teaching learning-based optimization. *International Journal of Bio-Inspired Computation* **2017**, 9, 226-234.
29. Adaryani, R.; Karami, M.A. Artificial bee colony algorithm for solving multiobjective optimal power flow problem. *Int J Electr Power Energy Syst* **2013**, 53, 219–230.
30. Kunari, M. S.; Maheswarapu, S. Enhanced genetic algorithm-based computation technique for multi-objective optimal power flow. *Int J Electr Power Energy Syst* **2010**, 32, 736–742.
31. Kecojević, K.; Lukačević, O.; Čalasan, M. Impact of static var compensator (SVC) devices on power system losses. *B&H Electrical Engineering* **2019**, 13, 50-55.
32. Lijun, H.; *et.al.* A Day-ahead Scheduling Optimization Model of Multi-Microgrid Considering Interactive Power Control, 4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG), Hubei, Yi-chang, China, 2019, pp. 666-669.
33. Wei-Yu Chiu, W.Y.; Sun, H.; Vincent Poor, H. A Multiobjective Approach to Multimicrogrid System Design, *IEEE Trans Smart Grid* **2015**, 6, 2263 – 2272.

34. Huemei, Z.; et. all, Multi-inverters Pre-synchronization VSG Control Strategy for the Microgrid System, IEEE 4th International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC), Singapore, Singapore, 2019, pp. 1-5.
35. Mohanty, A.; Viswavandya, M.; Ray, PK.; Patra, S. Stability analysis and reactive power compensation issue in a microgrid with a DFIG based WECS. *Electr Power Energy Syst* **2014**, *62*, 753–762.
36. Gabbar, H.A.; Abdelsalam, A.A. Microgrid energy management in grid-connected and islanding modes based on SVC. *Energy Convers Manag* **2014**, *86*, 964–972
37. Abdelsalam, AA.; Gabbar, HA.; Sharaf, AM. 'Performance enhancement of hybrid AC/DC microgrid based D-FACTS. *Int J Electr Power Energy Syst* **2015**, *67*, 298–323.
38. Mithulananthan, N.; et.al. Comparison of PSS, SVC, and STATCOM Controllers for Damping Power System Oscillations, *IEEE Trans Power Systems* **2003**, *18*, 786-792.
39. Esmailia, M. R.; et.all., New Coordinated Design of SVC and PSS for Multi-machine Power System Using BF-PSO Algorithm, *Procedia Technology* 2013, **11**, 65 – 74.
40. Lukačević, O.; et al., Impact of optimal ESS allocation in IEEE 24-test bus system on total production cost, Proceedings of 20th International Symposium POWER ELECTRONICS Ee2019, Novi Sad, Serbia, October 23th - 26th 2019, pp. 1-5.
41. Soroudi, A. *Power System Optimization Modeling in GAMS*, Springer, USA, 2017.
42. Duman, S.; Güvenç, U.; Sönmez, Y.; Yörükeren, N. Optimal power flow using gravitational search algorithm. *Energy Convers Manage* **2012**, *59*, 86–95.
43. Bhattacharya, A.; Roy, PK. Solution of multi-objective optimal power flow using gravitational search algorithm, *IET Gener Transm Distrib* **2012**, *6*, 751–763.
44. Miranda, V.; Alves, R. Differential Evolutionary Particle Swarm Optimization (DEEPSO): a successful hybrid, BRICS Congress on Computational Intelligence & 11th Brazilian Congress on Computational Intelligence, Ipojuca, Brazil, 2013.
45. Chiu, W.Y. Multiobjective controller design by solving a multiobjective matrix inequality problem, *IET Control Theory & Appl* **2014**, *8*, 1656 – 1665.
46. Deng, J.; Mao, Y.; Yang, Y. Distribution Power Loss Reduction of Standalone DC Microgrids Using Adaptive Differential Evolution-Based Control for Distributed Battery Systems. *Energies* **2020**, *13*, 2129.
47. Čalasan, M.; Konjić, T.; Kecojević, K.; Lukačević, O.; Optimal Allocation of Static Var Compensators in Electric Power Systems, *Energies* **2020**, *13*, 3219.
48. Mohan, M., R.; Varna, R., K.; Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems, *Wiley-IEEE Press*, 2002. 1 edition.
49. https://www.gegridsolutions.com/powerd/catalog/static_var_comp.htm
50. Đorđević, A.; Olćan, D.; Ispitivanje elektromagnetske kompatibilnosti, *Akademski misao*, 2012.
51. Despotović, Ž.; Kompenzacija reaktivne snage i energije u prisustvu viših harmonika, skripta Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija Višer, Beograd studijski program: Nove energetske tehnologije
52. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/static-var-compensator-market-96574756.html>

