

# Primjena FACTS uređaja u prijenosnim mrežama

---

Labinjan, Adam

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:204199>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-27**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET  
Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**PRIMJENA FACTS UREĐAJA U PRIJENOSNIM MREŽAMA**

Rijeka, rujan 2022.

Adam Labinjan

0069079180

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET  
Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**PRIMJENA FACTS UREĐAJA U PRIJENOSNIM MREŽAMA**

Mentor: Prof. dr. sc. Dubravko Franković

Komentor: Doc. dr. sc. Tomislav Plavšić

Rijeka, rujan 2022.

Adam Labinjan

0069079180

Rijeka, 21. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**  
Predmet: **Vođenje elektroenergetskog sustava**  
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Adam Labinjan (0069079180)**  
Studij: **Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike**  
Modul: **Elektroenergetika**

Zadatak: **Primjena FACTS uređaja u prijenosnim mrežama / Application of FACTS devices in transmission networks**

Opis zadatka:

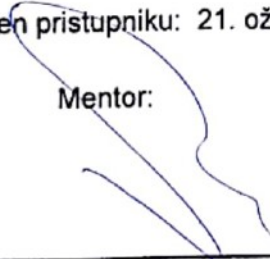
Operatori prijenosnog sustava suočeni su u današnje vrijeme sa sve većim potrebama za prijenosnim kapacitetima, a sve manjim mogućnostima izgradnje novih prijenosnih elemenata, pogotovo nadzemnih vodova. Dodatno se javlja sve veća potreba za fleksibilnim mrežnim regulacijskim uređajima, temeljenima na energetskej elektronici. U radu je potrebno opisati tehnologiju FACTS uređaja i njihovu ulogu u prijenosnim mrežama. Posebno se osvrnuti na FACTS uređaje za serijsku kompenzaciju te opisati tehnologiju na kojoj se temelje. Objasniti nadomjesni model FACTS uređaja za serijsku kompenzaciju te ispitati njegov utjecaj na simulacijskom modelu.

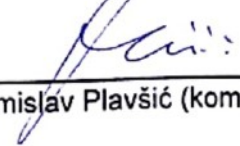
Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

*Adam Labinjan*


Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. dr. sc. Dubravko Franković

  
\_\_\_\_\_  
Doc. dr. sc. Tomislav Plavšić (komentor)

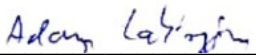
Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. dr. sc. Viktor Sučić

## IZJAVA

Sukladno članku 8. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci od 1. veljače 2020., izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad prema zadatku preuzetom dana 21. ožujka 2022.

Rijeka, 20. rujna 2022.



---

Adam Labinjan



# SADRŽAJ

1. UVOD .....	2
2. OPĆENITO O FACTS TEHNOLOGIJI .....	3
2.1. Jalova snaga u strujnom krugu .....	5
2.2. Tokovi snaga u prijenosnom sustavu.....	7
3. VRSTE FACTS UREĐAJA .....	10
3.1. Serijski FACTS uređaji .....	11
3.2. Paralelni FACTS uređaji .....	14
3.3. Serijsko-serijski FACTS uređaji.....	18
3.4. Serijsko-paralelni FACTS uređaji .....	19
4. IZVEDBE PARALELNIH FACTS UREĐAJA.....	20
4.1. Statički var kompenzator (SVC).....	20
4.1.1. Tiristorski uklopiva i tiristorski upravljiva zavojnica (TSR i TCR) .....	21
4.1.2. Tiristorski uklopiv kondenzator (TSC) .....	24
4.1.3. TSC-TCR uređaj .....	26
4.2. Statički sinkroni kompenzator (STATCOM) .....	28
4.2.1. Usporedba SVC i STATCOM uređaja.....	32
5. IZVEDBE SERIJSKIH FACTS UREĐAJA .....	34
5.1. Tiristorski uklopivi serijski kondenzator (TSSC).....	34
5.2. Serijski kondenzator upravljivan GTO tiristorima (GCSC).....	38
5.3. Tiristorski upravljivi serijski kondenzator (TCSC).....	42
5.4. Statički sinkroni serijski kompenzator (SSSC) .....	46
6. IZVEDBE OBJEDINJENIH FACTS UREĐAJA .....	49
6.1. Objedinjeni regulator toka snage (UPFC) .....	49
6.2. Regulator toka snage među vodovima (IPFC) .....	51
7. PRAKTIČNI DIO .....	52
7.1. TCSC ugrađen na vod Plomin – T-spoj.....	53
7.2. TCSC ugrađen na vod Plomin – Šijana .....	59
7.3. Odabir optimalnog mjesta ugradnje TCSC uređaja.....	63
8. ZAKLJUČAK .....	65
9. LITERATURA .....	66
10. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI.....	67
11. PRILOG .....	68

## 1. UVOD

Elektroenergetski sustav jedne države međusobno je povezan s ostalim elektroenergetskim sustavima susjednih država te zajedno čine veliku sinkronu mrežu. Velika količina električne energije svakodnevno proteče kroz ovu mrežu i sukladno tome nastaju gubici. U današnje vrijeme potražnja za električnom energijom je sve veća i nastoji se osigurati pouzdan prijenos energije te smanjiti gubitke. Pošto elektroenergetski sustav koristi izmjenični napon, snaga na elementima u mreži nije samo djelatna, već postoji i jalova komponenta. Jalova snaga je uzrok dodatnih napreznja u mreži te ju se nastoji održavati na minimalnoj razini. Elektroenergetski sustav je donekle samobalansirajući, odnosno ako je potrošnja u mreži veća od proizvodnje, napon i frekvencija će pasti i obrnuto, ako je proizvodnja veća od potrošnje napon i frekvencija će rasti. Viši ili niži napon tolerira se u određenom postotku, ali često prelazi te granice kad je sustav preopterećen te je potrebna određena vrsta kompenzacije. U tu svrhu uvode se uređaji za kompenzaciju jalove snage koji mogu biti pasivni ili aktivni. Pasivni uređaji su jednostavniji, ali danas se sve više uvode aktivni uređaji koji za rad koriste energetske elektrone. Za razliku od pasivnih, aktivni uređaji su upravljivi pa se mogu bolje prilagoditi uvjetima mreže i kompenzirati niz neželjenih pojava. Aktivni uređaji nazivaju se FACTS uređaji i biti će opisani u sljedećim poglavljima.



## 2. OPĆENITO O FACTS TEHNOLOGIJI

U modernom elektroenergetskom sustavu postoji niz uređaja koji olakšavaju upravljanje i nadzor nad sustavom, a sastoje se od mikroelektronike, računala i brzih komunikacijskih veza. Unatoč svoj digitalnoj opremi u sustavu, prilikom izvršenja naredbi, krajnji sklopni uređaji su izvedeni mehanički pa ne postoji mogućnost brze kontrole sustava. Mehanički sklopni uređaji se ne mogu često koristiti jer prilikom sklapanja dolazi do velikih naprezanja što uzrokuje brzo trošenje. Zbog toga je elektroenergetski sustav teško upravljiv u stacionarnom stanju i prilikom dinamičkih pojava. Razvojem energetske elektronike razvili su se i statički sklopni uređaji pomoću kojih je moguće brzo uklapanje i isklapanje dijelova sustava, te su otvorili niz novih mogućnosti za brzo i efektivno upravljanje elektroenergetskim sustavom i omogućili razvoj uređaja za kompenzaciju, odnosno FACTS uređaja.

FACTS naprave (eng. Flexible Alternating Current Transmission System) su uređaji koji se baziraju na energetskej elektronici i služe za reguliranje napona, tokova snaga i ublažavanje dinamičkih smetnji. Sve se češće koriste u prijenosnom sustavu jer omogućuju povećanje prijenosne moći sustava i na taj se način maksimalno iskorištava postojeći prijenosni sustav, odnosno nema potrebe za nadogradnju postojećih vodova ili izgradnju novih, što je znatna investicija. FACTS uređaji upravljani su GTO i IGBT tiristorima koji se odlikuju velikom brzinom djelovanja (uklapanja i isklapanja) što daje mogućnost kontinuiranog upravljanja određenim veličinama u elektroenergetskom sustavu bez opasnosti od gubitka stabilnosti. Ugrađuju se u postojeća postrojenja i jeftinije su rješenje nego izgradnja novog elektroenergetskog voda. Također, njihova upotreba omogućava prijenos veće količine električne energije kroz postojeće vodove, pa se time povećava vrijednost elektroenergetskog sustava. Osim prije navedenog poboljšanja stabilnosti sustava, FACTS uređajima se poboljšava kontrola nad naponom pri malim i velikim opterećenjima, služe za upravljanje tokovima djelatne i jalove snage, smanjuju nesimetrije, te prigušuju njihanja u sustavu.

Glavne prednosti FACTS uređaja:

- Pojačavanje prijenosne moći postojećih vodova
- Upravljaju tokovima snaga,
- Povećava se opteretivost voda do termičkih i dielektričnih granica,
- Povećava se stabilnost sustava,
- Ograničava se struja kratkog spoja i kontrolira preopterećenje,

- Nadogradnja mreže,
- Omogućen prijenos većeg iznosa djelatne snage zbog smanjenja toka jalove snage

FACTS uređaji nadziru niz značajnih varijabli prijenosnog sustava i taj nadzor im omogućava navedene prednosti. Veličine koje nadziru su: struja, napon, fazni pomak, serijska i poprečna impedancija, te stupanj prigušenja oscilacija različitih frekvencija ispod nazivne.

Povećanjem zahtjeva za električnom energijom raste i opterećenje elektroenergetskih vodova što smanjuje sigurnost elektroenergetskog sustava i otežava upravljanje. Na vodovima može doći do velikih tokova snage koji nisu upravljivi, elektromehaničkih njihanja i prevelikih iznosa jalove snage. Time se vodovi često dovode do granica opteretivosti i može se razlikovati tri vrste ograničenja vodova: temperaturna ograničenja, dielektrična ograničenja i ograničenja stabilnosti. Temperaturno ograničenje ovisi o temperaturi okoline, materijalu od kojeg je vod izrađen, vjetru i udaljenosti od tla. Nazivno temperaturno ograničenje voda se određuje za najgore uvjete okoline koji se događaju vrlo rijetko, te je vod veliku većinu vremena ispod nazivnog opterećenja. Ako je potrebno povećanje opteretivosti voda, može se dodati paralelni vod ili zamijeniti vod vodičem veće opteretivosti. Međutim, ovo su vrlo skupe varijante te su često FACTS uređaji najisplativija opcija. Nazivni napon voda određuje dielektrično ograničenje. Nazivni napon je uvijek nešto niži od stvarnog napona koji vod može podnijeti, što omogućava da se napon na vodu može povećati do 10% ili više. Treće ograničenje je ograničenje stabilnosti. Problemi sa stabilnosti koji ograničavaju prijenosu moć voda su: prijelazna stabilnost, dinamička stabilnost, stabilnost u stacionarnom stanju, slom frekvencije i napona te podsinkrona rezonancija. FACTS uređaji se mogu koristiti za poboljšavanje stabilnosti voda te za optimalno iskorištavanje temperaturnog i dielektričnog ograničenja voda.

FACTS uređaj se ne sastoji od samo jednog uređaja velike snage, već od više uređaja koji se mogu uključiti zasebno ili grupno kako bi se postigla kontrola nad više parametara u elektroenergetskoj mreži. Pomno odabran FACTS uređaj za specifičan vod ili dio mreže može poboljšati prilike na tom dijelu mreže te učiniti kompletnu mrežu stabilnijom i sigurnijom. FACTS uređaji rade na principu injektiranja napona u seriju ili paralelno s vodom. Injektirani napon promjenjiv je po iznosu i kutu u odnosu na napon u čvoru u koji se injektira te se na taj način može upravljati tokovima djelatne i jalove snage.

## 2.1. Jalova snaga u strujnom krugu

Izmjenična mreža i uređaji povezani na nju prilikom uključanja stvaraju vremenski promjenjiva električna polja sukladna narinutom naponu i magnetska polja ovisna o protoku struje. Tokom vremena dolazi do gomilanja energije i njezine pohrane u tim poljima. Naprave kao što su transformatori, motori i generatori rade na temelju svoje sposobnosti skladištenja i oslobađanja energije. Promatrajući strujni krug na slici 2.1. (a) koji se sastoji od izmjeničnog izvora i trošila impedancije  $Z \angle \phi$ , trenutna snaga koju izvor daje trošilu je umnožak trenutnog napona  $v$  i struje  $i$  dan jednadžbom (2.1).

$$p = v \cdot i \quad (2.1)$$

gdje je:

$p$  – trenutna snaga

$v$  – trenutni napon

$i$  – trenutna struja

U stacionarnom stanju iznos napona jednak je:  $v = V_{max} \cos(\omega t)$ , struja iznosi:  $i = I_{max} \cos(\omega t - \Phi)$ , pa se dobije formula za snagu:

$$p = \frac{V_{max} I_{max}}{2} [\cos \Phi + \cos(2\omega t - \Phi)] = VI \cos \Phi (1 + \cos 2\omega t) + VI \sin \Phi \sin 2\omega t \quad (2.2)$$

gdje je:

$V_{max}, I_{max}$  – maksimalni iznos napona i struje

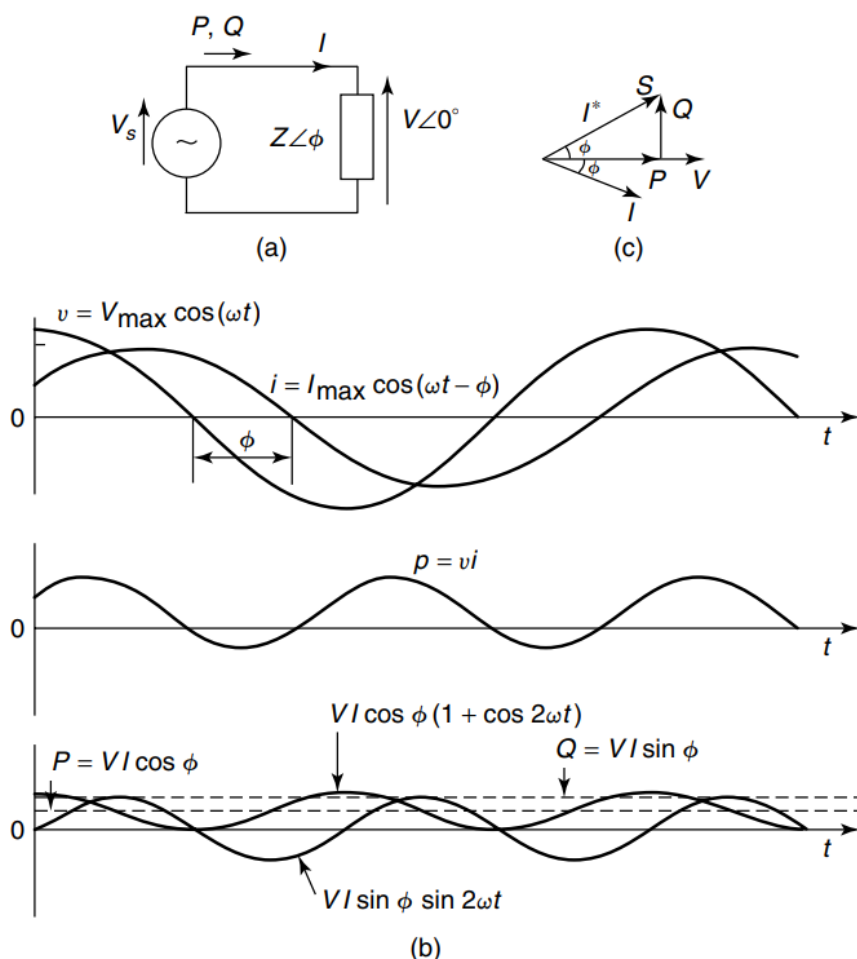
$V, I$  – efektivne vrijednosti napona i struje

$\phi$  – fazni pomak između napona i struje

$\omega$  – frekvencija

$t$  – vrijeme

Napon  $V$  i struja  $I$  su efektivne vrijednosti trenutnog napona  $v$  i trenutne struje  $i$ . U prvom dijelu izraza (2.2) maksimalna vrijednost iznosi  $VI \cos \Phi$ , a srednja vrijednost je djelatna snaga. Drugi dio izraza ima srednju vrijednost jednaku nuli, a maksimalna vrijednost je  $VI \sin \Phi$  koja je ekvivalentna jalovoj snazi. Ovi odnosi prikazani su slikom 2.1. (b).



Slika 2.1. Parametri izmjeničnog strujnog kruga [2]

Naposljetku se dolazi do izraza za prividnu snagu:

$$S = \vec{V} \cdot \vec{I}^* = P + jQ = VI \cos \Phi + jVI \sin \Phi \quad (2.3)$$

gdje je:

$S$  – prividna snaga

$P$  – djelatna snaga

$Q$  – jalova snaga

Na slici 2.1. (c) prikazan je trokut snaga opisan formulom (2.3) koji se sastoji od prividne snage  $S$ , djelatne snage  $P$  i jalove snage  $Q$  te kuta između prividne i djelatne snage  $\phi$ . Iznos djelatne snage se može dobiti umnoškom vektora napona i konjugirano-kompleksnog vektora struje. Elektromagnetske naprave, odnosno zavojnice, često se nazivaju apsorberi jalove snage jer pohranjuju energiju u njihovom magnetskom polju. Kada se spoje na strujni krug, kroz njih poteče

struja koja kasni za naponom te je na njima iznos jalove snage pozitivan. Kondenzatori, odnosno elektrostatski uređaji, su izvori jalove snage, jer spajanjem na strujni krug kroz njih poteče struja koja prethodi naponu te je iznos jalove snage na njima negativan.

## 2.2. Tokovi snaga u prijenosnom sustavu

Tok električne energije kroz elektroenergetski vod prikazan je na slici 2.2. Točke 1 i 2 predstavljaju krajeve voda,  $E_1$  i  $E_2$  su naponi na krajevima voda, a  $\delta$  je fazni kut između ta dva napona. Kut  $\delta$  dobije se razlikom kuta  $\delta_1$  i  $\delta_2$ . Slovo  $X$  predstavlja induktivnu reaktanciju voda, a otpor i kapacitivna reaktancija su zanemareni. Na fazorskom dijagramu prikazani su naponi na krajevima voda, a napon  $E_L$  predstavlja pad napona na vodu. U realnim uvjetima pad napona  $E_L$  i kut  $\delta$  su malih vrijednosti naspram napona  $E_1$  i  $E_2$ . Struja koja teče vodom kasni za  $90^\circ$  za naponom  $E_L$  i dana je izrazom (2.4)

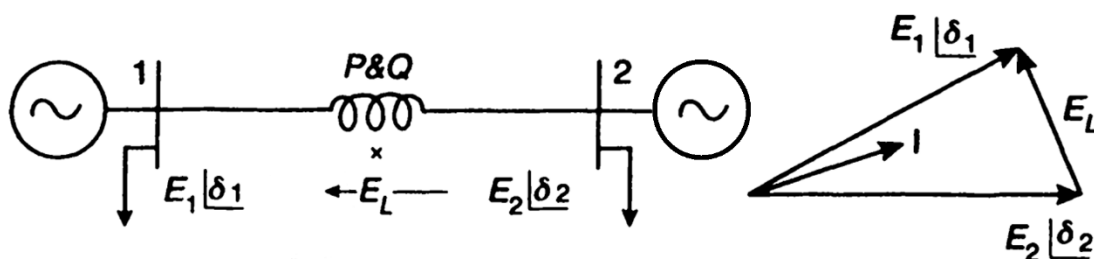
$$I = \frac{E_L}{X} \quad (2.4)$$

gdje je:

$I$  – struja koja teče kroz vod,

$E_L$  – pad napona na vodu,

$X$  – induktivna reaktancija voda.



Slika 2.2. Pojednostavljena shema elektroenergetskog voda i fazorski dijagram [1]

Tok struje kroz vod moguće je kontrolirati upravljanjem naponom na vodu, kutom  $\delta$  te induktivnom reaktancijom voda. Što je kut  $\delta$  manji, fazor struje bliži je fazoru napona što predstavlja veći tok djelatne snage. Promjenom reaktancije voda mijenjamo struju koja teče kroz vod, te će se promijeniti i iznos djelatne snage na vodu. Djelatna snaga voda računa se prema izrazu (2.5).

$$P = \frac{E_1 E_2}{X} \sin \delta \quad (2.5)$$

gdje je:

$P$  – djelatna snaga na vodu,

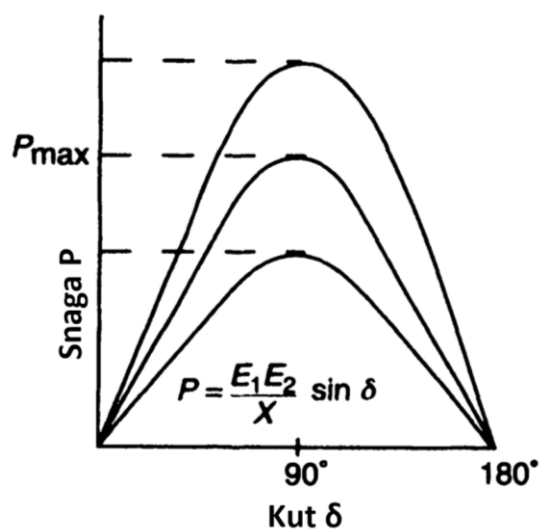
$E_1$  – napon na početku voda

$E_2$  – napon na kraju voda

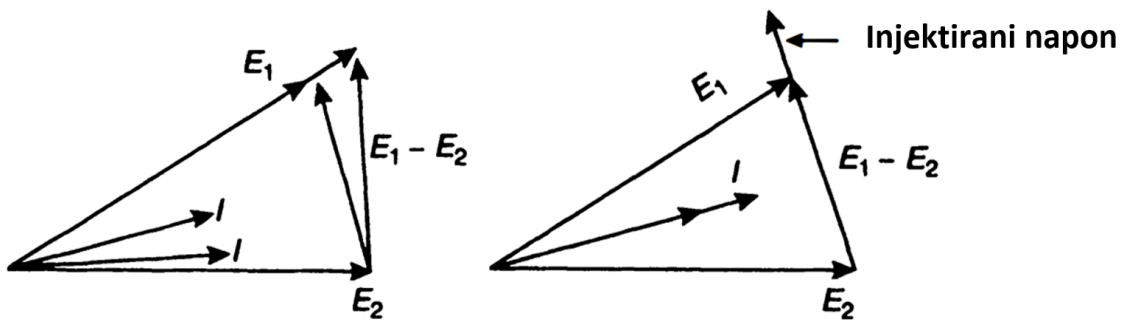
$X$  – induktivna reaktancija voda

$\delta$  – kut između napona  $E_1$  i  $E_2$

Na slici 2.3. prikazan je poluval sinusoide djelatne snage koji ima maksimum pri kutu od  $90^\circ$  te pada do nule pri  $180^\circ$ . Smanjenjem induktivne reaktancije  $X$  povećat će se visina krivulje i obrnuto, povećanjem  $X$  smanjuje se visina krivulje. Bez kontrole parametara kao što su naponi na početku i kraju voda, induktivna reaktancija i fazni kut, nije moguće iskoristiti maksimalni kapacitet voda, odnosno moguće je iskoristiti vod do kuta koji je znatno manji od  $90^\circ$ . Za konstantni tok snage promjena induktivne reaktancije  $X$  znači promjenu kuta  $\delta$ . Drugi način kontrole toka snage kroz vod je promjenom iznosa napona  $E_1$  ili  $E_2$ , što utječe na kut pada napona na vodu te se time može regulirati tok jalove snage. Injektiranjem napona u seriju s vodom mijenja se iznos struje a time i snage koja teče kroz vod. Injektirani napon je u fazi s padom napona na vodu, odnosno  $E_L$  i time se povećava tok djelatne snage.



Slika 2.3. Promjena snage na vodu ovisno o kutu za tri različite reaktancije  $X$  [1]



Slika 2.4. Promjena struje kroz vod s promjenom iznosa napona i injektiranjem napona [1]

Injektiranjem napona u seriju s vodom i mijenjanjem njegovog iznosa i faznog pomaka moguće je kontrolirati djelatnu i jalovu snagu na vodu.

### 3. VRSTE FACTS UREĐAJA

FACTS uređaje možemo podijeliti prema vrsti priključka na četiri skupine:

- Serijske
- Paralelne
- Kombinirane serijsko-serijske
- Kombinirane serijsko-paralelne

Serijski uređaji mogu biti izvedeni kao promjenjiva impedancija u obliku zavojnice i kondenzatora ili mogu biti promjenjivi izvor nazivne frekvencije, harmoničkih frekvencija ili podsinkrone frekvencije osnovan na energetskej elektronici. Ovi uređaji injektiraju napon u seriju s vodom.

Paralelni uređaji također mogu biti izvedeni kao promjenjiva impedancija, promjenjiv izvor ili njihova kombinacija. Ovi uređaji injektiraju struju u vod, te ovisno o faznom pomaku struje od linijskog napona voda kontroliraju djelatnu i jalovu snagu na vodu.

Kombinirani serijsko-serijski uređaji sastoje se od nekoliko serijskih uređaja u različitim vodovima koji su kontrolirani jednim upravljačkim uređajem. Svaki uređaj upravlja jalovom snagom u svom vodu, a međusobno su povezani istosmjernom vezom preko koje mogu prenijeti djelatnu snagu i injektirati je u određen vod kada je to potrebno.

Kombinirani serijsko-paralelni uređaji mogu se sastojati od odvojenih serijskih i paralelnih uređaja koji su kontrolirani upravljačkom jedinicom ili mogu biti izvedeni kao objedinjeni regulator toka snage. Kad su uređaji odvojeni, paralelni uređaj injektira struju u vod, a serijski injektira napon u vod. Ako je uređaj izveden kao objedinjeni regulator toka snage onda postoji i mogućnost razmjene djelatne snage između paralelnog i serijskog uređaja pomoću istosmjerne veze.

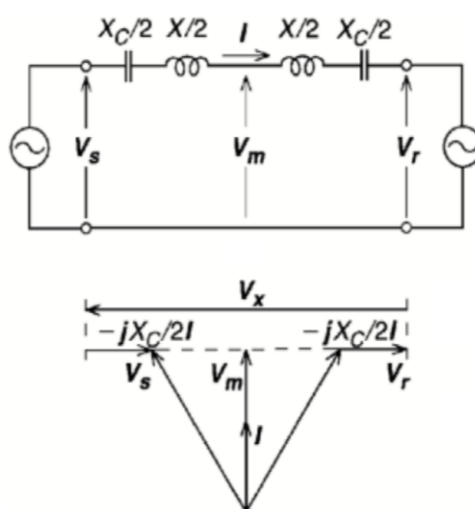


### 3.1. Serijski FACTS uređaji

Serijski FACTS uređaji mogu biti izvedeni kao promjenjive impedancije u obliku kondenzatora i zavojnica ili kao promjenjivi naponski izvor koji je napravljen na bazi energetske elektronike. Ovi uređaji rade na principu injekcije napona u seriju s vodom. Kada se na vod serijski spoji impedancija, njen iznos se množi sa strujom koja teče vodom te se dobiveni napon injektira u vod. Serijska impedancija je promjenjivog iznosa, pa će ovisno o potrebi trošiti ili proizvoditi jalovu snagu ako se fazni pomak napona održava okomitim na struju kroz vod. Ako dođe do odstupanja faznog pomaka između napona i struje, odnosno ako on više ne iznosi  $90^\circ$ , pojavit će se i djelatna snaga na impedanciji. Zbog kompenzacije je ukupni induktivitet voda manji, pa se korištenjem serijskih uređaja prividno smanjuje duljina voda. Time se povećava prijenosna moć voda.

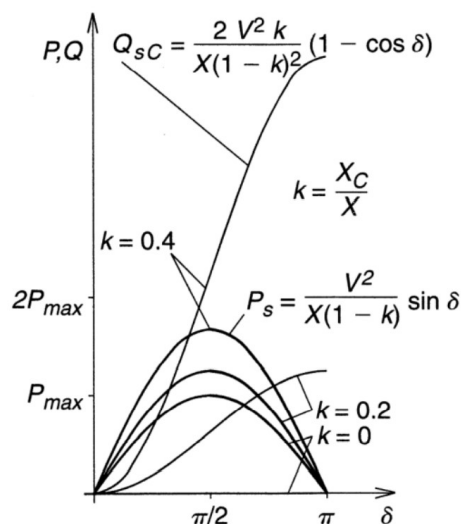
Serijska kompenzacija se nekada koristila kao pasivna kapacitivna kompenzacija sa kondenzatorskim baterijama. U današnje vrijeme koriste se aktivni kompenzacijski uređaji kojima se može ostvariti promjenjiva kompenzacija što rezultira poboljšanim tokovima snaga i stabilnošću sustava. Brzina djelovanja aktivnih upravljačkih uređaja je vrlo bitna jer se brzom reakcijom mogu smanjiti ili ukloniti poremećaji u sustavu izazvani uklapanjem i isklapanjem kompenzacijskih uređaja.

Na slici 3.1. prikazana je serijska kompenzacija gdje se induktivitet voda kompenzira pomoću kondenzatora. Kapacitet djeluje tako da prividno skraćuje vod smanjenjem ukupne impedancije voda. Ispod sheme dan je vektorski prikaz napona.



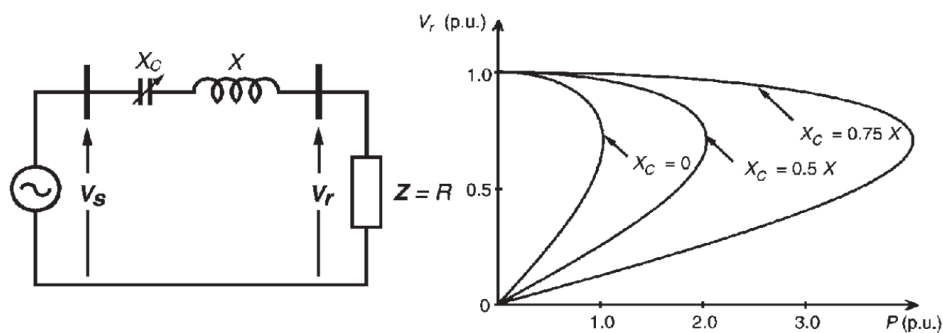
Slika 3.1. Serijska kompenzacija s kondenzatorima [3]

Kako se stupanj kompenzacije povećava tako raste djelatna snaga prijenosa, što je vidljivo na slici 3.2.. Isto vrijedi i za jalovu snagu koju daje kompenzator te je ona također veća s povećanjem stupnja kompenzacije. Slovo  $k$  predstavlja stupanj kompenzacije koji može biti između nule i jedinice i jednak je omjeru kapacitivne reaktancije kompenzatora i reaktancije voda. Na slici 3.2. je vidljiv odnos djelatne snage na vodu, jalove snage koju daje kondenzator za kompenzaciju i kuta  $\delta$  ovisno o promjeni stupnja kompenzacije od  $k = 0$  preko  $k = 0,2$  do  $k = 0,4$ .



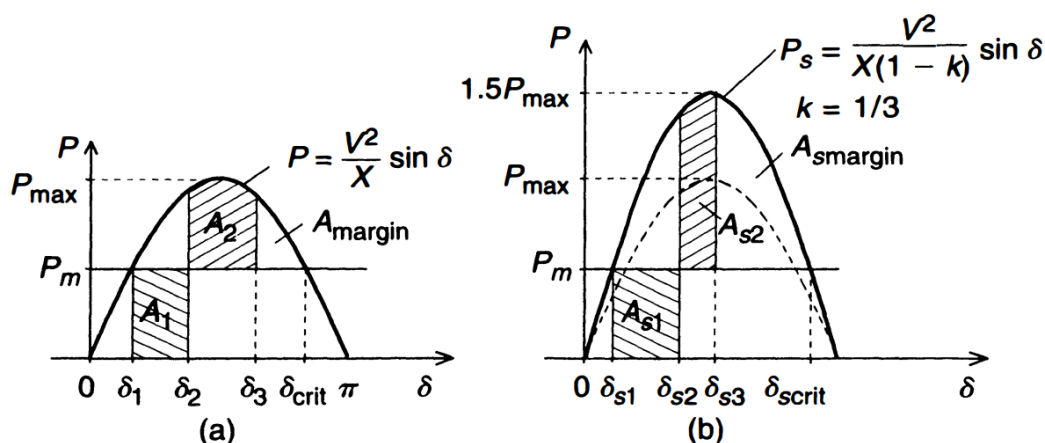
Slika 3.2. Promjena radne i jalove snage ovisno o kutu napona [3]

Serijska kompenzacija pomoću kondenzatora se može koristiti u svrhu smanjenja promjenjivosti napona na kraju voda čime se također smanjuje mogućnost nastanka sloma napona. Na slici 3.3. prikazan je jednostavan strujni krug sa izvorom napona  $V_s$ , trošilom impedancije  $Z$ , reaktancijom voda  $X$  i promjenjivom reaktancijom  $X_c$ . Desno su prikazane  $P$ - $V$  krivulje za različite iznose kompenzacije. Krajnje točke krivulja predstavljaju naponsku nestabilnost za određeni stupanj kompenzacije. Vidljivo je da veći stupanj kompenzacije rezultira većom naponskom stabilnošću.



Slika 3.3. Radijalni sustav i pripadajuće  $P$ - $V$  krivulje [3]

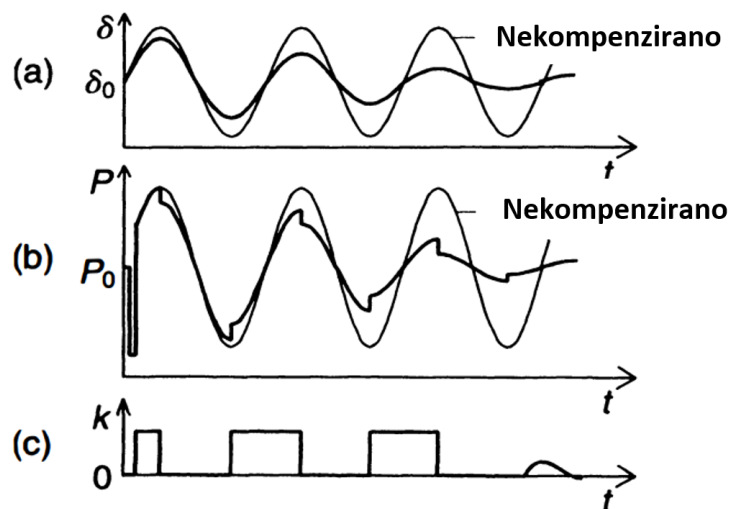
Serijski FACTS uređaji koriste se i za poboljšanje prijelazne stabilnosti sustava i ublažavanje elektromehaničkih njihanja. Ako sustav na slici 3.1. prenosi istu snagu  $P_m$  bez kompenzacije i sa kompenzacijom i ako se u oba slučaja dogodi isti kvar, prijelazne pojave će biti različite za ta dva slučaja. Na slici 3.4. prikazane su krivulje odnosa snage i kuta njihanja rotora za kompenzirani (b) i nekompenzirani sustav (a). Prilikom nastanka poremećaja, generator ubrzava od kuteva  $\delta_1$  i  $\delta_{s1}$  do trenutka kada kvar prestane kojeg predstavljaju kutevi  $\delta_2$  i  $\delta_{s2}$ . Po prestanku kvara generator počinje usporavati do kuteva  $\delta_3$  i  $\delta_{s3}$  gdje se uspostavlja ravnoteža. Površine  $A_1$  i  $A_{s1}$  predstavljaju energije ubrzanja, a površine  $A_2$  i  $A_{s2}$  energije usporavanja generatora. Površina omeđena krivuljom  $P$ - $\delta$  i konstantnom snagom  $P_m$  između kuteva  $\delta_3$  i  $\delta_{crit}$  ili kuteva  $\delta_{s3}$  i  $\delta_{scrit}$  je margina prijelazne stabilnosti  $A_{margin}$  odnosno  $A_{smargin}$ . Vidljivo je kako je prilikom serijske kompenzacije margina veća. Povećanjem stupnja kompenzacije povećava se i margina prijelazne stabilnosti. Za potpunu kompenzaciju i idealni vod povećanje margine je neograničeno. Međutim, u praksi je stupanj kompenzacije često limitiran i na manje od 30% jer postoji mogućnost pojave subsinkrone rezonancije.



Slika 3.4.  $P$ - $\delta$  krivulja za sustav bez kompenzacije (a) i s kompenzacijom (b) [1]

Kada se serijski kompenzator koristi za ublažavanje elektromehaničkih njihanja potrebna je vrlo brza promjena stupnja kompenzacije. Odnos mehaničke i električne snage na generatoru treba biti jednak. Prilikom ubrzanja generatora postoji višak mehaničke snage, te je potrebno povećati električnu snagu kako bi se kompenzirao taj višak. Usporavanjem generatora nastaje manjak mehaničke snage pa je potrebno smanjiti električnu snagu. Na slici 3.5. prikazano je prigušenje njihanja kuta rotora  $\delta$  oko stacionarnog stanja  $\delta_0$  (a), promjena djelatne snage prijenosa  $P$  oko stacionarnog stanja  $P_0$  i naglog propada na početku grafa koji je uzrokovao poremećaj (b) te stupanj kompenzacije  $k$  (c). Stupanj kompenzacije ima samo dva stanja – maksimalna kompenzacija i nula, odnosno bez kompenzacije. Kada je  $k$  maksimalan impedancija voda je

minimalna te se vodom prenosi maksimalna električna snaga. Obrnuto vrijedi kada je  $k = 0$ , tada je impedancija voda maksimalna, a električna snaga prenesena vodom je minimalna. Ovaj način promjene stupnja kompenzacije između maksimalnog i minimalnog je najbolji za prigušenje velikih oscilacija. Ako se prigušuju manje oscilacije, bolji način prigušenja bio bi varijabilnom promjenom stupnja kompenzacije, odnosno iskorištavanjem svih vrijednosti stupnja kompenzacije između minimalne i maksimalne vrijednosti.



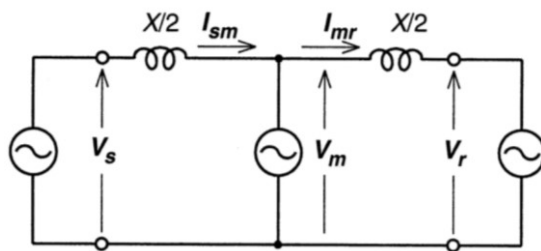
Slika 3.5. Prikaz prigušenja elektromehaničkih njihanja [1]

### 3.2. Paralelni FACTS uređaji

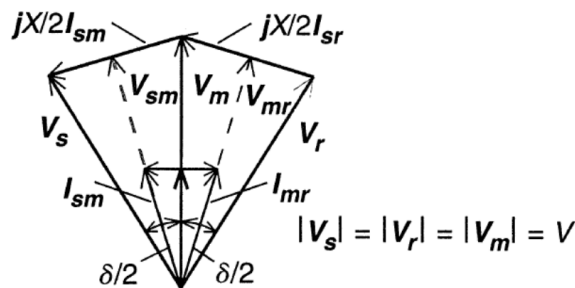
Paralelni FACTS uređaji, jednako kao i serijski, izvedeni su kao promjenjiva impedancija ili kao promjenjivi naponski izvor, a mogu biti i kombinacija ove dvije izvedbe. Princip rada ovih uređaja je da injektiraju struju u čvorište na koje je spojen uređaj. Pomoću promjenjive impedancije stvara se promjenjiv tok struje kroz vod. Kako je uređaj spojen paralelno na sabirnicu, dobiva se paralelna injekcija struje u sabirnicu. Vrijedi isti princip kao i kod serijskih naprava, odnosno kada je fazni kut struje okomit na napon čvorišta paralelni uređaj troši ili proizvodi jalovu snagu. Djelatna snaga se pojavljuje ako je fazni kut različit od  $90^\circ$ . Paralelni uređaji se koriste za poboljšanje naponskih prilika na vodu. U slučaju povišenog napona prilikom malog opterećenja koriste se paralelno spojene prigušnice koje smanjuju napon. Ukoliko je sustav jako opterećen, napon na vodovima biti će nizak i koristit će se paralelno spojeni kondenzatori za povećanje napona. Kao i serijski, paralelni uređaji se koriste za poboljšanje sustava prilikom stacionarnih i prijelaznih stanja, odnosno poboljšavaju prijelaznu stabilnost sustava i prigušuju

elektromehanička njihanja. Paralelni uređaji mogu se postaviti na sredinu voda zbog segmentiranja ili da se izbjegne nestabilnost napona. Pošto je pad napona na sredini nekompensiranog voda najveći, najbolje mjesto za kompenzaciju je sredina voda. Moguće je postaviti više jednako udaljenih kompenzatora na jedan vod čime bi se prijenosna moć povećala proporcionalno broju segmenata voda. To se u praksi ne izvodi jer je takav sustav preskup i upravljanje bi bilo vrlo kompleksno jer svi kompenzatori trebaju biti sinkronizirani.

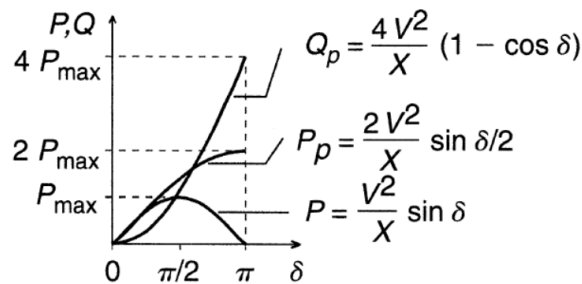
Na slici 3.6. prikazan je dvostrojni sustav sa paralelno spojenim var kompenzatorom na sredini voda kojeg predstavlja naponski izvor koji je u fazi sa naponom  $V_m$ . Također, njegov iznos je jednak iznosima napona na početku voda  $V_s$  i na kraju voda  $V_r$ . Odnos napona i struja koje teku vodom te faznih pomaka među njima dan je fazorskim dijagramom na slici 3.7.



Slika 3.6. Prikaz paralelnog kompenzatora [1]



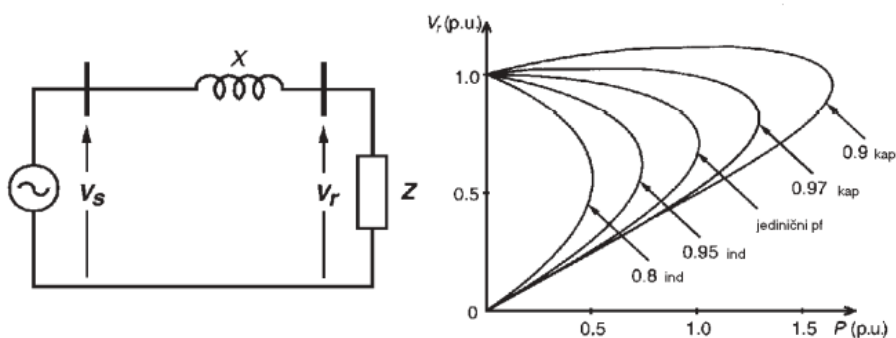
Slika 3.7. Prikaz fazorskog dijagrama [1]



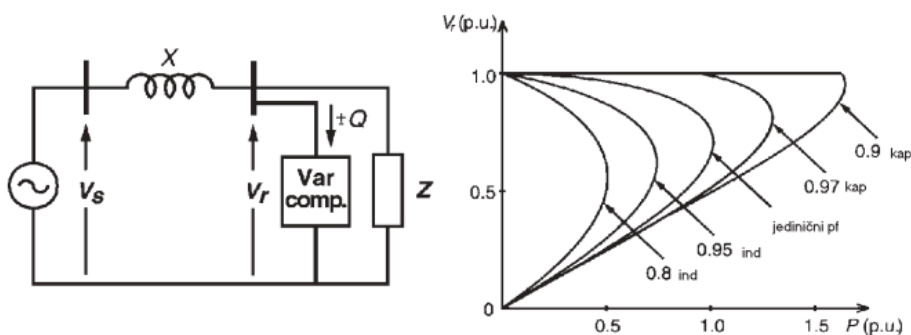
Slika 3.8. Ovisnost radne i jalove snage o naponskom kutu [1]

Slikom 3.8. prikazan je odnos prijenosne moći i naponskog kuta  $\delta$ .  $Q_p$  predstavlja injektiranu jalovu snagu, a  $P_p$  radnu snagu prenesenu kroz vod. Na slici je vidljivo da se prijenosna moć znatno povećala, ali je za to bio potreban i velik iznos jalove snage koju je dao kompenzator. Idealni kompenzator ne vrši izmjenu djelatne snage, već samo jalove snage. Nikada se ne vrši potpuna kompenzacija zbog ekonomskih razloga. Iz slike 3.8. može se vidjeti da bi za dvostruko povećanje prijenosne moći bilo potrebno dovesti četiri puta veću jalovu snagu ( $4 P_{max}$ ). Zbog toga je jalova snaga dovedena iz paralelnog uređaja znatno manja od snage potrebne za potpunu kompenzaciju.

Može se promotriti jednostavan model mreže sa izvorom napona, teretom impedancije  $Z$ , te vodom reaktancije  $X$  zajedno sa pripadajućim krivuljama odnosa napona  $V$  i snage  $P$  što je prikazano slikom 3.9. Krivulje su dane za različite faktore snage tereta, od 0,8 induktivno do 0,9 kapacitivno. Krajnja točka svake krivulje označava limit stabilnosti napona koji se smanjuje ako je teret induktivan, a povećava kada je teret kapacitivan. Na slici 3.10. prikazana je ista mreža sa dodanim paralelnim kompenzatorom na kraju voda. Kompenzator se dodaje na kraj voda jer se na tom mjestu pojavljuje najveća promjena i pad napona. Iz  $P$ - $V$  krivulja vidljivo je kako kompenzator povećava stabilnost napona preuzimajući jalovu snagu i održavajući napon na sabirnici konstantnim.

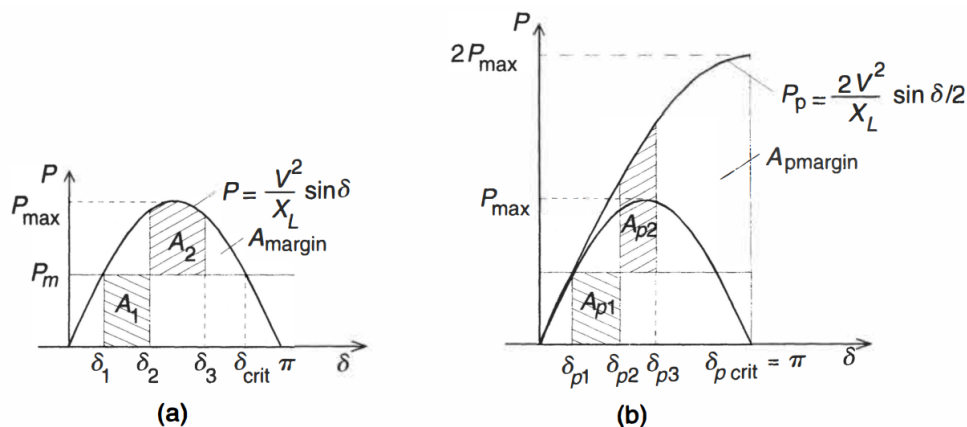


Slika 3.9. Model mreže bez kompenzacije i pripadajuće  $P$ - $V$  krivulje [3]



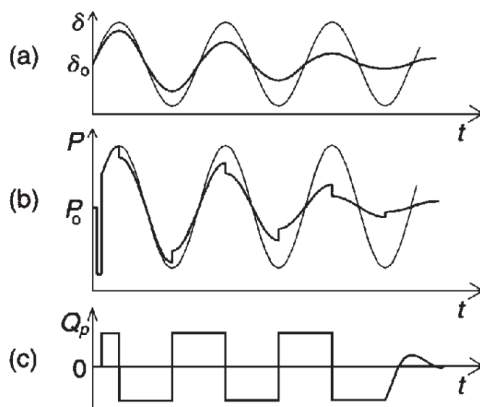
Slika 3.10. Model mreže s poprečnom kompenzacijom i pripadajuće  $P$ - $V$  krivulje [3]

Kao i serijski, paralelni uređaj ima mogućnost poboljšanja prijelazne stabilnosti sustava i elektromehaničkih njihanja. Za prijelaznu stabilnost promatraju se slične krivulje kao i kod serijskih uređaja, odnosno  $P-\delta$  krivulje prikazane na slici 3.11. Vidljivo je kako je margina prijelazne stabilnosti u slučaju s kompenzacijom  $A_{pmargin}$  puno veća nego u slučaju nekompensiranog sustava  $A_{margin}$ .



Slika 3.11.  $P-\delta$  krivulje nekompensiranog sustava (a) i kompenziranog sustava (b) [1]

Elektromehanička njihanja nastaju kada sustav ima premali stupanj prigušenja pa čak i prilikom malog poremećaja može doći do njihanja kuta generatora. U nekim sustavima s vrlo malim stupnjem prigušenja nastanak elektromehaničkih njihanja predstavlja toliki problem da je to jedan od faktora koji ograničavaju prijenosu moć voda. Prikaz na slici 3.12. sličan je onome za serijske kompenzatore, samo je ovdje na (c) dijelu slike prikazana jalova snaga koju daje kompenzator. Upravljanja velikim poremećajima vrši se skokovitim injektiranjem jalove snage na mjestu kompenzacije. Kompenzator daje kapacitivnu jalovu snagu na pozitivnom dijelu grafa, a induktivnu jalovu snagu na negativnom dijelu grafa. Za male poremećaje koristi se kontinuirano upravljanje jalovom snagom.

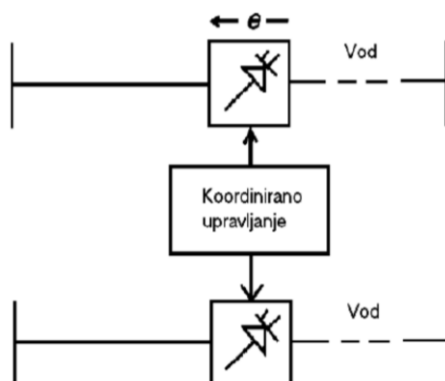


Slika 3.12. Prikaz prigušenja elektromehaničkih njihanja [3]

Ukratko, paralelni FACTS uređaj treba zadovoljiti određene kriterije za učinkovit rad. Idealno mjesto spajanja paralelnog kompenzatora na mrežu je sredina voda u slučaju dvostrano napajane mreže. Za radijalnu, odnosno jednostrano napajanu mrežu optimalno mjesto spajanja je kraj voda. Paralelni FACTS uređaj treba biti sinkroniziran sa sabirnicom na koju je spojen u bilo kojem trenutku, čak i prilikom većih poremećaja. Kompenzator se mora sinkronizirati čim prije u slučaju kada dođe do sloma napona u sustavu. Također, njime se postiže regulacija napona sabirnice, poboljšanje prijelazne stabilnosti sustava te ublažavanje elektromehaničkih njihanja.

### 3.3. Serijsko-serijski FACTS uređaji

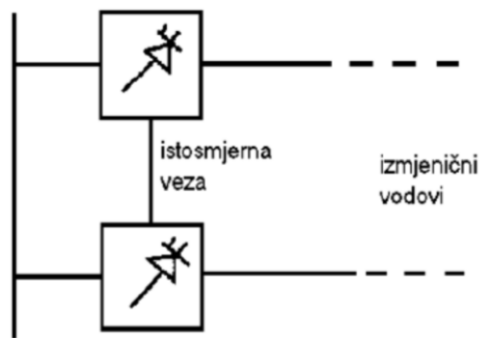
Kombinirani serijsko-serijski uređaji izvode se na dva načina. Prva izvedba se sastoji od više serijskih komponenti u sustavu s više vodova koje su koordinirano upravljane jednim upravljačkim uređajem. Jedan primjer ovakvog uređaja prikazan je slikom 3.13.



Slika 3.13. Koordinirano upravljane serijske komponente [3]

U drugoj izvedbi svaki vod ima svoj nezavisni uređaj za kompenziranje jalove snage. Kompenzacijski uređaji su međusobno spojeni istosmjernom vezom kojom je omogućen prijenos djelatne snage. U praksi ovakav uređaj je IPFC (regulator toka snage među vodovima) i on omogućuje postizanje ravnoteže između djelatnih i jalovih snaga te se tako maksimalno iskorištava prijenosna moć sustava.

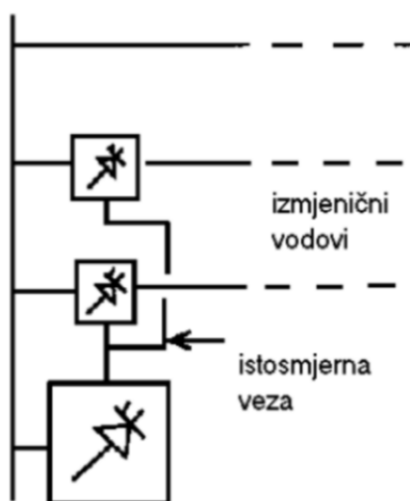




Slika 3.14. Serijski uređaji povezani istosmjernom vezom [3]

### 3.4. Serijsko-paralelni FACTS uređaji

Postoje dvije moguće izvedbe serijsko-paralelnih komponenti. U prvoj su serijska i paralelna komponenta razdvojene i njima se koordinirano upravlja, dok su u drugoj objedinjene. U objedinjenoj izvedbi serijska i paralelna komponenta su povezane istosmjernom vezom preko koje se razmjenjuje djelatna snaga. Serijski dio služi za injekciju napona čime se reguliraju tokovi snaga, a paralelni za injekciju struje u vod čime se utječe na napon u čvoru gdje je spojen uređaj. Serijski uređaj se dimenzionira za veće snage od paralelnog uređaja ako je namjena uređaja prigušenje njihanja i upravljanje tokom snage. Ako postoji potreba da svaki vod ima svoj serijski kompenzator, moguće je koristiti samo jedan paralelni kompenzator koji se povezuje sa serijskim uređajima istosmjernom vezom. Serijsko-paralelnim kompenzatorima se dobivaju najbolja svojstva od oba uređaja. U praksi ovakav uređaj se naziva objedinjeni regulator toka snage (UPFC).

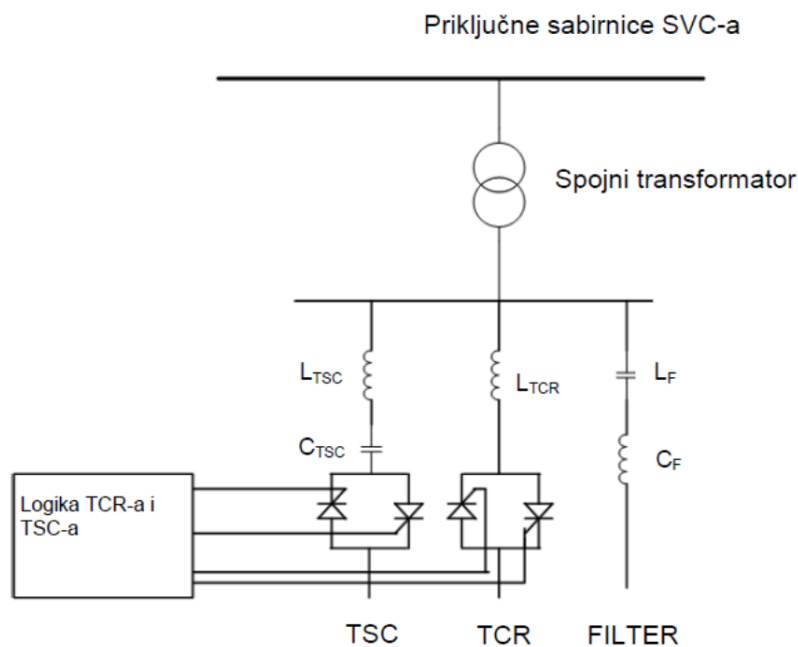


Slika 3.15. Serijsko-paralelni uređaj sa serijskim kompenzatorom u svakom vodu [3]

## 4. IZVEDBE PARALELNIH FACTS UREĐAJA

### 4.1. Statički var kompenzator (SVC)

SVC je paralelni FACTS uređaj koji injektira induktivnu ili kapacitivnu struju u sabirnicu na koju je spojen, te na taj način regulira napon na toj sabirnici. SVC kao pojam odnosi se na više uređaja koji mogu biti tiristorski uklopive ili upravljive zavojnice i kondenzatori, a često i kombinacija ovih uređaja. Osnovni dio statičkih var kompenzatora je sklopni krug sastavljen od tiristora. Sklopni krug upravlja cijelim uređajem i njegovim parametrima u svrhu usklađivanja uređaja sa stanjem mreže. Sklopni uređaji su tiristori bez mogućnosti isključenja. Poluvodički uređaji su oduvijek predstavljali problem prilikom korištenja za sklapanje velikih struja i napona jer su vrlo osjetljivi pa je njihova upotreba u prijenosnom sustavu započela relativno nedavno, nakon napretka u tehnologiji njihove proizvodnje. Zbog toga se SVC uređaji redovno spajaju na prijenosi sustav preko transformatora. Glavni dijelovi koji služe za kompenzaciju u SVC uređaju su TCR ili TSR te TSC. TCR i TSR je upravljiva ili uklopiva zavojnica koja preuzima jalovu snagu iz mreže. TSC je uklopivi kondenzator koji daje jalovu snagu u mrežu. Tipični izgled SVC uređaja dan je na slici 4.1.

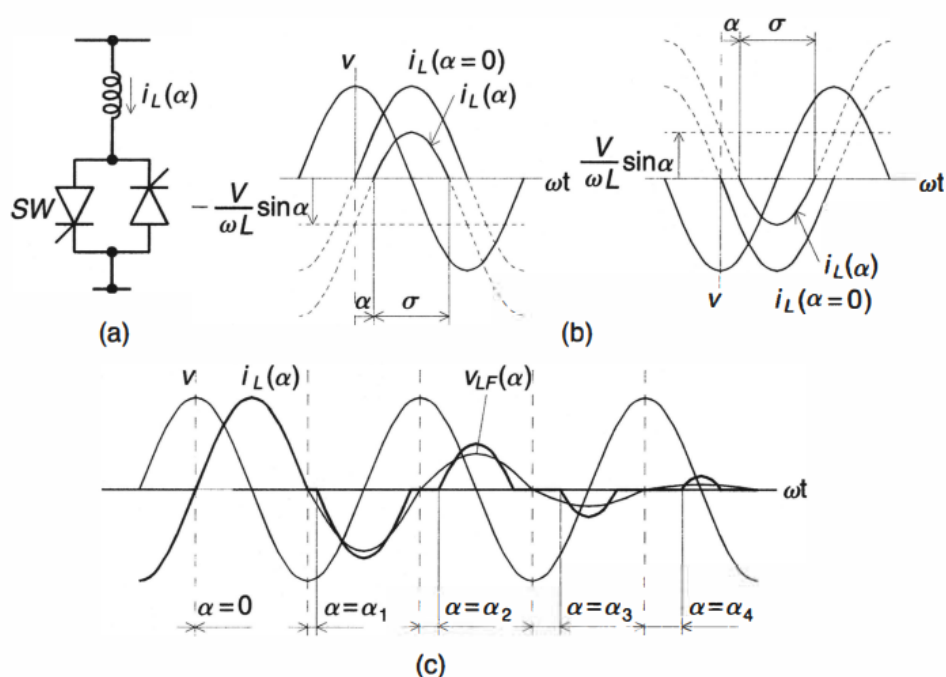


Slika 4.1. SVC uređaj [5]

#### 4.1.1. Tiristorski uklopiva i tiristorski upravljiva zavojnica (TSR i TCR)

Tiristorski upravljiva zavojnica (TCR) sastoji se od zavojnice sa zračnom jezgrom induktiviteta  $L$  i antiparalelnog spoja tiristora koji služi kao dvosmjerna sklopka, odnosno jedan od tiristora vodi tokom pozitivne poluperiode, a drugi tokom negativne poluperiode napona. U praksi se često spaja više tiristora u seriju kako bi mogli podnijeti napon na koji se spajaju. Ovakvi tiristori mogu podnijeti napon između 4000 V i 9000 V i struju između 3000 A i 6000 A. Na slici 4.2. a) dan je prikaz TCR uređaja. Tiristori se uključuju kada se dovede impuls na upravljačku elektrodu, a isključuju se prolaskom sinusoidne struje kroz nulu. Promjenom kuta vođenja tiristora, odnosno njegovim kašnjenjem za vršnom vrijednošću sinusoidne napona moguće je mijenjati struju na zavojnici od maksimalne do nule.

Na slici 4.2. b) prikazan je odnos napona  $v$  i struje  $i_L(\alpha)$ . Ako je kut vođenja tiristora  $\alpha = 0$ , tada je struja koja teče kroz zavojnicu maksimalna. U slučaju kada je kut  $\alpha$  između  $0$  i  $\pi/2$ , iznos struje na zavojnici opisan je formulom (4.1) gdje je napon  $v(t) = V \cos(\omega t)$ . Izraz  $\frac{V}{\omega L} \sin \alpha$  predstavlja konstantu koja ovisi o kutu  $\alpha$ , odnosno iznos za koji je sinusoida struje pomaknuta prema dolje za pozitivni polual ili gore za negativni polual. Zbog toga je iznos struje manji što je kut vođenja veći.



Slika 4.2. TCR a), kontrola kuta vođenja tiristora b) i valni oblici različitih kutova vođenja c) [1]

Na slici 4.2. c) prikazano je kako se struja smanjuje povećavanjem kuta vođenja. Promjena kuta vođenja moguća je jednom tokom poluperiode za vrijednosti kuta između 0 i  $\pi/2$ . Zbog toga dolazi do kašnjenja u kontroli.

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_{\alpha}^{\omega t} v(t) dt = \frac{V}{\omega L} (\sin \omega t - \sin \alpha) \quad (4.1)$$

gdje je:

$i_L(t)$  – trenutna vrijednost struje,

$L$  – induktivitet zavojnice,

$v(t)$  – trenutna vrijednost napona,

$V$  – amplituda napona,

$\omega$  – kutna frekvencija napona,

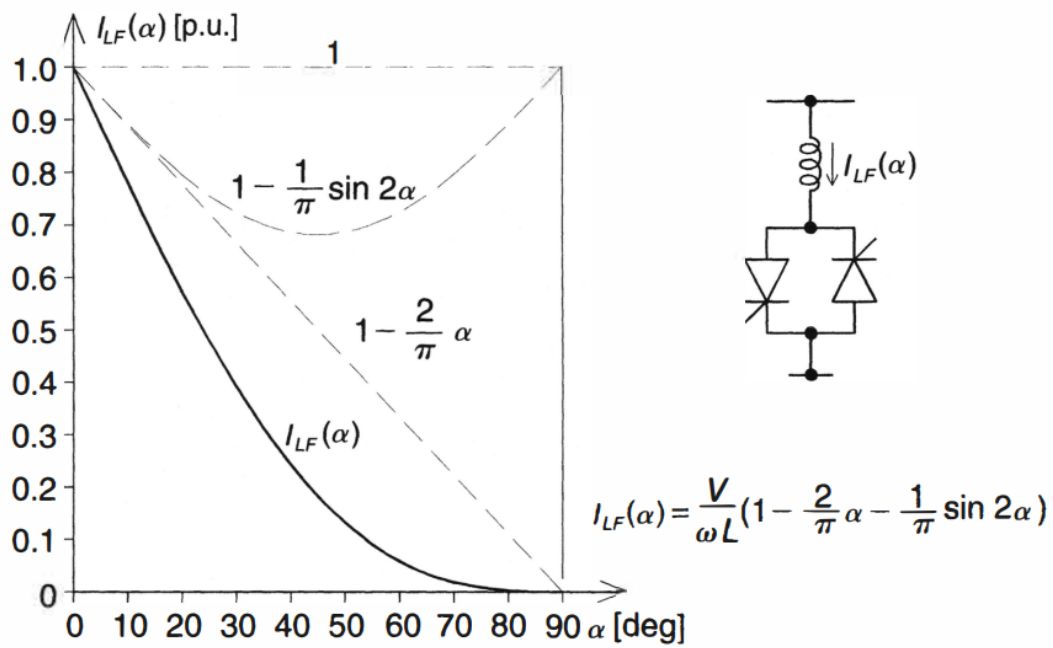
$\alpha$  – kut vođenja tiristora.

Formulom (4.2) dana je amplituda struje  $i_{LF}(\alpha)$  u ovisnosti o kutu  $\alpha$ , a izgled njenog grafa prikazan je na slici 4.3. Jasno je vidljivo da je upravljanje strujom moguće od nule pa sve do maksimalne vrijednosti. TCR se na ovaj način ponaša kao promjenjiva susceptancija koja se može opisati izrazom (4.3). Maksimalni iznosi napona i struje ograničeni su specifikacijama zavojnice i tiristora pa se TCR uređaj može koristiti u granicama koje su prikazane  $V - I$  grafom na slici 4.4. a). Na istoj slici pod b) dan je  $V - I$  graf za TSR, odnosno tiristorski uklopivu zavojnicu.

$$I_{LF}(\alpha) = \frac{V}{\omega L} \left( 1 - \frac{2}{\pi} \alpha - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \right) \quad (4.2)$$

gdje je:

$I_{LF}(\alpha)$  – amplituda struje

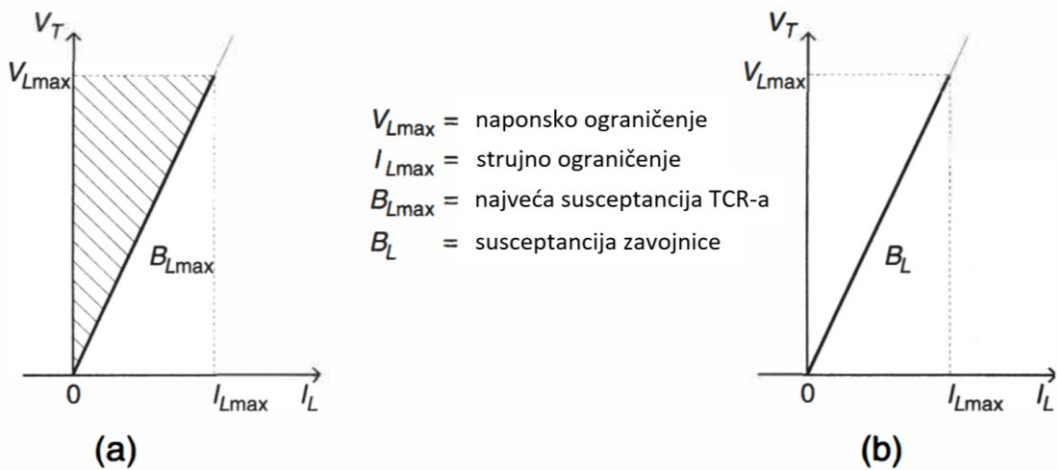


Slika 4.3. Promjena amplitude struje s obzirom na kut vođenja [1]

$$B_L(\alpha) = \frac{1}{\omega L} \left( 1 - \frac{2}{\pi} \alpha - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \right) \quad (4.3)$$

gdje je:

$B_L(\alpha)$  – susceptancija zavojnice



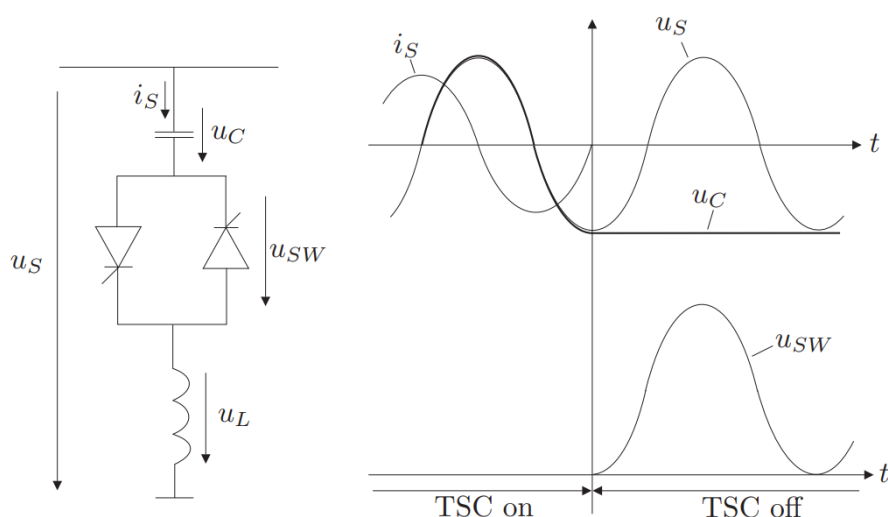
Slika 4.4. V-I karakteristika područja rada za TCR a) i TSC b) [1]

TSR uređaj izvedbom je jednak TCR uređaju, jedino je kut vođenja TSR-a konstantan, odnosno jednak je nuli. TSR predstavlja fiksnu susceptanciju koja se može samo uključiti ili isključiti s mreže i njena je struja u stacionarnom stanju sinusoidalna.

Na slici 4.2. c) moglo se primijetiti kako struja koju daje TCR prilikom promjene kuta vođenja nesinusoidalna. To znači da TCR prilikom svog rada stvara neželjene harmonike. Prilikom delta spoja TCR uređaja u trofaznom sustavu neki od tih harmonika ostaju unutar delta spoja pa ne predstavljaju problem za elektroenergetski sustav, međutim ostali harmonici odlaze u sustav i potrebno ih je ukloniti. Jedna od metoda je spajanje više TCR uređaja u paralelu te njihovo sekvencijalno upravljanje. Postoje i kompliciraniji spojevi, ali u praksi je vrlo bitna cijena uređaja pa se najčešće koristi običan LC ili LRC filter spojen u paraleli s TCR uređajem prilagođen da ukloni dominantni harmonik.

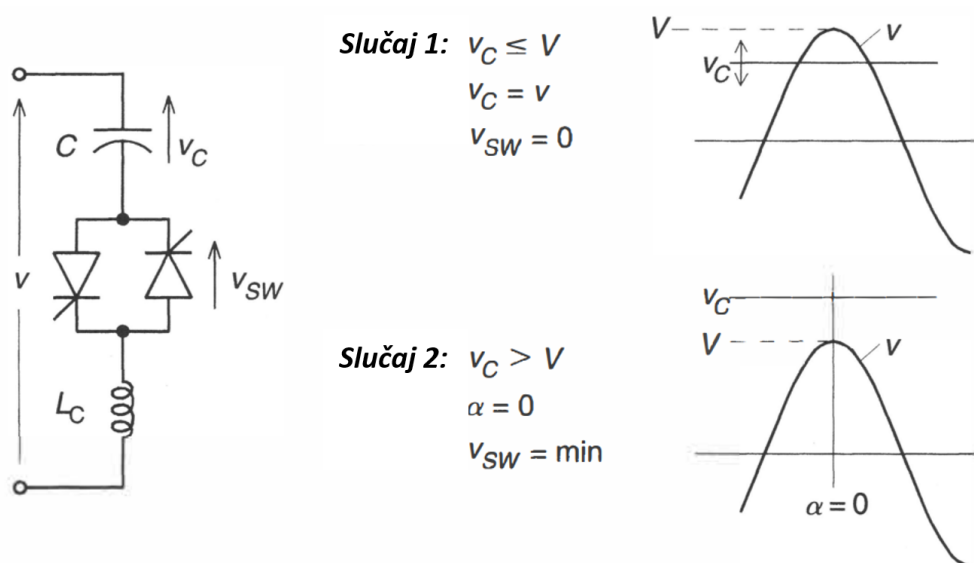
#### 4.1.2. Tiristorski uklopiv kondenzator (TSC)

TSC uređaj se sastoji od antiparalelnog spoja tiristora čija je uloga uklapanje i isklapanje uređaja povezanih u seriju s kondenzatorom i malom zavojnicom. Zavojnica služi za ograničenje iznosa udarne struje u tiristorima. U slučaju da nema zavojnice, prilikom uklapanja tiristora kroz njih bi potekla prevelika struja te bi došlo do njihovog uništenja. Na slici 4.5. prikazani su TSC uređaj i valni oblici napona i struja dok je TSC spojen na mrežu i nakon njegovog isključenja.



Slika 4.5. TSC uređaj i pripadajući valni oblici [4]

Isključivanje TSC uređaja moguće je u trenutku kada struja ima vrijednost nula. Nakon isključenja, napon na kondenzatoru je maksimalan i kondenzator ostaje nabijen. Posljedično, napon na isključenom tiristoru se mijenja od nule do vršne vrijednosti narinutog napona. Ako kondenzator ostaje nabijen maksimalnim naponom, moguće ga je priključiti natrag na mrežu u trenutku kada napon mreže dosegne svoj maksimum. Kondenzator je moguće priključiti na mrežu samo u određenim trenucima, svako priključenje u krivom trenutku uzrokuje neželjene prijelazne pojave u mreži. Postoje dva slučaja koja se promatraju za priključenje kondenzatora na mrežu. Prikaz valnih oblika i uvjeta za priključenje dan je slikom 4.6.

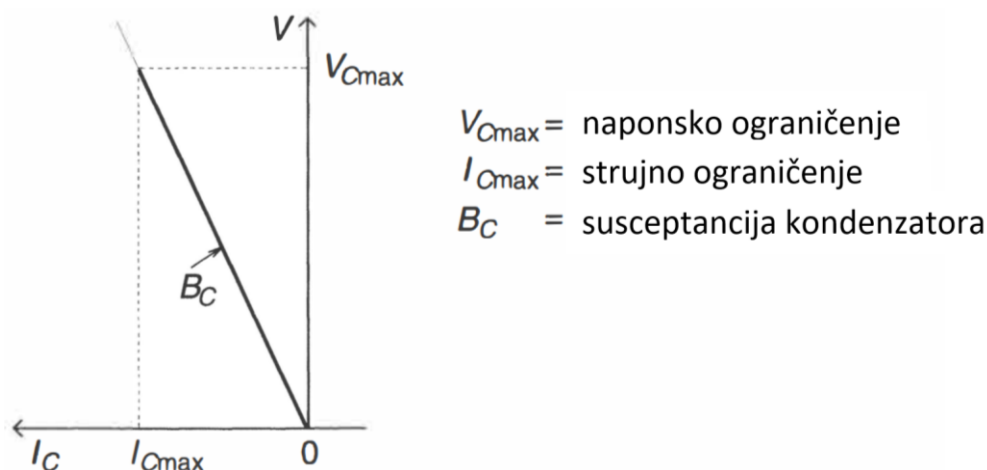


Slika 4.6. Uvjeti za priključenje kondenzatora bez prijelaznih pojava [1]

U prvom slučaju je napon kondenzatora niži od maksimalnog napona mreže  $V_C < V$  i u tom slučaju optimalan trenutak uključivanja kondenzatora je kada sinusoida napona mreže dosegne vrijednost napona na kondenzatoru. Drugi slučaj je kada je napon kondenzatora veći ili jednak maksimalnom naponu mreže  $V_C \geq V$ . Tada je optimalni trenutak uključivanja kada napon mreže dosegne svoj maksimum.

Najveće moguće kašnjenje uključivanja kondenzatora je jedna perioda napona mreže. Također, iz prije navedenog moguće je zaključiti da upravljanje kutom paljenja tiristora za priključenje kondenzatora nije moguće, kondenzator je moguće priključiti samo u trenutku kada su za to zadovoljeni uvjeti, odnosno kada ne dolazi do prijelaznih pojava. Napon na tiristorima je u tom slučaju minimalan ili jednak nuli. TSC uređaj se može skokovito uključiti i isključiti s mreže i predstavlja kapacitivnu reaktanciju koja je ili spojena ili odvojena od mreže.

Slikom 4.7. prikazana je V-I karakteristika TSC uređaja. Odnos struje i napona je linearan te ovisi o susceptanciji kondenzatora  $B_C$ . Najveća struja i najveći napon ovise o ograničenjima kondenzatora i sklopnih tiristora. Ako se želi postići kontinuirana regulacija moguće je spojiti više TSC uređaja u paralelu čime bi se povećao iznos kapacitivne reaktancije, a usklađenim upravljanjem bi se postigla stepenasta kontrola struje koja se može poistovjetiti s kontinuiranom regulacijom.

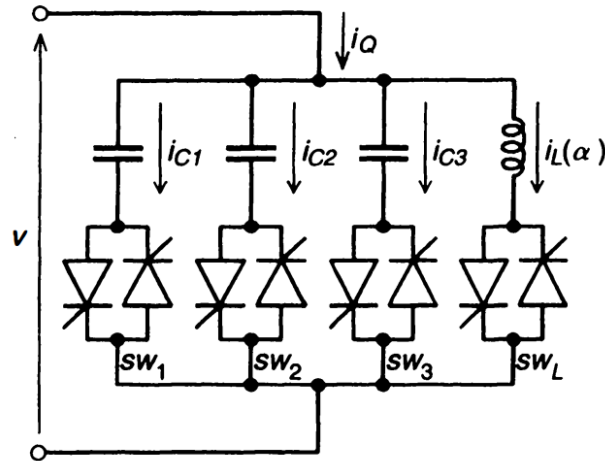


Slika 4.7. V-I karakteristika područja rada TSC uređaja [1]

#### 4.1.3. TSC-TCR uređaj

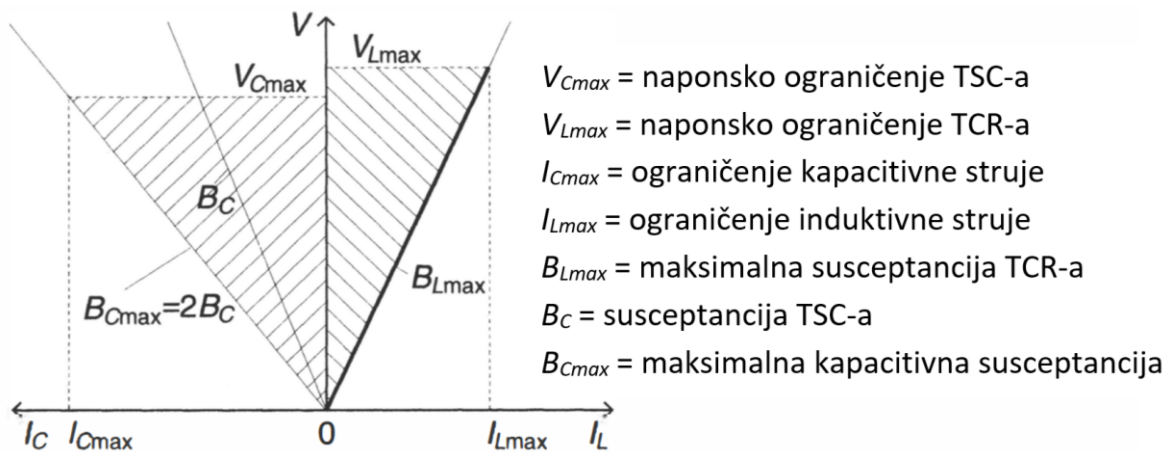
TSC-TCR je uređaj koji se sastoji od tiristorski uklopivog kondenzatora i tiristorski upravljive zavojnice. Ovo bi bila tipična izvedba SVC uređaja koji objedinjuje kompenzacijska svojstva zavojnice i kondenzatora. Na slici 4.8. prikazana je izvedba TSC-TCR uređaja koji se sastoji od jedne upravljive zavojnice i tri uklopiva kondenzatora. Broj uklopivih kondenzatora varira ovisno o potrebnoj snazi kompenzacije, naponu na koji se uređaj spaja, strujnim ograničenjima tiristora i cijeni SVC uređaja. Također, moguće je dodati i više TCR uređaja kako bi se pojačala induktivna kompenzacija. Ukupni kapacitivni raspon kompenzacije sastoji se od  $n$  TSC uređaja koji se mogu zasebno uklopiti i iskllopiti. Na taj način se dobiva stepenasta kontrola nad kapacitivnim dijelom kompenzacije. Zavojnica se dimenzionira tako da joj je izlazna var snaga malo veća od snage jednog TSC uređaja kako ne bi došlo do prijelaznih pojava prilikom uključivanja i isključivanja.





Slika 4.8. Izvedba TSC-TCR kompenzatora [1]

Slikom 4.9. prikazana je V-I karakteristika SVC uređaja koji se sastoji od jedne upravljive zavojnice i dva uklopiva kondenzatora. Područje rada ovog uređaja određeno je maksimalnom kapacitivnom i induktivnom susceptancijom, te naponskim i strujnim ograničenjima kondenzatora, zavojnice i tiristora. Iz slike 4.9. je vidljivo da se pomoću ovog uređaj može upravljati i kapacitivnom i induktivnom jalovom snagom.



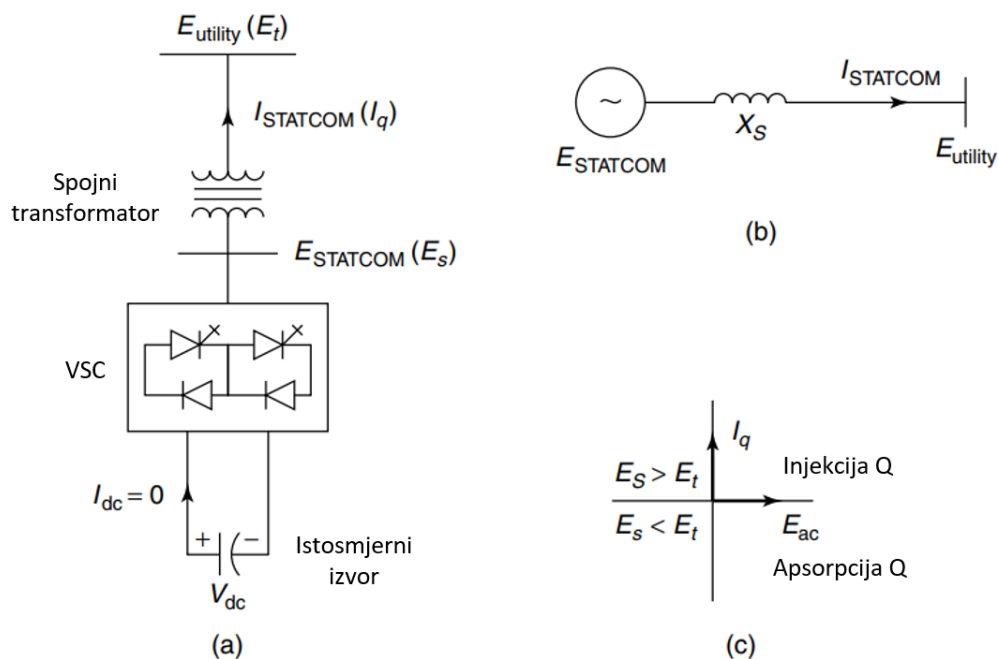
Slika 4.9. V-I karakteristika TSC-TCR uređaja [1]

## 4.2. Statički sinkroni kompenzator (STATCOM)

STATCOM je paralelni FACTS uređaj koji kao i SVC može proizvesti ili apsorbirati jalovu snagu i to čini bez potrebe za velikim zavojnicama i kondenzatorima. Bazira se na pretvaračima istosmjernje u izmjeničnu struju (DC/AC pretvarači) koji proizvode jalovu snagu bez spremnika jalove snage, a to čine kruženjem izmjenične struje između faza sustava. STATCOM se može promatrati kao idealni sinkroni trofazni generator koji nema inercije i može generirati kapacitivnu i induktivnu jalovu snagu. Apsorpcija ili injekcija jalove snage se kontrolira pomoću uzbuđene, odnosno napona generatora. Kada je napon generatora manji od napona sustava, struja koja teče u njega kasni za naponom sustava i generator se ponaša kao induktivna reaktancija, odnosno upija jalovu snagu iz sustava. Poveća li se napon generatora iznad napona sustava, generator je naduzbuđen i djeluje kao kapacitivna reaktancija, odnosno daje jalovu snagu u sustav.

Osnova statičkog sinkronog kompenzatora je pretvarač s naponskim izvorom, odnosno VSC (voltage source converter). VSC se sastoji od asimetrične sklopke koju čini GTO tiristor i antiparalelno spojena dioda. Za razliku od klasičnih tiristora GTO tiristor ima mogućnost isključivanja pomoću upravljačke elektrode. Pretvarač ima istosmjernu i izmjeničnu stranu, a struja kroz njega teče u oba smjera zbog čega je potreban antiparalelni spoj poluvodičkih elemenata. Pošto je polaritet napona na istosmjernoj strani konstantan, tiristori za gašenje ne trebaju imati mogućnost gašenja napona obrnutog polariteta i zbog toga se koristi asimetrična sklopka. Na istosmjernoj strani VSC-a nalazi se kondenzator koji daje konstantan napon pretvaraču. Na izmjeničnoj strani se nalazi serijska zavojnica i najčešće transformator preko kojeg je VSC spojen na mrežu. Ovi induktiviteti osiguravaju kondenzator od kratkog spoja i mrežu od naglog pražnjenja kondenzatora. U suštini, VSC generira izmjenični napon pomoću istosmjernog izvora i ima mogućnost kontrole iznosa napona, njegovog kuta i frekvencije.

Na slici 4.10. a) prikazana je shema STATCOM uređaja na kojoj se vidi VSC pretvarač, istosmjerni kondenzator i spojni transformator. Na b) dijelu slike se vidi ekvivalentna shema, odnosno STATCOM je prikazan kao sinkroni generator spojen preko induktiviteta na mrežu. C) dijelom slike je prikazana razmjena jalove snage s mrežom ovisno o naponu STATCOM-a. Kao što je navedeno u primjeru sinkronog stroja, STATCOM uređaj se upravlja promjenom proizvedenog napona. Ako se napon poveća iznad napona mreže STATCOM će u mrežu injektirati jalovu snagu, a ako je napon manji od napona mreže STATCOM upija jalovu snagu. Ako su napon mreže i STATCOM-a jednaki tada nema razmjene jalove snage.

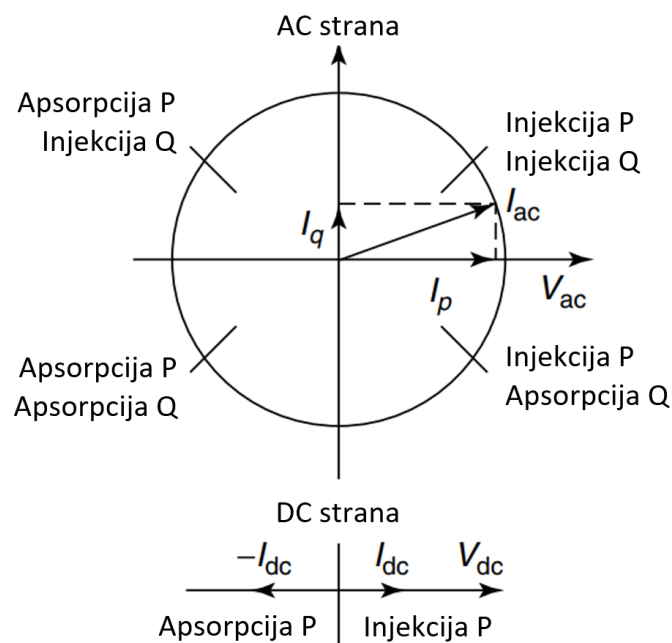


Slika 4.10. Shema STATCOM-a a), ekvivalentna shema b), prikaz razmjene snage c) [2]

Ovisno o izvedbi, VSC proizvodi kvadratni, polu-kvadratni ili pulsno-širinski moduliran izlazni napon. Svaki naponski val je fazno pomaknut i njihovim krajnjim sumiranjem preko spojnog induktiviteta dobije se ukupni izlazni napon iz pretvarača. Izlazni napon je gotovo sinusoidalan i nisu potrebni dodatni filtri. Ako pretvarač stvara samo jalovu snagu, djelatna snaga koju daje kondenzator treba biti jednaka nuli. Stoga se može zaključiti kako kondenzator ne igra ulogu u stvaranju jalove snage. Jalova snaga se stvara na način da pretvarač spaja sve tri faze tako da omogući nesmetan tok reaktivne struje kroz njih. Taj tok struje između faza je ekvivalentan jalovoj snazi. Ulazna i izlazna snaga iz VSC uređaja trebaju biti jednake, međutim kako izlazni napon nije perfektna sinusoida, dolazi do varijacije izlazne snage. Kondenzator služi kako bi pretvaraču predao varirajuću struju koja omogućava izjednačavanje ulazne i izlazne snage. U praksi se spaja više jednostavnih pretvarača u jedan višepulsni pretvarač ili se koristi pulsno-širinska modulacija kako bi naponski valni oblik bio što bliže sinusoidalnom. Tako se omogućuje korištenje relativno malih kondenzatora.

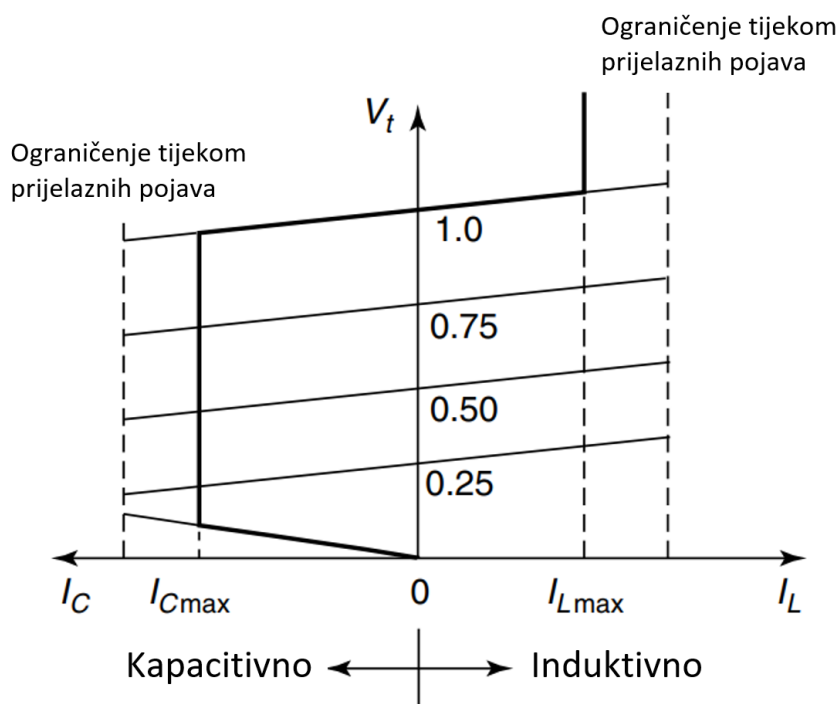
Realni pretvarač ima gubitke u poluvodičkim sklopkama koji bi uzrokovali da se energija pohranjena u kondenzatoru u potpunosti troši na njih. Stoga se napon pretvarača uvijek fazno pomakne za par stupnjeva tako da kasni za naponom mreže što uzrokuje apsorpciju male količine djelatne snage. Tom djelatnom snagom se pokrivaju gubici u sklopkama i održava se napon na kondenzatoru konstantnim. Osim kondenzatora, moguće je koristiti i izvor istosmjernog napona

kao što je baterija. Tada pretvarač može izmjenjivati jalovu i djelatnu snagu s mrežom, odnosno ponaša se kao sinkroni generator. Upravljanje razmjene jalove snage neovisno je o upravljanju razmjene djelatne snage. Razmjerna djelatne snage moguća je promjenom faznog pomaka između napona pretvarača i napona mreže. Pretvarač može davati djelatnu snagu u mrežu ako njegov napon prethodi naponu mreže. Ako napon pretvarača kasni za naponom mreže tada će pretvarač uzimati djelatnu snagu iz mreže. Prikaz razmjene snage dan je slikom 4.11. VSC ima jednako strujno opterećenje u induktivnom i u kapacitivnom modu rada, stoga će za određenu nazivnu snagu VSC-a STATCOM imati dvostruku snagu kompenzacije.



Slika 4.11. Prikaz razmjene djelatne i jalove snage STATCOM-a s mrežom [2]

Slikom 4.12. prikazana je V-I karakteristika STATCOM uređaja. Iz karakteristike je vidljivo da STATCOM može isporučiti induktivnu i kapacitivnu jalovu snagu te upravljati strujom neovisno o naponu mreže. To znači da je STATCOM sposoban isporučiti sustavu maksimalni iznos jalove snage čak i pri niskim naponima u mreži. Ova sposobnost je vrlo korisna u slučaju kvara na sustavu jer tada STATCOM održava napon konstantnim, dok bi bez njega moglo doći do sloma napona.



Slika 4.12. V-I karakteristika STATCOM-a [2]

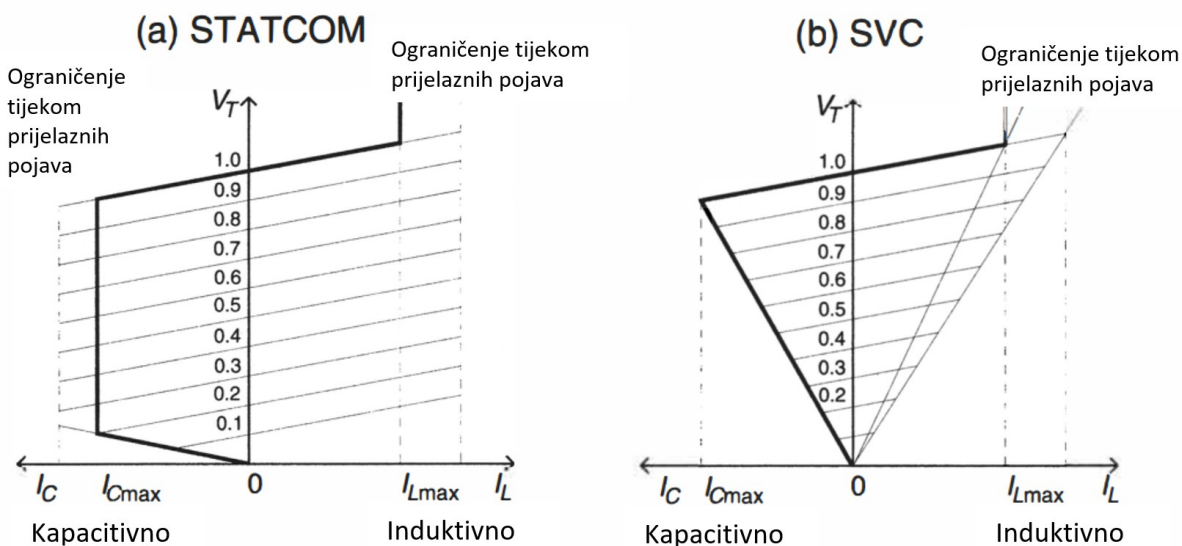
Jedna od prednosti STATCOM-a je što može isporučiti struju veću od nazivne tijekom prijelaznih pojava. Najveća kapacitivna struja koju uređaj može podnijeti određena je maksimalnom strujom koju tiristori mogu isključiti. Za induktivnu struju tiristori se gase automatski, a njen je maksimalni iznos određen maksimalnom temperaturom tiristora.

Sumirano, STATCOM uređaj ima niz primjena u elektroenergetskoj mreži. Osim razmjene djelatne i jalove snage s mrežom, ovaj uređaj omogućuje stabilnost mreže prilikom prijelaznih pojava, ublažavanje fluktuacija snage u mreži, te kontrolu napona za poboljšanje naponskih prilika. Velika prednost STATCOM-a je u tome što ne koristi velike zavojnice i kondenzatore za kompenzaciju i time je vrlo kompaktna. Njegovu kompaktnost dokazuje činjenica da postoje prijenosni STATCOM uređaji koji zauzimaju mjesto veličine kamionske prikolice. Također, vrlo je modularan, većina njegovih dijelova su standardizirani dijelovi čime se znatno skraćuje vrijeme ugradnje i smanjuje obim poslova vezanih za ugradnju.

#### 4.2.1. Usporedba SVC i STATCOM uređaja

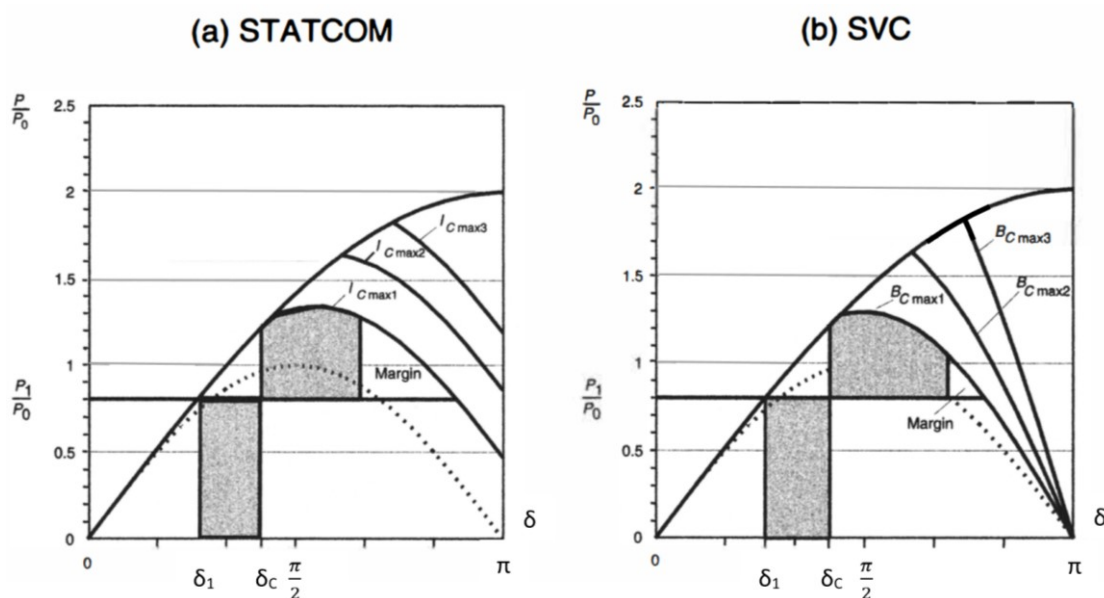
Iz prijašnjih poglavlja moguće je zaključiti kako su V-I karakteristike i kompenzacijske sposobnosti SVC-a i STATCOM-a vrlo slične. Način na koji oni funkcioniraju je potpuno drukčiji, dok SVC koristi zavojnice i kondenzatore, STATCOM koristi VSC pretvarač za dobivanje jalove snage. Također, za rad STATCOM-a nisu potrebne zavojnice i veliki kondenzatori, te je on napredniji i fleksibilniji uređaj od SVC-a.

V-I karakteristike oba uređaja dane su slikom 4.13. Njihovom usporedbom moguće je vidjeti kako maksimalna izlazna struja iz STATCOM-a ne ovisi o naponu mreže, odnosno moguće je injektirati puni kapacitet jalove snage u mrežu pri vrlo niskim naponima. Kod SVC-a to nije slučaj, već količina jalove snage koju je moguće proizvesti ovisi o naponu mreže. Za nazivnu vrijednost napona SVC dostiže puni kapacitet kompenzacije. Struja kompenzacije se linearno smanjuje smanjenjem napona, a maksimalna jalova snaga opada s kvadratom napona. Može se zaključiti kako je STATCOM bolja opcija za regulaciju napona prilikom velikih padova napona. Također, zbog maksimalne struje kompenzacije koja je neovisna o naponu, STATCOM može biti puno manje nazivne snage od SVC-a, a da pri tome ima jednak kompenzacijski učinak na dinamičke pojave u sustavu.



Slika 4.13. V-I karakteristike STATCOM-a i SVC-a [1]

Kada se promatra stabilnost prilikom prijelaznih pojava opet se može uočiti da STATCOM prednjači SVC-u. P- $\delta$  krivulje na slici 4.14. predstavljaju krivulje za sustav s dva generatora gdje je kompenzacijski uređaj spojen na sredini voda. Oba kompenzacijska uređaja imaju istu nazivnu snagu. Oba se uređaja isto ponašaju do maksimalne izlazne kapacitivne struje  $I_{Cmax}$ . Daljnjim povećavanjem kuta STATCOM održava konstantom struju  $I_{Cmax}$  za razliku od SVC-a, koji dolaskom do maksimalne vrijednosti može jedino održavati kapacitivnu susceptanciju konstantnom. Iz krivulja vidljivo kako STATCOM uređaj ima veću marginu prijelazne stabilnosti od SVC uređaja. Promatranjem margina prijelazne stabilnosti moguće je zaključiti kako STATCOM ima mogućnost veće snage prijenosa, odnosno može imati manju nazivnu snagu od SVC uređaja ako bi margina prijelazne stabilnosti bila ista.



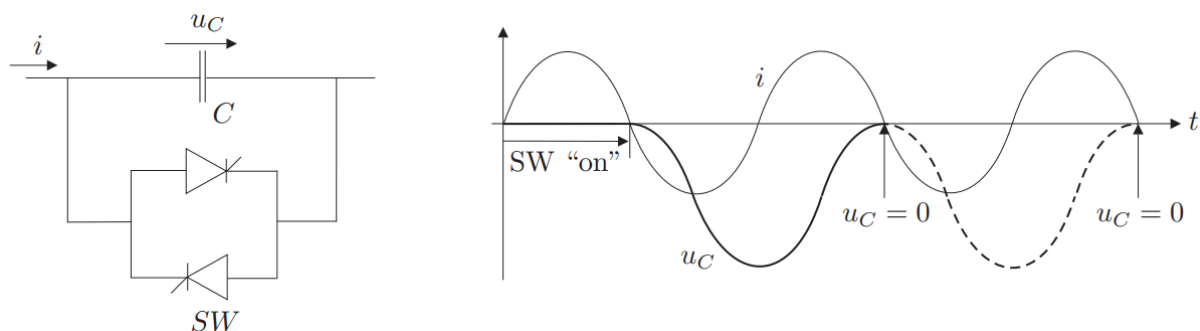
Slika 4.14. P- $\delta$  karakteristike STATCOM-a i SVC-a [1]

Vrijeme odziva STATCOM-a u rangu je vrijednosti od 200 do 350  $\mu$ s, a za SVC je od 2,5 do 5 ms, što je znatno sporije. STATCOM također može i injektirati djelatnu snagu u mrežu što je značajna prednost pred SVC-om. Tako bolje upravlja prilikama u mreži i može spriječiti slomove napona, te poboljšava efikasnost i dinamičku kompenzaciju sustava. Oba kompenzatora imaju vrlo male gubitke pri radu, međutim zbog kompliciranijeg pretvarača s više komponenti STATCOM ima veće gubitke u sklopnom sustavu. Tomu doprinose i GTO tiristori koji imaju veće gubitke od klasičnih tiristora zbog mogućnosti isključivanja.

## 5. IZVEDBE SERIJSKIH FACTS UREĐAJA

### 5.1. Tiristorski uklopivi serijski kondenzator (TSSC)

Tiristorski uklopiv serijski kondenzator sastoji se od kondenzatora spojenog u seriju s vodom i sklopnog uređaja spojenog paralelno kondenzatoru. Sklopni uređaj se sastoji od antiparalelnog spoja tiristora. Kada je sklopni uređaj isključen, odnosno kada tiristori ne vode, kondenzator je serijski spojen s vodom. Kada se tiristori uključe, struja poteče kroz njih čime se zaobiđe kondenzator, odnosno nema kompenzacije na vodu. Pomoću TSSC uređaja moguće je samo uključiti ili isključiti kondenzator s voda, dodatna regulacija ne postoji. Na slici 5.1. prikazan je TSSC uređaj i valni oblici struje i napona prilikom njegovog uključivanja i isključenja s mreže.

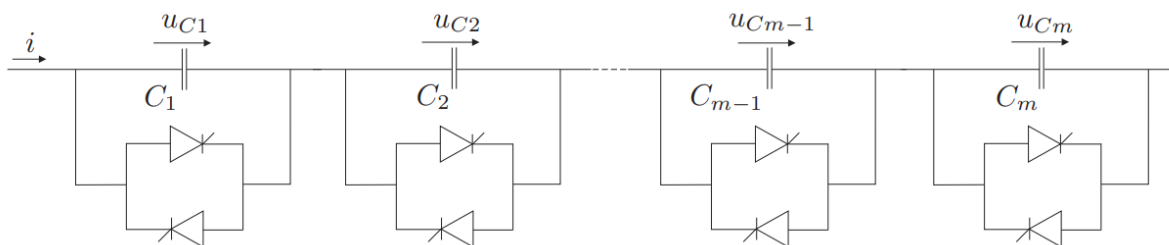


Slika 5.1. Shema TSSC-a i pripadajući valni oblici napona i struje [4]

Tiristori su prirodno komutirani, odnosno isključuju se kada sinusoida struje prođe kroz nulu. Time je kondenzator moguće spojiti na vod samo prilikom prolaska struje kroz nulu. Također, kada je potrebno premostiti kondenzator, tiristori se uključuju samo kada je napon na kondenzatoru jednak nuli kako bi se smanjila udarna struja na tiristorima i smanjile prijelazne pojave. Zbog ovih činjenica moguće je zaključiti kako je vrijeme od jedne periode maksimalno kašnjenje uključivanja tiristora. Kada se kondenzator spoji na mrežu doći će do njegovog nabijanja od nule do maksimalne vrijednosti u prvoj poluperiodi, te izbijanja od maksimalne vrijednosti do nule u drugoj poluperiodi. Završetkom njegovog izbijanja moguće ga je isključiti s mreže uključivanjem tiristorskih sklopki. Uključivanje i isključivanje moguće je vidjeti iz valnih oblika na slici 5.1.



Kako nije moguće regulirati stupanj kompenzacije jednog kondenzatora, TSSC uređaj se najčešće sastoji od nekoliko kondenzatora spojenih u seriju od kojih svaki ima svoj sklopni uređaj. Primjer je dan na slici 5.2. Spajanjem više samostalnih uređaja u seriju dobije se mogućnost stepenaste regulacije stupnja kompenzacije. Stupanj kompenzacije se regulira na način da se postepeno uključuju ili isključuju serijski kondenzatori.



Slika 5.2. TSSC sastavljen od nekoliko samostalnih uređaja [4]

TSSC se može promatrati kao promjenjiva serijska reaktancija. Iznos reaktancije koja se dodaje u vod naziva se stupanj kompenzacije i računa se formulom (5.1). Djelatna snaga koja se može prenijeti vodom računa se po formuli (5.2) i prikazana  $P$ - $\delta$  krivuljama za različite stupnjeve kompenzacije  $K$  na slici 5.3. Vidljivo je kako se povećanjem stupnja kompenzacije povećava i prenesena snaga.

$$K = -\frac{X_{TSSC}}{X} \quad (5.1)$$

$$P = \frac{E_1 E_2}{X + X_{TSSC}} \sin \delta = \frac{E_1 E_2}{X(1 - K)} \sin \delta \quad (5.2)$$

gdje je:

$K$  – stupanj kompenzacije,

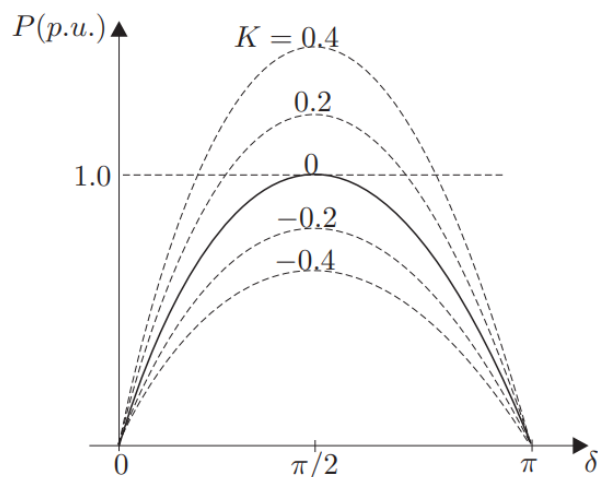
$X_{TSSC}$  – reaktancija TSSC-a,

$X$  – reaktancija voda,

$P$  – djelatna snaga,

$E_1, E_2$  – naponi na početku i kraju voda,

$\delta$  - kut između napona  $E_1$  i  $E_2$ .



Slika 5.3. Iznos prenesene djelatne snage u ovisnosti o kutu  $\delta$  [4]

$$\frac{\partial P}{\partial K} = \frac{E_1 E_2}{X(1-K)^2} \sin \delta = \frac{P}{1-K} \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial P}{\partial K} = \frac{P}{1-K} = P \cdot \frac{P}{P_0} \quad (5.4)$$

$$P_0 = \frac{E_1 E_2}{X} \sin \delta \quad (5.5)$$

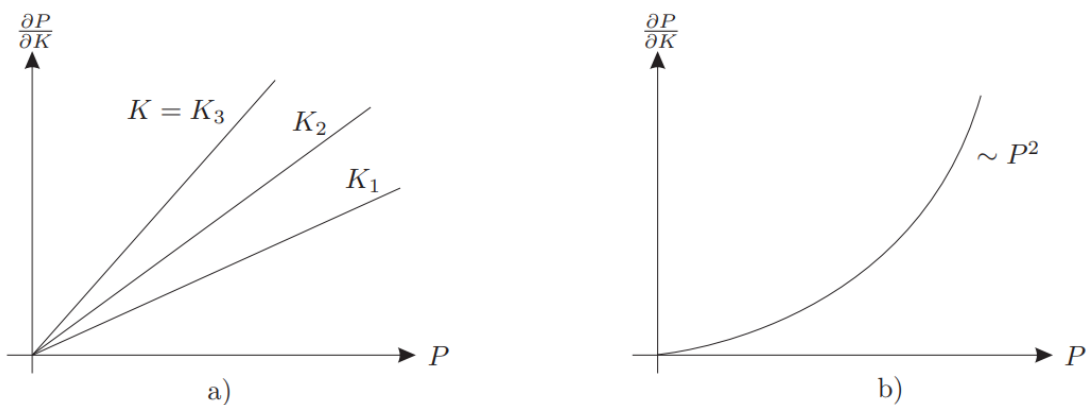
gdje je:

$\frac{\partial P}{\partial K}$  – ovisnost promjene snage o promjeni stupnja kompenzacije,

$P_0$  – prenesena snaga kada je stupanj kompenzacije jednak nuli.

Jednadžbom (5.3) prikazana je promjena snage ovisno o promjeni stupnja kompenzacije. Pod pretpostavkom da je  $K$  konstantan, odnos  $\frac{\partial P}{\partial K}$  proporcionalan je snazi  $P$  što je prikazano slikom 5.4.

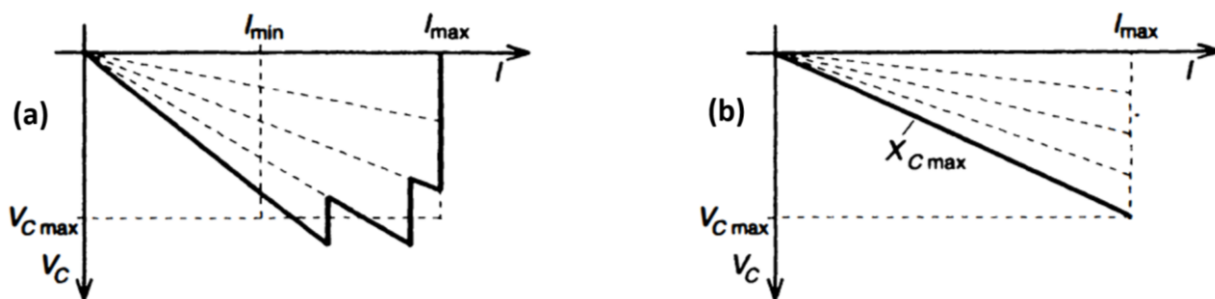
a). Međutim,  $K$  nije uvijek konstantan, a  $\frac{\partial P}{\partial K}$  prikazuje kako se mijenja  $P$  u ovisnosti o promjeni  $K$ , izraz (5.3) se mijenja u izraz (5.4). Time se dobije da je  $\frac{\partial P}{\partial K}$  proporcionalan kvadratu djelatne snage  $P$  što prikazuje slika 5.4. b).



Slika 5.4.  $\frac{\partial P}{\partial K}$  u ovisnosti o  $P$  za konstantni  $K$  a) i konstantni  $P_0$  b) [4]

Najčešća uporaba TSSC uređaja je za reguliranje tokova snage i smanjenje oscilacija snage. Iako je moguće ovaj uređaj koristiti za smanjenje subsinkronih oscilacija, najčešće se ne koristi u te svrhe jer bi i sam mogao dovesti do subsinkrone rezonancije u slučaju većeg stupnja kompenzacije. Također, modulacija bi vjerojatno bila neefikasna zbog dugog vremena odziva tiristora. Zbog toga se TSSC ne koristi u slučajevima kada je potreban visok stupanj kompenzacije.

Na slici 5.5. dana je V-I karakteristika TSSC-a sa četiri kompenzacijska kondenzatora. Na a) dijelu slike način upravljanja kondenzatora je takav da oni upravljaju naponom kompenzacije. Reaktancija kondenzatora se odabire tako da zadovoljava izraz  $V_{Cmax} = 4X_C I_{min}$ , odnosno da kondenzator postiže maksimalni napon pri minimalnoj struji. Povećanjem struje prema  $I_{max}$  kondenzatori se postepeno isključuju smanjujući ukupnu kapacitivnu reaktanciju kako bi održali napon konstantnim.

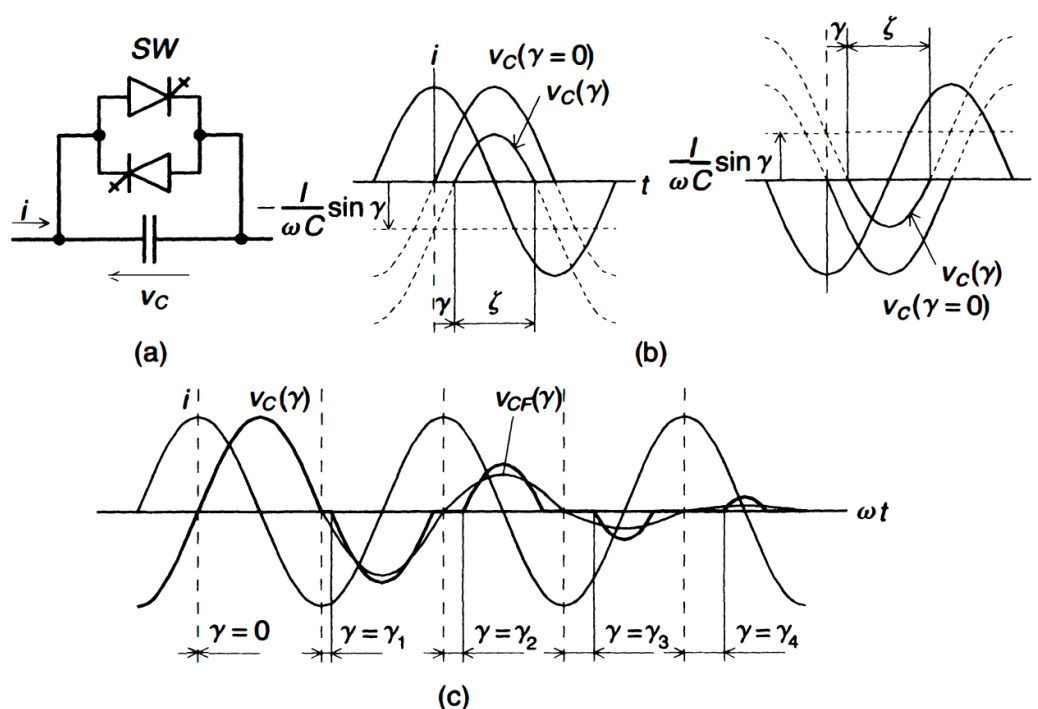


Slika 5.5. V-I karakteristika prilikom kontrole naponom a) i reaktancijom b) [1]

Na b) dijelu slike dana je V-I karakteristika za slučaj kada TSSC održava reaktanciju konstantnom. U ovom slučaju se kapacitivna reaktancija odabire tako da se zadovolji izraz  $V_{Cmax} = 4X_C I_{max}$ , odnosno maksimalni napon se postiže pri maksimalnoj struji. Maksimalna struja i napon kompenzatora se odabiru sukladno potrebama mreže. U slučaju prevelikog napona ili struje TSSC uređaj je zaštićen pomoću vanjskog uređaja, a može se štititi i pomoću vlastitih sklopnih tiristora ako njihove specifikacije to dozvoljavaju.

## 5.2. Serijski kondenzator upravljan GTO tiristorima (GCSC)

GCSC uređaj je praktički isti uređaj kao i TSSC, međutim sklopke mu nisu obični tiristori, već GTO tiristori koji imaju mogućnost uključivanja i isključivanja pomoću upravljačke elektrode. Zbog ovih tiristora uređaj ima mogućnost variranja napona na kondenzatoru što ga čini serijskom upravljivom reaktancijom. Uređaj se sastoji od kondenzatora spojenog u seriju s vodom i paralelno spojenog sklopnog bloka. Kada su tiristori isključeni napon na kondenzatoru je maksimalan, a kada su uključeni struja teče kroz njih umjesto kroz kondenzator i napon na kondenzatoru jednak je nuli. Prikaz GCSC uređaja i njegovih valnih oblika dan je na slici 5.6.



Slika 5.6. GCSC uređaj a), kontrola kuta b), valni oblik izlaznog napona c) [1]

Uključenje i isključenje tiristora provodi se tokom svake poluperiode struje i napona. GTO tiristor se automatski uključuje kada sinusoida napona dođe u nulu. Kako bi se upravljalo iznosom napona dodaje se sklop koji upravlja kutom kašnjenja  $\gamma$ . Ovaj kut je ekvivalentan kutu vođenja tiristora  $\alpha$  kod TCR uređaja. Na slici 5.6. b) prikazani su valni oblici struje i napona za slučaj kada tiristor ima neki kut kašnjenja i za slučaj kada je  $\gamma$  jednak nuli. Ako se tiristori isključe u trenutku kada struja dosegne svoj maksimum, napon na kondenzatoru  $v_C$  bit će jednak kao i kada bi tiristori bili stalno isključeni, odnosno bit će maksimalan. Kada se doda određeni kut kašnjenja iznos napona na kondenzatoru će se smanjiti i biti će opisan formulom (5.6). Dio formule (5.6)  $\frac{I}{\omega C} \sin \gamma$  je konstanta koja ovisi o kutu  $\gamma$  i pokazuje koliko je sinusoidalni napon  $v_C(\gamma)$  pomaknut prema dolje tokom pozitivne poluperiode i prema gore tokom negativne poluperiode. Trenutna vrijednost struje opisana je izrazom  $i(t) = I \cos \omega t$ . Pošto su GTO tiristori isključeni kada je kondenzator spojen na mrežu, kut  $\gamma$  zapravo kontrolira kut blokiranja, odnosno kut pri kojem je tiristor isključen. Kut blokiranja označen je slovom  $\zeta$  i smanjuje se s povećanjem kuta kašnjenja  $\gamma$ .

$$v_C(t) = \frac{1}{C} \int_{\gamma}^{\omega t} i(t) dt = \frac{I}{\omega C} (\sin \omega t - \sin \gamma) \quad (5.6)$$

gdje je:

$v_C(t)$  – trenutna vrijednost napona kondenzatora,

$C$  – kapacitet kondenzatora,

$\gamma$  – kut blokiranja,

$i(t)$  – trenutna vrijednost struje,

$I$  – amplituda struje,

$\omega$  – kutna frekvencija.

Na slici 5.6. c) prikazan je način na koji je moguće kontrolirati iznos napona na kondenzatoru. Prikazano je kako se kut  $\gamma$  postepeno povećava od  $\gamma = 0$  prema  $\gamma = \pi/2$  pri čemu se napon sve više smanjuje. Promjena kuta kašnjenja moguća je samo jednom tijekom jedne poluperiode. Iz svega navedenog moguće je primijetiti kako je GCSC uređaj jako sličan TCR uređaju. Sklopni blok TCR-a je povezan u seriju sa zavojnicom, a sklopni blok GCSC-a u paralelu s kondenzatorom. Tiristori TCR-a se uključuju kada je struja jednaka nuli, a tiristori GCSC-a kada je napon jednak nuli. Tiristori u TCR-u se uključuju uz kašnjenje ovisno o maksimalnom naponu, a tiristori GCSC-a se isključuju uz kašnjenje ovisno o maksimalnom iznosu struje. TCR predstavlja promjenjivu

susceptanciju varirajući struju kroz zavojnicu spojenu na konstantni napon. GCSC predstavlja promjenjivu reaktanciju kontrolom napona na kondenzatoru kroz kojeg teče konstantna struja. Zbog ekvivalentnosti između TCR-a i GCSC-a također je moguće dobiti formule koje opisuju promjenu napona na kondenzatoru u ovisnosti o kutu (5.7) i promjenu reaktancije u ovisnosti o kutu (5.8).

$$V_{CF}(\gamma) = \frac{I}{\omega C} \left(1 - \frac{2}{\pi} \gamma - \frac{1}{\pi} \sin 2\gamma\right) \quad (5.7)$$

gdje je:

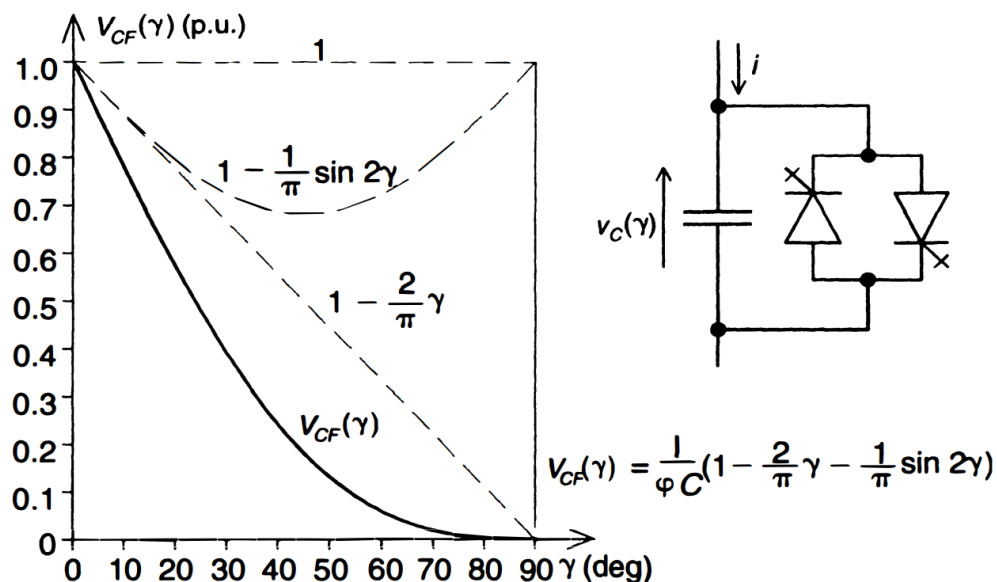
$V_{CF}(\gamma)$  – amplituda napona

$$X_C(\gamma) = \frac{1}{\omega C} \left(1 - \frac{2}{\pi} \gamma - \frac{1}{\pi} \sin 2\gamma\right) \quad (5.8)$$

gdje je:

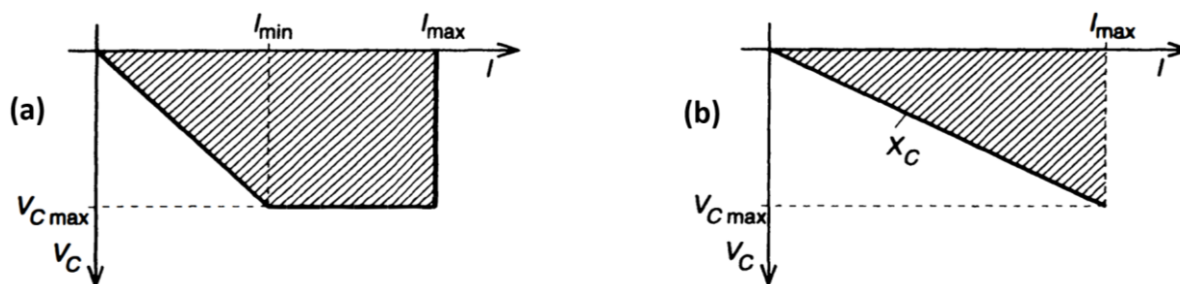
$X_C(\gamma)$  – reaktancija kondenzatora

Na slici 5.7. prikazano je kako se napon mijenja s promjenom kuta kašnjenja i time se dobiva promjenjiva kapacitivna reaktancija. Adekvatnu kapacitivnu reaktanciju moguće je dobiti za bilo koji kut  $\gamma$  što je opisano formulom (5.8).



Slika 5.7. Napon na kondenzatoru o ovisnosti o kutu  $\gamma$  [1]

GCSC je moguće primijeniti za kontrolu napona  $V_{CF}$  ili za kontrolu kapacitivne reaktancije  $X_C$ . Prilikom kontrole napona GCSC održava napon konstantnim u periodu od minimalne  $I_{min}$  do maksimalne  $I_{max}$  struje kao što je prikazano slikom 5.8. a). Kapacitivna reaktancija kondenzatora se odabire tako se postigne maksimalni napon pri  $I = I_{min}$ ,  $X_C = V_{Cmax}/I_{min}$ . Povećanjem struje od  $I_{min}$  prema  $I_{max}$  povećava se kut kašnjenja  $\gamma$  i na taj se način napon kondenzatora održava konstantnim.

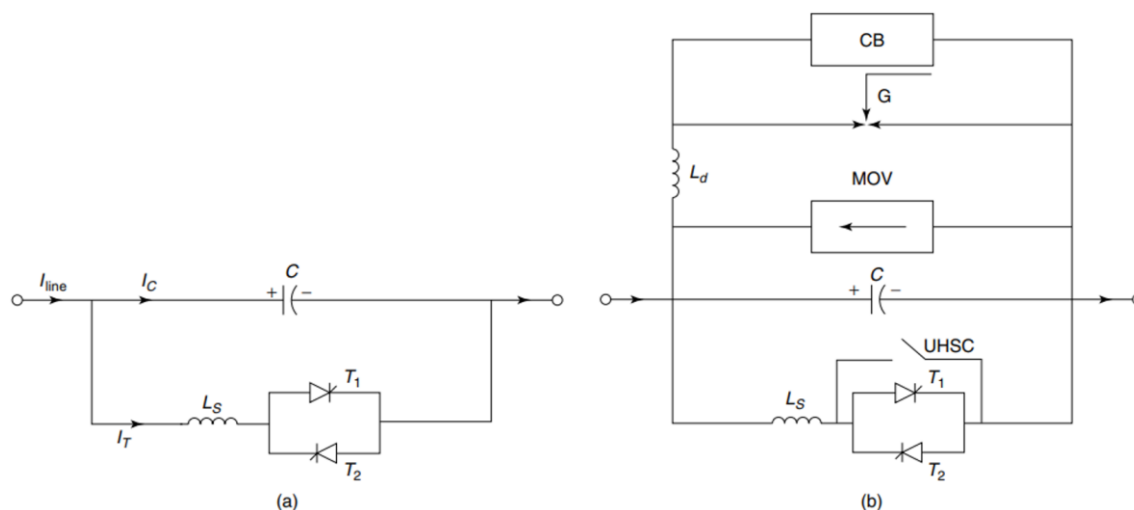


Slika 5.8. V-I karakteristika GCSC-a prilikom kontrole naponom a) i reaktancijom b) [1]

Na slici 5.8. b) prikazana je V-I karakteristika za slučaj kada se upravlja kapacitivnom reaktancijom. U ovom slučaju uređaj održava maksimalnu reaktanciju za bilo koji iznos do maksimalne struje. Stoga se reaktancija odabire prema izrazu  $X_C = V_{Cmax}/I_{max}$ . Prilikom dizajniranja realnih uređaja potrebno je uzeti u obzir maksimalno strujno opterećenje tiristora. U serijskim kompenzatorima može doći do znatnog povećanja iznosa trenutne struje u slučaju kvarova pa je potrebno odabrati tiristore koji mogu podnijeti takvo kratkotrajno povećanje struje. Tiristori se mogu zaštititi tako da se isključe, međutim tada bi napon na kondenzatoru postao previsok. Zbog toga se kao mjera zaštite često dodaje MOV (metal oxide varistor) koji štiti kondenzator i sklopni blok od prenapona. Također, može se dodati i neki drugi uređaj u obliku sklopke koji preusmjerava struju kako bi njen iznos na kondenzatoru i sklopnom bloku ostao u zadanim granicama.

### 5.3. Tiristorski upravljivi serijski kondenzator (TCSC)

Tiristorski upravljivi serijski kondenzator sastoji se kondenzatora spojenog u seriju s vodom i TCR uređaja spojenog paralelno kondenzatoru. Suština ovakvog uređaja je da se postigne kontinuirano upravljanje reaktancijom kondenzatora djelomičnim poništavanjem njegove reaktancije pomoću TCR uređaja. U praktičnoj izvedbi, osim kondenzatora, zavojnice i sklopnih tiristora, TCSC čine i zaštitni uređaji.



Slika 5.9. Osnovna shema TCSC-a a), realna shema b) [2]

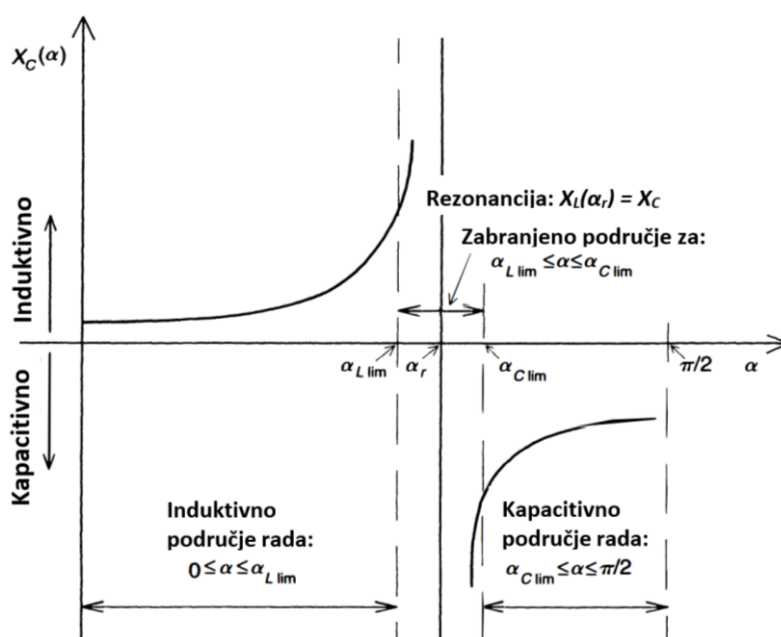
Za zaštitu od prenapona na kondenzatoru koristi se nelinearni otpornik, odnosno MOV (metal oxide varistor). U slučaju da dođe do velikih kvarova mreže ili kvarova na opremi, za zaštitu se koristi prekidač (CB) spojen paralelno s kondenzatorom. Zavojnica  $L_d$  koristi se za ograničenje struje kondenzatora tokom njegovog rada. Za smanjenje gubitaka tiristora dodaje se sklopka paralelna sa sklopnim blokom (UHSC). Ako su tiristori uključeni duže vremena uključuje se sklopka koja premosti tiristore i tako uklanja njihove gubitke. Ova sklopka ima veliku brzinu uključivanja i isključivanja i izdržljiva je na trošenje. Ona se također koristi za prespajanje tiristora u slučaju naglog povećanja struje u svrhu njihove zaštite. Realni TCSC se najčešće sastoji od nekoliko ovakvih osnovnih modula spojenih u seriju.

Iznos reaktancije TCSC uređaja u stacionarnom stanju dan je izrazom (5.9).  $X_C$  je kapacitivna reaktancija kondenzatora i ona je fiksna, a  $X_L(\alpha)$  je promjenjiva induktivna reaktancija zavojnice.

$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{X_C X_L(\alpha)}{X_L(\alpha) - X_C} \quad (5.9)$$

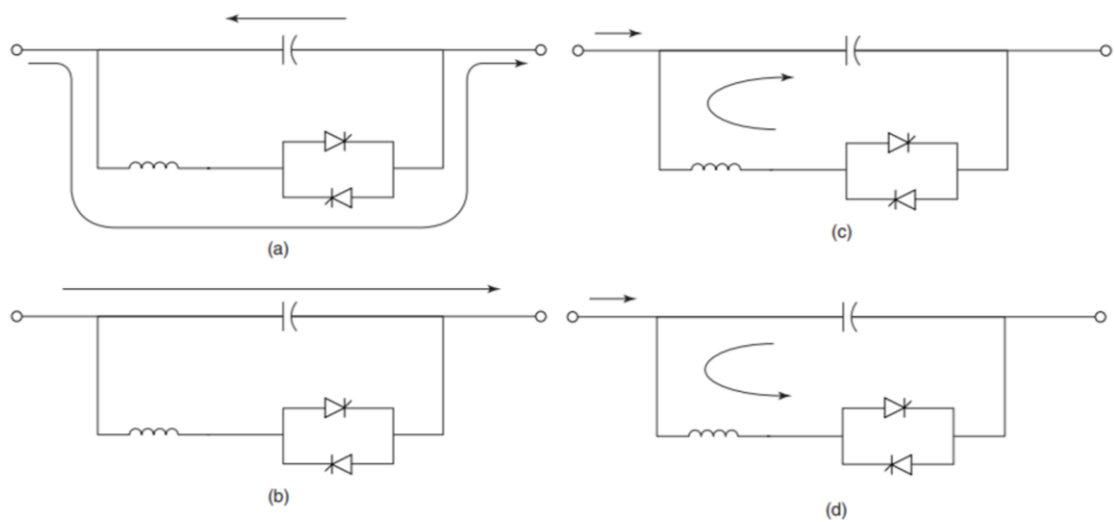


Induktivna reaktancija se mijenja od  $X_L = \omega L$  do beskonačno promjenom kuta vođenja  $\alpha$ . Kut vođenja se mjeri od maksimalnog iznosa napona kondenzatora, odnosno od nulte vrijednosti struje. Promjenom iznosa induktivne reaktancije od beskonačno prema  $\omega L$  TCSC-u se povećava kapacitivna reaktancija do izjednačenja  $X_C = X_L$ , odnosno do rezonancije. Daljnjim smanjenjem  $X_L(\alpha)$  reaktancija TCSC-a postaje induktivna i dosegne najmanju vrijednost kada je kut vođenja  $\alpha$  jednak nuli. Iz ovog je moguće zaključiti kako TCSC ima dva načina kompenzacije, induktivni i kapacitivni. Za induktivni način kut  $\alpha$  može varirati između nule i  $\alpha_{Llim}$ . Za kapacitivni način kut  $\alpha$  varira između  $\alpha_{Clim}$  i  $\pi/2$ . Područja rada prikazana su slikom 5.10. Područje rad između kutova  $\alpha_{Llim}$  i  $\alpha_{Clim}$  je zabranjeno područje jer dolazi do stvaranja rezonancije.



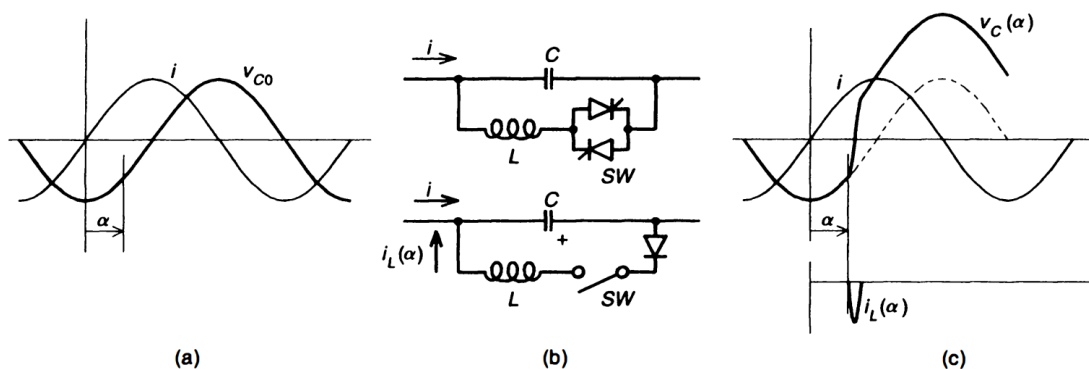
Slika 5.10. Područja rada ovisno o kutu vođenja [1]

TCSC uređaj ima četiri osnovna načina rada. Prvi način rada prikazan je slikom 5.11. a) i naziva se zaobilazni način rada. U tom načinu rada tiristori su cijelo vrijeme uključeni i uređaj djeluje kao paralelni spoj zavojnice i kondenzatora. Ovaj način rada se koristi za funkcije zaštite. Drugi način rada je blokirajući način rada. Tiristori su isključeni i TCSC djeluje kao serijski kondenzator. Na slici 5.11. c) i d) prikazani su kapacitivni i induktivni način rada. Tada tiristori djelomično vode, a ovisno o kutu vođenja TCSC se ponaša kao promjenjiva kapacitivna ili induktivna reaktancija.

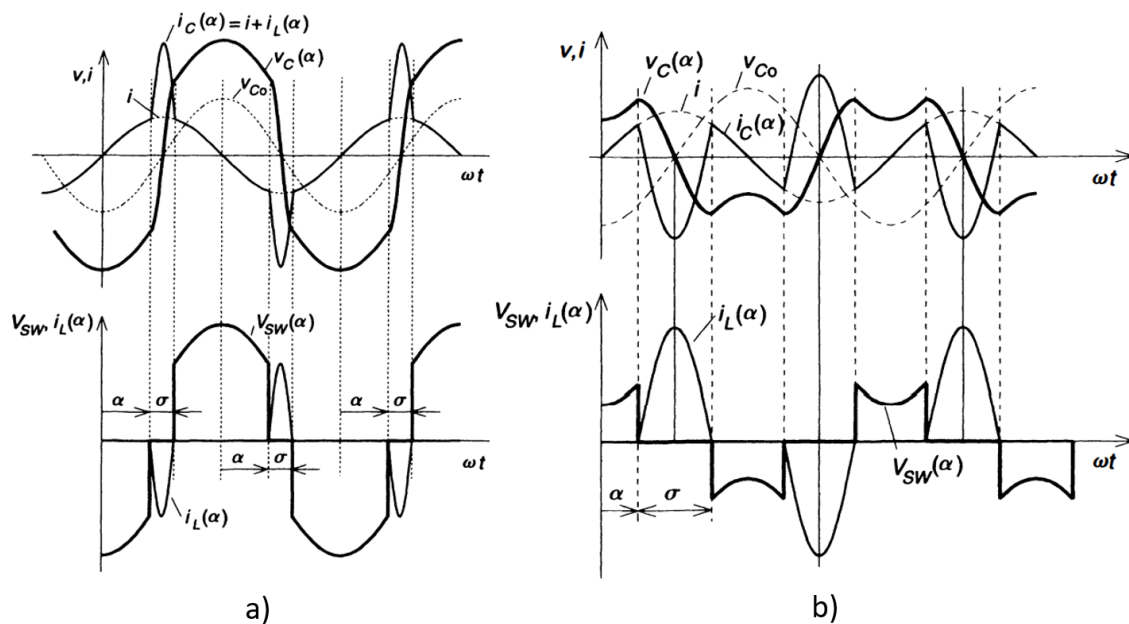


Slika 5.11. Četiri načina rada TCSC-a: zaobilazni način rada a), blokirajući način rada b), kapacitivni način rada c), induktivni način rada d)[2]

Za objašnjenje induktivnog i kapacitivnog načina rada promatrat će se osnovna shema TCSC-a i pripadajući valni oblici na slici 5.12. U početnom trenutku tiristori su isključeni, struja teče samo kroz kondenzator i na njemu stvara napon  $v_{C0}$ . Tiristori se uključuju prilikom kuta kašnjenja  $\alpha$  pri čemu je napon kondenzatora negativan, a iznos struje pozitivan. U trenutku uključivanja poteći će struja  $i_L(\alpha)$  kroz zavojnicu i zbrojiti će se sa strujom  $i$  koja teče kroz kondenzator. Ovo naglo povećanje struje dovest će do brze promjene polariteta napona na kondenzatoru i pomaknut će valni oblik napona prema gore, odnosno dati će mu istosmjerni pomak. Ista pojava će se desiti za negativni poluval ako se zadrži kut kašnjenja  $\alpha$ , samo će u tom slučaju istosmjerni pomak valnog oblika napona biti prema dolje. Ovo je prikazano slikom 5.13. a) i naziva se kapacitivni način rada.



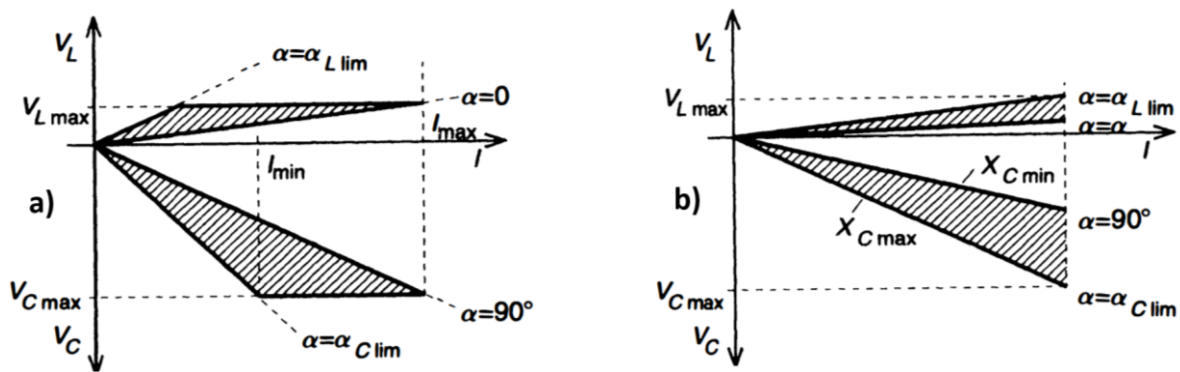
Slika 5.12. Promjena iznosa napona TCSC-a: napon i struja u početnom stanju a), ekvivalentna shema b), napon i struja nakon aktivacije TCR uređaja c) [1]



Slika 5.13. Kapacitivni način rada a), induktivni način rada b) [1]

Na slici 5.13. b) prikazan je induktivni način rada koji je vrlo sličan kapacitivnom. U ovom načinu rada struja zavojnice je suprotnog polariteta i zbrajanjem sa strujom kondenzatora doći će do naglog smanjenja struje  $i_C(\omega)$ . Na taj način doći će do ukupnog smanjenja napona  $v_C(\omega)$  koji će poprimiti induktivni karakter. Zavojnica se uvijek dimenzionira tako da njena reaktancija bude znatno manja od reaktancije kondenzatora zbog toga što brzina promjene napona ovisi o omjeru reaktancija  $X_L/X_C$ . Ako je  $X_L$  znatno manji od  $X_C$ , promjena će biti brza. Omjer  $X_L/X_C$  koji se koristi u realnim izvedbama je između 0,1 i 0,3, a ovisi o zahtjevima na mjestu ugradnje uređaja.

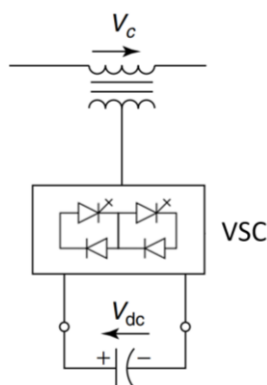
Jedna od velikih prednosti TCSC uređaja je ta da se njegova kapacitivna reaktancija može povećati iznad reaktancije kondenzatora. To je omogućeno TCR uređajem upravljanim za kapacitivni način rada. Za usporedbu, GCSC uređaj može proizvesti kapacitivnu reaktanciju samo do nazivne vrijednosti kondenzatora. Na slici 5.14. prikazana je V-I karakteristika za slučaj upravljanja naponom a) i za slučaj upravljanja reaktancijom b). Vrijede ista razmatranja kao i za TSSC i GCSC uređaj, odnosno u slučaju upravljanja reaktancijom održava se maksimalni mogući iznos reaktancije za određeni napon i struju, pri maksimalnoj struji i maksimalnom naponu ukupni iznos reaktancije je najveći. Ograničenja rada za kutove vođenja su, kao što je navedeno prije, između nula i  $\alpha_{Llim}$  za induktivni način i između  $\alpha_{Clim}$  i  $\pi/2$  za kapacitivni način. U slučaju upravljanja naponom, maksimalni napon kondenzatora se postiže pri struji  $I_{min}$  za kapacitivno područje i pri kutu  $\alpha_{Llim}$  za induktivno područje.



Slika 5.14.  $V$ - $I$  karakteristika TCSC-a prilikom kontrole naponom a) i reaktancijom b) [1]

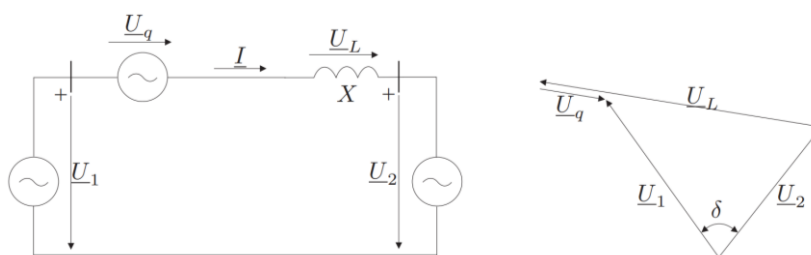
#### 5.4. Statički sinkroni serijski kompenzator (SSSC)

SSSC je serijski kompenzacijski uređaj koji djeluje kao promjenjivi naponski izvor spojen u seriju s vodom i injekcijom napona mijenja impedanciju voda. Vrlo je sličan STATCOM uređaju, te kao i STATCOM može razmjenjivati djelatnu i jalovu snagu s vodom. Kada SSSC uređaj injektira napon u fazi sa strujom koja teče kroz vod doći će do razmjene djelatne snage s vodom. Do razmjene jalove snage dolazi kada je injektirani napon pomaknut za  $90^\circ$  u odnosu na struju. SSSC se sastoji od VSC pretvarača i izvora istosmjernog napona koji može biti u obliku kondenzatora ili baterije.



Slika 5.15. Tipična izvedba SSSC uređaja [2]

Slikom 5.16. dan je prikaz sustava s dva generatora i SSSC-om te pripadajući fazorski dijagram. SSSC je prikazan kao izvor napona  $U_q$  koji je ekvivalentan serijskom kondenzatoru. Iz fazorskog dijagrama se vidi da je napon koji SSSC injektira u vod suprotnog polariteta.



Slika 5.16. Način rada SSSC-a [4]

Injektiranjem napona suprotnog polariteta povećava se napon na vodu  $U_L$  čime se povećava struja, a posljedično i snaga koja teče kroz vod. Iako se serijska kompenzacija uglavnom promatra kao smanjenje ukupne impedancije voda, ustvari se samo povećava napon na vodu, a time i snaga koju je moguće prenijeti. Iznos injektiranog napona opisan je formulom (5.10).

$$U_q = -jX_C I = -jkXI \quad (5.10)$$

gdje je:

$U_q$  – injektirani napon,

$X_C$  – reaktancija serijskog kondenzatora,

$I$  – struja koja teče kroz vod,

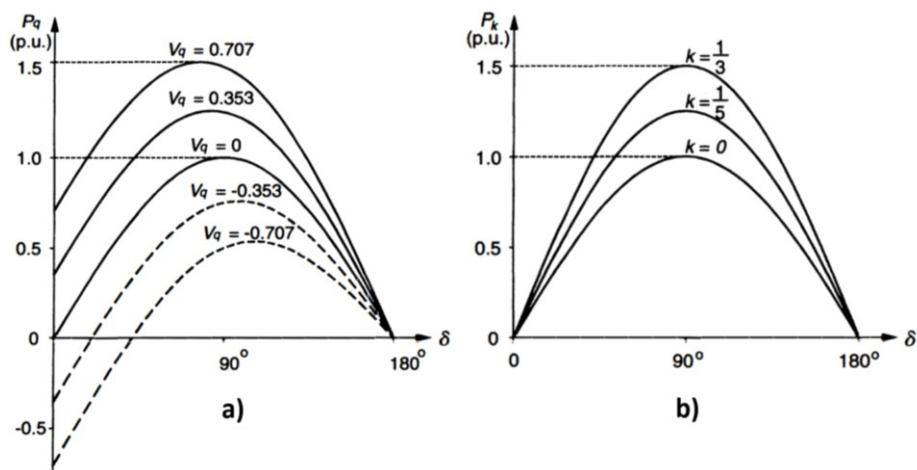
$X$  – reaktancija voda,

$k$  – kompenzacijski faktor  $k = X_C/X$ .

Za razliku od običnog serijski spojenog kondenzatora, SSSC može održavati napon konstantnim ili upravljati njime neovisno o struji koja teče kroz vod. Prilikom kapacitivne kompenzacije injektirani napon kasni za strujom voda za  $90^\circ$ . Promjenom faznog pomaka napona tako da prednjači struji za  $90^\circ$  postići će se induktivna kompenzacija, odnosno injektirani napon biti će jednakog polariteta kao i napon voda i tada će se ukupni napon smanjiti. Na taj je način prividno postignuto povećanje induktivne reaktancije voda. Na  $P$ - $\delta$  krivuljama prikazanim slikom 5.17. a) vidljivo je kako povećanje prijenosne snage ovisi o iznosu povećanja napona. Za usporedbu,  $P$ - $\delta$  krivulje za serijski kondenzator dane su slikom 5.17. b) i vidljivo je kako povećanje snage ovisi o kompenzacijskom faktoru  $k$ . Usporedbom krivulja jasno je kako serijski kondenzator povećava prenesenu snagu u određenom postotku snage prenesene nekompensiranim vodom za

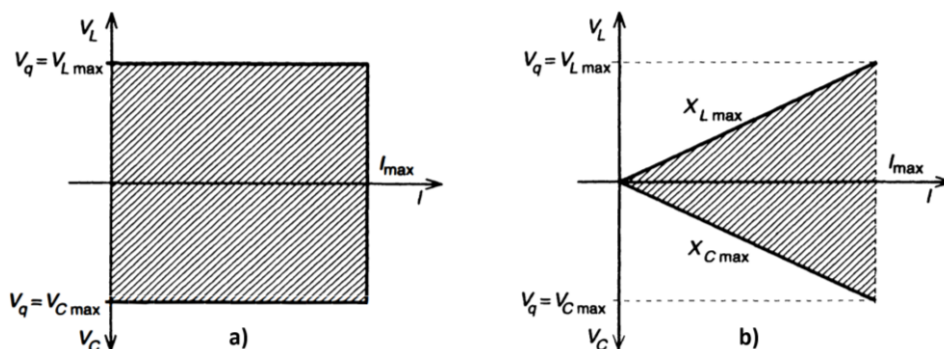
određeni kut  $\delta$ . SSSC povećava prenesenu snagu za određen fiksni iznos snage koju je moguće prenijeti nekompensiranim vodom za kutove  $\delta$  između  $0$  i  $\pi/2$ .

Slično kao i STATCOM, SSSC ima dvostruko veću snagu kompenzacije od nazivne snage pretvarača jer može kompenzirati jednak iznos kapacitivne i induktivne jalove snage. SSSC također može okrenuti tok snage ukoliko je iznos napona koji injektira u vod veći od napona nekompensiranog voda u induktivnom načinu rada.



Slika 5.17.  $P$ -  $\delta$  krivulje za SSSC a) i serijski kondenzator b) [1]

Pošto je upravljanje kompenzacijom neovisno o iznosu struje na vodu, SSSC može održavati maksimalni napon kompenzacije za sve iznose struje od nule do  $I_{max}$ . Ovo se postiže za kada se SSSC koristi za kontrolu napona i prikazano je slikom 5.18. a). U načinu rada kada SSSC postaje upravljiva reaktancija uređaj je podešen tako da održava maksimalni iznos reaktancije za bilo koju struju do maksimalne.

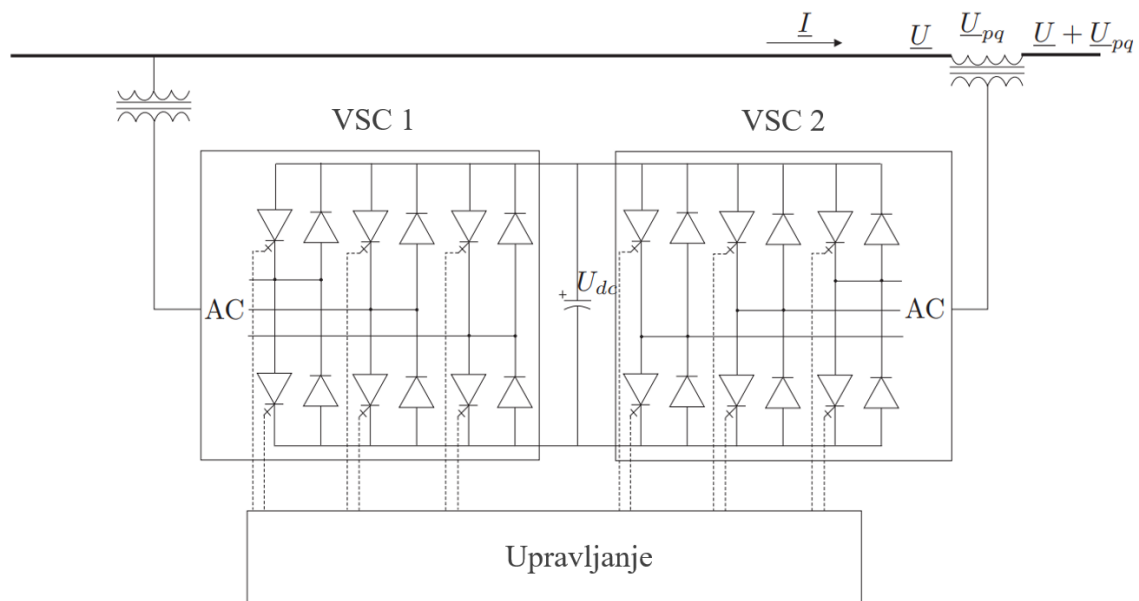


Slika 5.18.  $V$ - $I$  karakteristika SSSC-a prilikom kontrole naponom a) i reaktancijom b) [1]

## 6. IZVEDBE OBJEDINJENIH FACTS UREĐAJA

### 6.1. Objedinjeni regulator toka snage (UPFC)

Objedinjeni regulator toka snage je kombinacija serijskog i paralelnog kompenzacijskog uređaja te posjeduje najbolja svojstva od oba uređaja. Sastoji se isključivo od kompenzatora baziranih na VSC pretvaraču, odnosno STATCOM-a za paralelnu kompenzaciju i SSSC-a za serijsku kompenzaciju. Ovo nisu nezavisni međusobno povezani uređaji, već je cijeli UPFC uređaj jedan sklop. Sastoji se od dva VSC-a koji dijele istosmjerni izvor napona, odnosno kondenzator i spojeni su na vod preko spojnih transformatora. Kao što se može vidjeti na slici 6.1., prvi VSC pretvarač je spojen paralelno s vodom, a drugi VSC je spojen serijski. Način na koji su spojeni pretvarači omogućava djelatnoj snazi da teče kroz njih u oba smjera. Također, svaki pretvarač može neovisno o drugome proizvesti ili apsorbirati jalovu snagu.

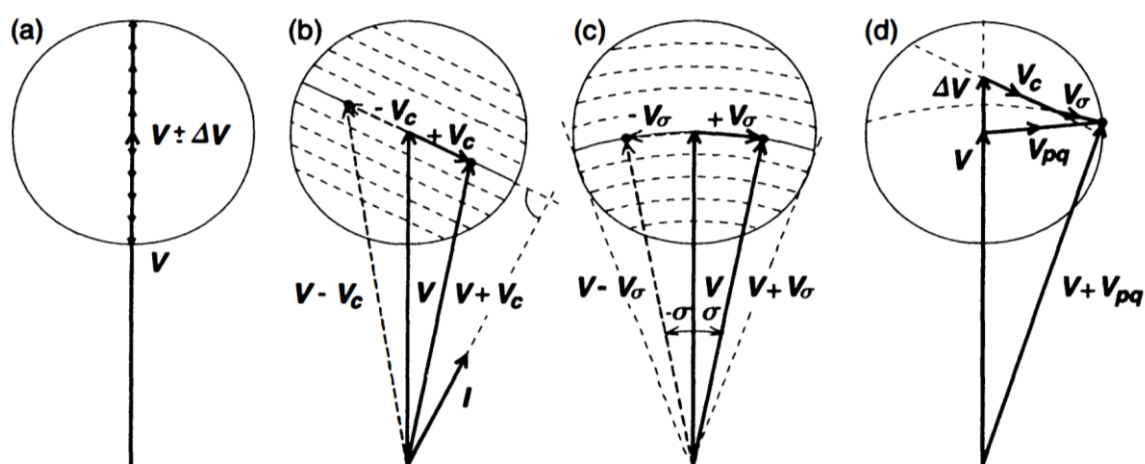


Slika 6.1. Shema UPFC uređaja [4]

VSC 2 injektira napon  $U_{pq}$  u seriju s vodom i može upravljati njegovim iznosom i kutom. Ovaj pretvarač djeluje kao izvor napona kroz kojeg teče struja voda i na taj način razmjenjuje djelatnu ili jalovu snagu s vodom. Jalova snaga se generira unutar pretvarača, a razmijenjena se djelatna snaga pretvara u istosmjernu snagu koju kondenzator vidi kao pozitivnu ili negativnu. VSC 1 služi kako bi apsorbirao ili predao djelatnu snagu drugom pretvaraču preko kondenzatora. Također, ovaj

pretvarač može injektirati ili apsorbirati jalovu snagu na sabirnicu i tako pružiti neovisnu paralelnu kompenzaciju voda.

UPFC se može koristiti za više funkcija kao što je serijska kompenzacija, paralelna kompenzacija i regulacija faznog kuta. To čini injektiranjem napona  $V_{pq}$  određenog iznosa i faznog pomaka. Osnovne funkcije UPFC-a prikazane su slikom 6.2. Regulacija napona je prikazana na a) dijelu slike i vidi se kako se injektiranjem napona koji je u fazi ili suprotno od faze napona mreže postiže povećanje ili smanjenje ukupnog napona. Na b) dijelu slike je prikazana regulacija reaktancijom. Injektira se napon  $V_{pq}$  koji je pomaknut za  $90^\circ$  u odnosu na struju voda te se dobiva ukupni iznos napona koji je veći ili manji od nekompensiranog. UPFC može upravljati faznim pomakom tako da injektira fazno pomaknut napon  $V_\sigma$  u odnosu na napon voda  $V$  i na taj način postiže odgovarajući fazni pomak  $\sigma$  bez povećavanja njegove amplitude. Na d) dijelu slike je prikazana kombinirana regulacija naponom, reaktancijom i faznim pomakom koji niti jedan drugi kompenzacijski uređaj ne može postići.

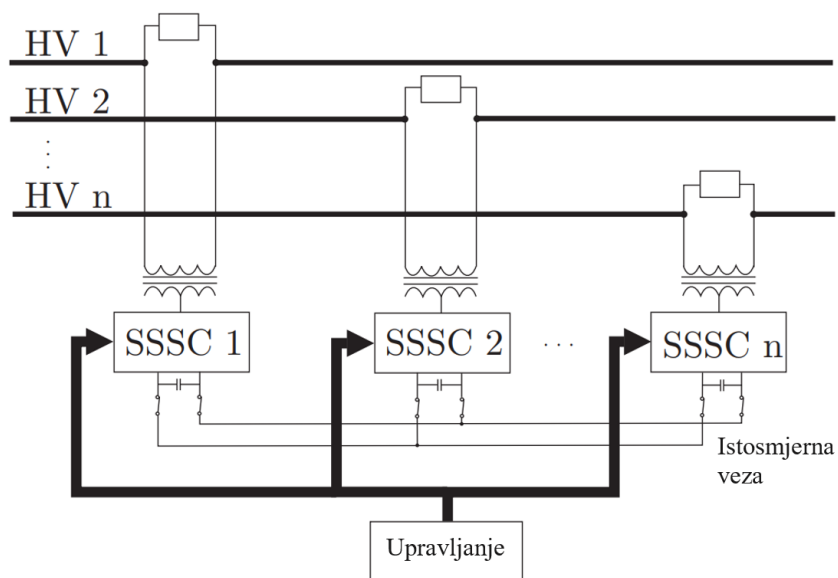


Slika 6.2. Funkcije UPFC-a: regulacija napona a), regulacija reaktancije b), regulacija faznog pomaka c), istovremena regulacija napona, reaktancije i faznog pomaka d) [1]



## 6.2. Regulator toka snage među vodovima (IPFC)

Regulator toka snage među vodovima je uređaj koji se sastoji od dva ili više SSSC uređaja međusobno povezanih istosmjernom vezom. Svaki SSSC uređaj spojen je na vlastiti vod i pruža tom vodu reaktivnu kompenzaciju, a pomoću istosmjerne veze može razmjenjivati djelatnu snagu sa ostalim SSSC uređajima. Tako se omogućava kompenzacija više vodova na jednom mjestu i može se ujednačiti tok snaga između više vodova. To se postiže uzimanjem viška djelatne snage iz preopterećenog voda i njenim preusmjeravanjem u manje opterećeni vod. Za razliku od UPFC-a koji dijeli jedan kondenzator između STATCOM-a i SSSC-a, kod IPFC-a svaki SSSC ima vlastiti kondenzator te djeluje kao nezavisni uređaj prilikom kompenzacije jalove snage. Istosmjerna strana svakog SSSC-a povezana je s ostalim SSSC-ovima i preko nje dolazi do razmjene djelatne snage. Prilikom preopterećenja jednog od vodova, njegov SSSC može apsorbirati dio djelatne snage i predati drugom SSSC-u čiji je vod slabo opterećen. Na taj se način postiže vrlo efikasno upravljanje tokovima snage u jednoj trafostanici. Osim kompenzacije jalove snage i preusmjeravanja djelatne snage, IPFC može poboljšati efikasnost kompenzacijskog sustava prilikom dinamičkih nestabilnosti sustava.

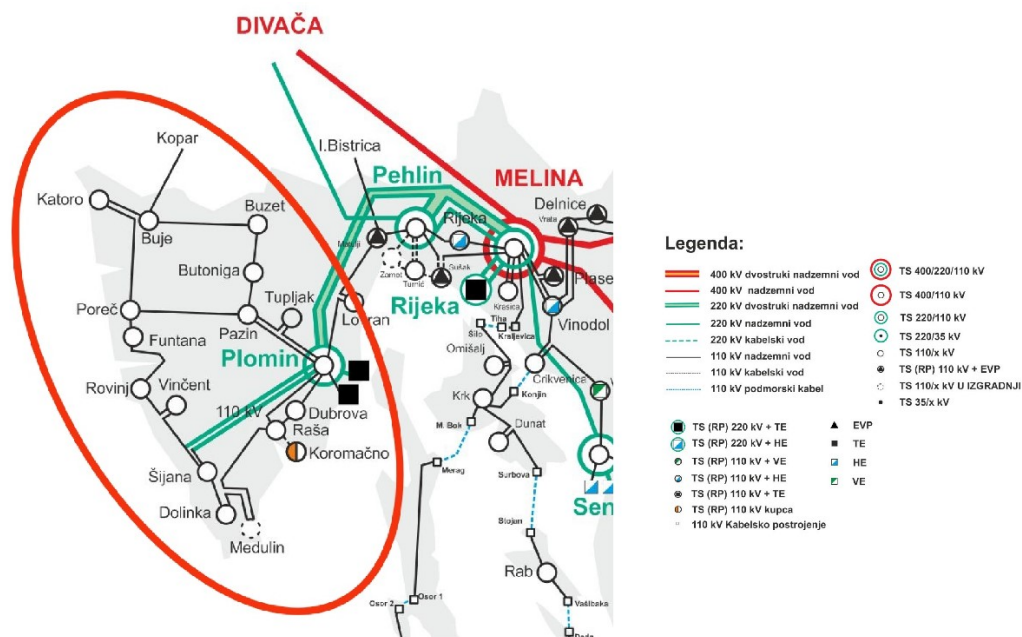


Slika 6.3. Shema IPFC uređaja [4]

## 7. PRAKTIČNI DIO

U praktičnom dijelu rada biti će prikazana simulacija serijskih FACTS uređaja. Simulacija je odrađena u programu za simuliranje elektroenergetskih mreža DIgSILENT PowerFactory. Program je vrlo intuitivan i nudi niz različitih vrsta simulacije kao što su izračun tokova snaga, izračun kratkog spoja, analiza ispada, dinamička simulacija sustava, analiza prijelaznih pojava, analiza kvalitete električne energije, harmonička analiza i dr. Za svrhe ove simulacije koristit će se proračun tokova snaga i biti će prikazano povećanje prijenosne moći voda pomoću serijskog FACTS uređaja. Za proračun tokova snaga PowerFactory koristi Newton-Raphsonovu metodu izračuna. Proračun se vrši u nekoliko iteracija prilikom čega se svakom iteracijom program bliži konačnom rješenju. Kada rješenje dođe unutar zadanih granica odstupanja postupak završava i program prikazuje konačno rješenje. Ova metoda je optimalna jer u najmanje iteracija dolazi do konačnog rješenja.

Za svrhe simulacije modelirana je elektroenergetska mreža Istre na 110kV prikazana slikom 7.1. Model simulirane mreže nalazi se u prilogu P1. Podaci elektroenergetskih vodova, generatora, energetskih transformatora, aktivnih mreža i potrošnje nalaze se u prilogima P2 – P6. Iznosi potrošnje u mreži su očitani u određenom trenutku te se uzimaju kao referentni zbog jednostavnosti simulacije. U stvarnom sustavu potrošnja konstantno varira kroz dan te bi za takvu simulaciju bilo potrebno više podataka.



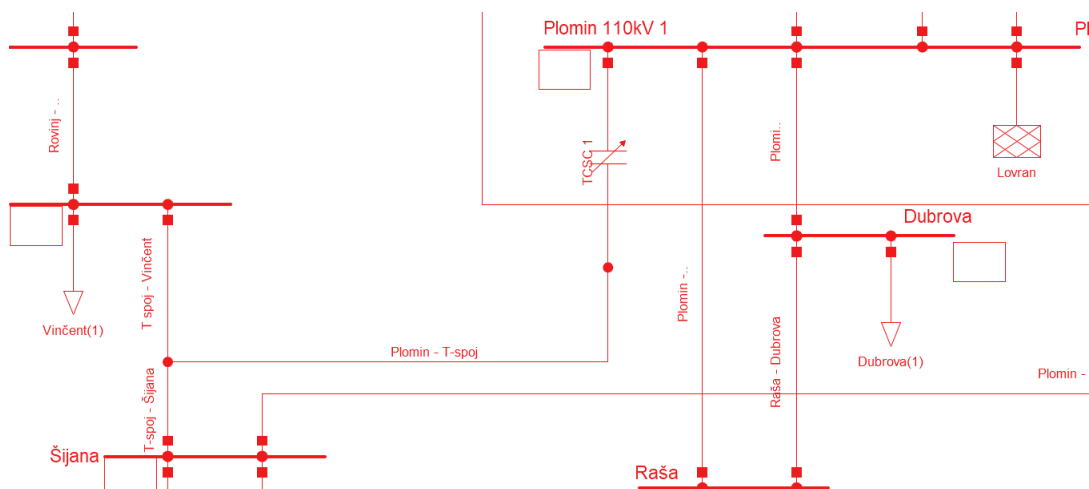
Slika 7.1. Elektroenergetski sustav Istre [14]

Simulacijom je obuhvaćen cijeli 110kV sustav i 220kV sabirnica u trafostanici Plomin zajedno s pripadajućim transformatorima. 220kV vod Plomin – Pehlin – Melina simuliran je aktivnom mrežom isto kao i 110kV vod Plomin – Lovran te Buje – Koper. Glavni izvor električne energije je generator bloka 2 u termoelektrani Plomin, a aktivne mreže razmjenjuju ostatak električne energije i povezuju elektroenergetski sustav Istre sa ostatkom Hrvatske i sa Slovenijom.

Zadatak simulacije je pokazati djelovanje serijskog FACTS uređaja na elektroenergetski sustav i biti će promatrano povećanje prijenosne moći voda. Stoga, parametri koji će se promatrati su ponajprije djelatna snaga koja teče kroz vod, opterećenje voda, te struja koja teče vodom. Izvršit će se i usporedba napona sabirnica prije i poslije simulacije kako bi se utvrdilo utječe li serijska kompenzacija na iznose napona.

### 7.1. TCSC ugrađen na vod Plomin – T-spoj

Za kompenzaciju odabran je TCSC uređaj koji se može naći kao gotov blok u programu PowerFactory. Kao što je navedeno u teoriji, TCSC ima mogućnost rada u induktivnom i u kapacitivnom području što će biti prikazano simulacijom. Za mjesto ugradnje TCSC uređaja odabrana je trafostanica Plomin, a promatrat će se spoj na dva voda i utvrditi koji je optimalniji za ugradnju TCSC-a. Oba voda idu u smjeru Pule, a izabrani su zbog toga što je Pula najveći grad u Istri te ujedno i najveći potrošač, pogotovo u ljetnim mjesecima kada potrošnja raste zbog turizma.



Slika 7.2. TCSC spojen na vod Plomin – T-spoj [15]

Prvi TCSC uređaj spojen je na vod Plomin – T-spoj. Odabrana je vrijednost kapacitivne reaktancije od  $X_C=10\Omega$ , a vrijednost induktivne reaktancije izračunata je iz izraza  $X_L/X_C=0,3$  iz

čega slijedi  $X_L=3\Omega$ . Ograničenja uređaja u vidu minimalne i maksimalne reaktancije namještena su na  $\pm 10\Omega$ . Ograničenja ujedno predstavljaju minimalnu i maksimalnu reaktanciju koji uređaj može postići. Upravljanje uređajem postignuto je podešavanjem njegove reaktancije na željeni induktivni ili kapacitivni iznos čime se postiže smanjenje ili povećanje toka snage kroz vod. Simulacija je provedena za nekoliko stupnjeva kompenzacije od kojih je prvi stupanj jednak nekompensiranom stanju mreže pri čemu je reaktancija TCSC-a jednaka nuli, a zadnji je stupanj jednak najvećem iznosu kapacitivne reaktancije, odnosno  $-10\Omega$ .

Tablica 7.1. Opterećenja vodova prilikom kapacitivnog načina rada prvog TCSC-a

	0 $\Omega$	-3 $\Omega$	-5 $\Omega$	-8 $\Omega$	-10 $\Omega$
Vod	Opterećenje %	Opterećenje %	Opterećenje %	Opterećenje %	Opterećenje %
Dolinka - Raša	22,6	20,6	19	16,1	13,8
Dolinka - Šijana	1,3	1,3	2,1	4,1	5,9
Plomin - T-spoj	29,9	33,4	36,2	41,5	45,9
Plomin - Šijana	21,1	19,8	18,8	16,9	15,3
T spoj - Vinčent	23	23,9	24,6	26	27,1
T-spoj - Šijana	7	9,6	11,7	15,6	18,9
Tupljak - Plomin	30,4	29,4	28,5	27	25,8

Tablica 7.2. Djelatna snaga na vodovima prilikom kapacitivnog načina rada prvog TCSC-a

	0 $\Omega$	-3 $\Omega$	-5 $\Omega$	-8 $\Omega$	-10 $\Omega$
Vod	Djelatna snaga MW	Djelatna snaga MW	Djelatna snaga MW	Djelatna snaga MW	Djelatna snaga MW
Dolinka - Raša	20,753	18,967	17,546	14,946	12,851
Dolinka - Šijana	0,491	1,252	2,64	5,189	7,251
Plomin - T-spoj	37,926	42,489	46,147	52,913	58,438
Plomin - Šijana	26,884	25,242	23,917	21,447	19,409
T spoj - Vinčent	28,976	30,149	31,086	32,813	34,217
T-spoj - Šijana	8,767	12,143	14,851	19,866	23,967
Tupljak - Plomin	38,989	37,636	36,558	34,577	32,974

Tablica 7.3. Struja koja teče kroz vodove prilikom kapacitivnog načina rada prvog TCSC-a

Vod	0 $\Omega$	-3 $\Omega$	-5 $\Omega$	-8 $\Omega$	-10 $\Omega$
	Iznos struje kA	Iznos struje kA	Iznos struje kA	Iznos struje kA	Iznos struje kA
Dolinka - Raša	0,106	0,097	0,089	0,076	0,065
Dolinka - Šijana	0,007	0,007	0,013	0,027	0,038
Plomin - T-spoj	0,193	0,215	0,234	0,268	0,296
Plomin - Šijana	0,136	0,127	0,121	0,108	0,098
T spoj - Vincent	0,148	0,154	0,159	0,167	0,175
T-spoj - Šijana	0,045	0,062	0,075	0,101	0,122
Tupljak - Plomin	0,196	0,189	0,184	0,174	0,166

Dobiveni rezultati promatrani su za određene vodove u okolici voda Plomin – T-spoj na kojem je TCSC ugrađen jer se na njima najviše primijete promjene prilikom kompenzacije. Promatrajući tablicu 7.2. i vod Plomin – T-spoj, vidljivo je kako povećanjem kapacitivne reaktancije raste i djelatna snaga koja se prenosi vodom. Također, s porastom snage dolazi i do većeg iznosa struje koja teče kroz vod, a time i većeg opterećenja voda. Povećanje prijenosa snage može se vidjeti i na vodovima T-spoj – Šijana i T-spoj – Vincent pošto su oni nastavak kompenziranog voda. Do povećanja prijenosne snage također dolazi i na vodu Dolinka – Šijana zbog preusmjerenja toka snage kroz kompenzirani vod.

Pošto elektroenergetska mreža nije radijalna nego prstenastog oblika, povećanjem prijenosne snage na jednom vodu doći će do smanjenja prijenosne snage na drugom vodu ako iznosi potrošnje ostanu isti. Snaga se rasporedila tako da veći iznos teče kompenziranim vodom, a manji iznosi ostalim vodovima. To se može primijetiti na ostalim vodovima u tablici 7.2., pa je povećanjem prijenosne moći na vodu Plomin – T-spoj došlo do smanjenja prijenosa snage na ostalim vodovima koji izlaze iz trafostanice Plomin i njima okolnim vodovima. Također, u tablici 7.4. može se primijetiti i blago povećanje opterećenja transformatora ATR1 i ATR2 pošto su oni povezani na sabirnicu gdje je spojen TCSC i smanjenje opterećenja transformatora ATR3 zbog smanjenog prijenosa snage kroz vodove povezane na njegovu sabirnicu.

Tablica 7.4. Opterećenja transformatora prilikom kapacitivnog načina rada prvog TCSC-a

	0 $\Omega$	-3 $\Omega$	-5 $\Omega$	-8 $\Omega$	-10 $\Omega$
Vod	Opterećenje %	Opterećenje %	Opterećenje %	Opterećenje %	Opterećenje %
ATR1	39,4	39,9	40,3	41	41,7
ATR2	39,4	39,9	40,3	41	41,7
ATR3	45,7	44,7	43,9	42,4	41,1

Sljedeća simulacija izvršena je za induktivni način rada prvog TCSC-a. Kao i za kapacitivni način, postepeno je povećavan iznos reaktancije od nule do 10 $\Omega$  i dobiveni podaci priloženi su u tablicama 7.5. – 7.8.

Tablica 7.5. Opterećenja vodova prilikom induktivnog načina rada prvog TCSC-a

	0 $\Omega$	3 $\Omega$	5 $\Omega$	8 $\Omega$	10 $\Omega$
Vod	Opterećenje %	Opterećenje %	Opterećenje %	Opterećenje %	Opterećenje %
Dolinka - Raša	22,6	24,2	25,1	26,2	26,9
Dolinka - Šijana	1,3	2,2	2,7	3,5	4
Plomin - T-spoj	29,9	27	25,4	23,3	22,1
Plomin - Šijana	21,1	22,1	22,7	23,5	23,9
T spoj - Vincent	23	22,2	21,8	21,3	21
T-spoj - Šijana	7	5	3,9	2,7	2,2
Tupljak - Plomin	30,4	31,3	31,8	32,4	32,8

Tablica 7.6. Djelatna snaga na vodovima prilikom induktivnog načina rada prvog TCSC-a

	0 $\Omega$	3 $\Omega$	5 $\Omega$	8 $\Omega$	10 $\Omega$
Vod	Djelatna snaga MW	Djelatna snaga MW	Djelatna snaga MW	Djelatna snaga MW	Djelatna snaga MW
Dolinka - Raša	20,753	22,216	23,052	24,133	24,768
Dolinka - Šijana	0,491	1,915	2,727	3,777	4,392
Plomin - T-spoj	37,926	34,219	32,114	29,4	27,813
Plomin - Šijana	26,884	28,211	28,961	29,925	30,486
T spoj - Vincent	28,976	28,021	27,478	26,776	26,365
T-spoj - Šijana	8,767	6,026	4,471	2,467	1,296
Tupljak - Plomin	38,989	40,094	40,723	41,538	42,015

Tablica 7.7. Struja koja teče kroz vodove prilikom induktivnog načina rada prvog TCSC-a

	0 $\Omega$	3 $\Omega$	5 $\Omega$	8 $\Omega$	10 $\Omega$
Vod	Iznos struje kA	Iznos struje kA	Iznos struje kA	Iznos struje kA	Iznos struje kA
Dolinka - Raša	0,106	0,114	0,118	0,123	0,127
Dolinka - Šijana	0,007	0,013	0,017	0,022	0,025
Plomin - T-spoj	0,193	0,174	0,164	0,15	0,142
Plomin - Šijana	0,136	0,142	0,146	0,151	0,154
T spoj - Vincent	0,148	0,143	0,141	0,137	0,135
T-spoj - Šijana	0,045	0,032	0,024	0,016	0,012
Tupljak - Plomin	0,196	0,202	0,205	0,209	0,211

U induktivnom načinu rada TCSC uređaj predstavlja induktivnu reaktanciju koja u seriji s vodom prividno povećava duljinu voda čime se smanjuje i prijenos snage kroz vod. Može se vidjeti kako se povećanjem reaktancije snaga prenesena vodom Plomin – T-spoj smanjuje. Sukladno tome smanjuje se i struja na vodu te opterećenje voda. Sva razmatranja koja vrijede za kapacitivno područje vrijede i za induktivno područje na obrnuti način, odnosno vodovima kojima se u kapacitivnom načinu rada povećavao prijenos snage, u induktivnom načinu će se smanjiti i

obrnuto, vodovima kojima je prijenos snage bio smanjen sada će biti povećan. U ovom slučaju kompenzator je djelovao tako da je smanjio iznos prenesene snage kroz vod na kojem je ugrađen i time povećao prijenos snage preko ostalih vodova koji su spojeni na trafostanicu Plomin. Opterećenja transformatora su također obrnuta, opterećenje transformatora ATR1 i ATR2 blago se smanjilo, a opterećenje transformatora ATR3 se povećalo.

Tablica 7.8. Opterećenja transformatora prilikom induktivnog načina rada prvog TCSC-a

	0 $\Omega$	3 $\Omega$	5 $\Omega$	8 $\Omega$	10 $\Omega$
Vod	Opterećenje %	Opterećenje %	Opterećenje %	Opterećenje %	Opterećenje %
ATR1	39,4	39	38,8	38,5	38,4
ATR2	39,4	39	38,8	38,5	38,4
ATR3	45,7	46,6	47	47,6	48

Tablica 7.9. Naponi sabirnica bez kompenzacije i prilikom kapacitivne i induktivne kompenzacije

	-10 $\Omega$	0 $\Omega$	10 $\Omega$
Sabirnica	Napon p.u.	Napon p.u.	Napon p.u.
Buje	1,029	1,028	1,027
Butoniga	1,03	1,03	1,029
Buzet	1,029	1,029	1,028
Dolinka	1,035	1,034	1,033
Dubrova	1,044	1,044	1,043
Funtana	1,022	1,021	1,02
Katoro	1,026	1,025	1,024
Pazin	1,032	1,032	1,031
Plomin 110kV 1	1,045	1,045	1,045
Plomin 110kV 2	1,042	1,042	1,041
Poreč	1,023	1,022	1,021
Raša	1,043	1,043	1,042
Rovinj	1,023	1,023	1,021
Tupljak	1,04	1,039	1,039
Vincent	1,029	1,028	1,027
Šijana	1,035	1,035	1,033

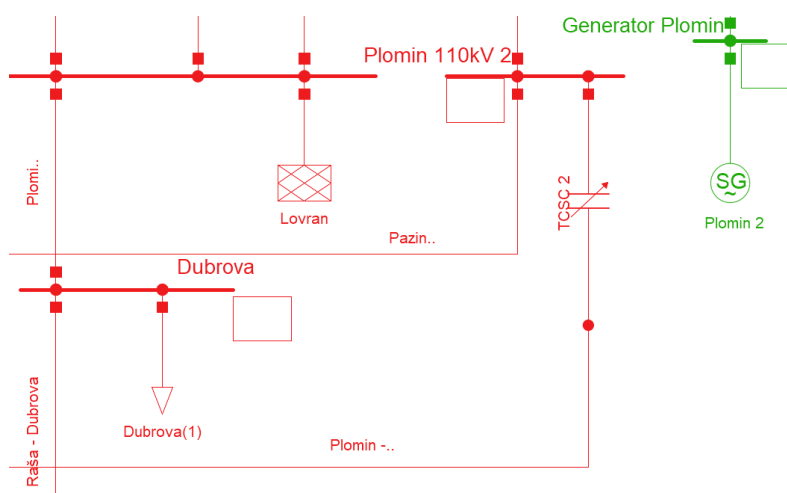
Tablicom 7.9. dana je usporedba napona u jediničnim vrijednostima za nekompenzirani sustav i prilikom induktivne i kapacitivne kompenzacije. Vidljivo je da dolazi do vrlo blagog povećanja napona na pojedinim sabirnicama tokom kapacitivne kompenzacije, što se i moglo očekivati pošto je povećan protok snage na tim mjestima, a potrošnja je ostala ista. Za induktivnu kompenzaciju situacija je obrnuta, odnosno dolazi do blagog smanjenja napona. Ove promjene su vidljive tek u



trećoj decimali dobivenog iznosa pa su gotovo zanemarive i može se zaključiti da u ovom slučaju serijska kompenzacija nema velikog utjecaja na iznose napona u mreži.

## 7.2. TCSC ugrađen na vod Plomin – Šijana

Za mjesto ugradnje drugog TCSC-a odabran je vod Plomin – Šijana pošto je ovo vod koji također ide prema Puli. Za razliku od voda Plomin – T-spoj koji se račva u T-spoju i prenosi snagu donjem i gornjem dijelu Istre, vod Plomin – Šijana ide izravno u Pulu te se snaga prenesena ovim vodom troši samo na području Pule. Model TCSC-a uzet je s istim parametrima kao i prvi TCSC i simulacija je provedena na isti način za nekoliko stupnjeva kompenzacije.



Slika 7.3. TCSC spojen na vod Plomin – Šijana [15]

Tablica 7.10. Opterećenja vodova prilikom kapacitivnog načina rada drugog TCSC-a

Vod	0 $\Omega$	-3 $\Omega$	-5 $\Omega$	-8 $\Omega$	-10 $\Omega$
	Opterećenje %	Opterećenje %	Opterećenje %	Opterećenje %	Opterećenje %
Pazin - Plomin	32,4	31,5	30,9	29,7	28,8
Plomin - Raša	16,8	16,4	16,1	15,6	15,1
Plomin - T-spoj	29,9	29	28,3	27,1	26,2
Plomin - Šijana	21,1	23	24,5	27,2	29,4
Poreč - Pazin	35,4	35,1	34,8	34,3	33,9

Tablica 7.11. Djelatna snaga na vodovima prilikom kapacitivnog načina rada drugog TCSC-a

	0 $\Omega$	-3 $\Omega$	-5 $\Omega$	-8 $\Omega$	-10 $\Omega$
Vod	Djelatna snaga MW	Djelatna snaga MW	Djelatna snaga MW	Djelatna snaga MW	Djelatna snaga MW
Pazin - Plomin	41,439	40,332	39,482	37,988	36,832
Plomin - Raša	15,597	15,221	14,93	14,418	14,019
Plomin - T-spoj	37,926	36,801	35,928	34,376	33,156
Plomin - Šijana	26,884	29,419	31,381	34,857	37,577
Poreč - Pazin	44,908	44,432	44,067	43,424	42,926

Tablica 7.12. Struja koja teče kroz vodove prilikom kapacitivnog načina rada drugog TCSC-a

	0 $\Omega$	-3 $\Omega$	-5 $\Omega$	-8 $\Omega$	-10 $\Omega$
Vod	Iznos struje kA	Iznos struje kA	Iznos struje kA	Iznos struje kA	Iznos struje kA
Pazin - Plomin	0,209	0,203	0,199	0,191	0,186
Plomin - Raša	0,079	0,077	0,076	0,073	0,071
Plomin - T-spoj	0,193	0,187	0,183	0,175	0,169
Plomin - Šijana	0,136	0,148	0,158	0,176	0,189
Poreč - Pazin	0,229	0,226	0,224	0,221	0,218

Tablica 7.13. Opterećenja transformatora prilikom kapacitivnog načina rada drugog TCSC-a

	0 $\Omega$	-3 $\Omega$	-5 $\Omega$	-8 $\Omega$	-10 $\Omega$
Vod	Opterećenje %	Opterećenje %	Opterećenje %	Opterećenje %	Opterećenje %
ATR1	39,4	38,9	38,5	37,9	37,3
ATR2	39,4	38,9	38,5	37,9	37,3
ATR3	45,7	46,7	47,4	48,7	49,8

Spojem TCSC-a na vod Plomin – Šijana i povećanjem njegove kapacitivne reaktancije vidljivo je povećanje snage prenesene vodom, a time opterećenja i struje kroz vod. Na okolnim promatranim vodovima dolazi do smanjenja snage prijenosa. U ovom slučaju dolazi do povećanja opterećenja transformatora ATR3, a smanjenja opterećenja na transformatorima ATR1 i ATR2

pošto je TCSC spojen na 110kV sabirnicu transformatora ATR3. Za induktivni način rada, povećanjem reaktancije smanjuje se snaga prenesena vodom i sukladno tome snaga na okolnim vodovima se povećava. Opterećenja transformatora ATR1 i ATR2 se povećavaju, a opterećenje transformatora ATR3 se smanjuje. Promatranjem napona na sabirnicama može se vidjeti da su ostali nepromijenjeni, odnosno da je promjena zanemariva jednako kao i prilikom simulacije prvog TCSC-a.

*Tablica 7.14. Opterećenja vodova prilikom induktivnog načina rada drugog TCSC-a*

	0 $\Omega$	3 $\Omega$	5 $\Omega$	8 $\Omega$	10 $\Omega$
Vod	Opterećenje %	Opterećenje %	Opterećenje %	Opterećenje %	Opterećenje %
Pazin - Plomin	32,4	33,1	33,5	34,1	34,5
Plomin - Raša	16,8	17,2	17,4	17,7	17,8
Plomin - T-spoj	29,9	30,6	31	31,6	32
Plomin - Šijana	21,1	19,4	18,5	17,2	16,4
Poreč - Pazin	35,4	35,8	36	36,2	36,4

*Tablica 7.15. Djelatna snaga na vodovima prilikom induktivnog načina rada drugog TCSC-a*

	0 $\Omega$	3 $\Omega$	5 $\Omega$	8 $\Omega$	10 $\Omega$
Vod	Djelatna snaga MW	Djelatna snaga MW	Djelatna snaga MW	Djelatna snaga MW	Djelatna snaga MW
Pazin - Plomin	41,439	42,381	42,935	43,674	44,136
Plomin - Raša	15,597	15,916	16,102	16,351	16,506
Plomin - T-spoj	37,926	38,874	39,427	40,16	40,617
Plomin - Šijana	26,884	24,742	23,489	21,827	20,789
Poreč - Pazin	44,908	45,312	45,55	45,867	46,065

Tablica 7.16. Struja koja teče kroz vodove prilikom induktivnog načina rada drugog TCSC-a

	0 $\Omega$	3 $\Omega$	5 $\Omega$	8 $\Omega$	10 $\Omega$
Vod	Iznos struje kA	Iznos struje kA	Iznos struje kA	Iznos struje kA	Iznos struje kA
Pazin - Plomin	0,209	0,214	0,216	0,22	0,222
Plomin - Raša	0,079	0,081	0,082	0,083	0,084
Plomin - T-spoj	0,193	0,197	0,2	0,204	0,206
Plomin - Šijana	0,136	0,125	0,119	0,11	0,105
Poreč - Pazin	0,229	0,231	0,232	0,233	0,234

Tablica 7.17. Opterećenja transformatora prilikom induktivnog načina rada drugog TCSC-a

	0 $\Omega$	3 $\Omega$	5 $\Omega$	8 $\Omega$	10 $\Omega$
Vod	Opterećenje %	Opterećenje %	Opterećenje %	Opterećenje %	Opterećenje %
ATR1	39,4	39,8	40	40,4	40,6
ATR2	39,4	39,8	40,1	40,4	40,6
ATR3	45,7	44,9	44,5	43,9	43,5

Tablica 7.18. Naponi sabirnica bez kompenzacije i prilikom kompenzacije

	-10 $\Omega$	0 $\Omega$	10 $\Omega$
Sabirnica	Napon p.u.	Napon p.u.	Napon p.u.
Buje	1,028	1,028	1,028
Butoniga	1,03	1,03	1,03
Buzet	1,029	1,029	1,029
Dolinka	1,035	1,034	1,034
Dubrova	1,044	1,044	1,043
Funtana	1,021	1,021	1,021
Katoro	1,025	1,025	1,025
Pazin	1,032	1,032	1,032
Plomin 110kV 1	1,045	1,045	1,045
Plomin 110kV 2	1,043	1,042	1,042
Poreč	1,023	1,022	1,022
Raša	1,043	1,043	1,042
Rovinj	1,023	1,023	1,022
Tupljak	1,039	1,039	1,039
Vincent	1,029	1,028	1,028
Šijana	1,035	1,035	1,034

### 7.3. Odabir optimalnog mjesta ugradnje TCSC uređaja

Iz prethodna dva slučaja može se vidjeti da uređaj djeluje prema očekivanjima za oba moguća spoja. U kapacitivnom režimu povećava snagu prijenosa voda, a u induktivnom ju smanjuje. Usporedbom ukupnog povećanja ili smanjenja djelatne snage na vodu danom u tablici 7.19. može se vidjeti kako je TCSC spojen na vod Plomin – T-spoj postigao znatno veću razliku u snazi nego TCSC na vodu Plomin – Šijana. Tomu doprinosi i manja duljina voda Plomin – T-spoj te njegovo veće početno opterećenje bez kompenzacije. Usporedbom opterećenja transformatora u tablici 7.20. može se vidjeti kako u kapacitivnom području, području u kojem će TCSC uređaj većinom raditi, dolazi do smanjenja opterećenja ATR1 i ATR2 za TCSC 2, međutim dolazi do povećanja opterećenja ATR3 i međusobno veće razlike u opterećenju transformatora. Za TCSC 1 vrijedi obrnuto, a razlika u opterećenju je vrlo mala, transformatori su gotovo jednako opterećeni.

Tablica 7.19. Usporedba povećanja prijenosne snage za maksimalni stupanj kompenzacije

	Bez kompenzacije	Maksimalna kompenzacija	Razlika u snazi	Povećanje/smanjenje djelatne snage
Vod	Djelatna snaga MW	Djelatna snaga MW	Djelatna snaga MW	%
Plomin - T-spoj Kapacitivno	37,926	58,438	20,512	54,084
Plomin - T-spoj induktivno	37,926	27,813	-10,113	-26,665
Plomin – Šijana kapacitivno	26,884	37,577	10,693	39,775
Plomin – Šijana induktivno	26,884	20,789	-6,095	-22,672

Tablica 7.20. Usporedba opterećenja transformatora

	TCSC 1			TCSC 2	
	0 $\Omega$	-10 $\Omega$	10 $\Omega$	-10 $\Omega$	10 $\Omega$
ATR1	39,4	41,7	38,4	37,3	40,6
ATR2	39,4	41,7	38,4	37,3	40,6
ATR3	45,7	41,1	48	49,8	43,5

Uzevši u obzir ova razmatranja, moguće je zaključiti kako je bolji odabir TCSC 1 jer dolazi do većeg prijenosa snage nego kod TCSC 2 uređaja. Također, transformatori su jednoličnije opterećeni i povećanje opterećenja ATR1 i ATR2 nije veliko. Kada bi se išlo u realizaciju FACTS uređaja za elektroenergetski sustav Istre, ugradnja serijske kompenzacije, barem za promatrani slučaj, nije isplativa jer vodovi nisu znatno opterećeni i nema prevelike potrošnje u sustavu. Bolje mjesto ugradnje serijske kompenzacije bilo bi na 220kV ili 400kV dijelu mreže na dugačkim vodovima gdje je potrebno povećanje prijenosne moći. U simuliranoj mreži moguće je primijetiti povišene iznose napona na sabirnicama (iznad 1 p.u.) što je posljedica malog opterećenja. U ovu mrežu bi bilo bolje ugraditi paralelni FACTS uređaj u obliku tiristorski upravljive zavojnice koja će smanjiti iznose napona sabirnica i gubitke u sustavu.

## 8. ZAKLJUČAK

Suvremeni elektroenergetski sustav zahtijeva suvremena rješenja za kompenzaciju jalove snage. Razvoj energetske elektronike omogućio je razvoj FACTS uređaja i time donio znatna poboljšanja elektroenergetskom sustavu u vidu stabilizacije napona na vodu, kompenzacije jalove snage i povećanje prijenosne moći voda. FACTS uređaje može se podijeliti na serijske, paralelne, serijsko-serijske i serijsko-paralelne. Serijski uređaji injektiraju napon u seriji s vodom, a paralelni injektiraju struju u čvor na koji su spojeni te time kompenziraju jalovu snagu na vodu. Razne su izvedbe FACTS uređaja, ali glavni dijelovi su isti, a sastoje se od bloka kondenzatora, prigušnica i kontrolnog uređaja koji upravlja cijelim sustavom. Primitivnije izvedbe imaju samo mogućnost uklapanja u mrežu i isklapanja iz mreže, dok naprednije verzije imaju pretvarač koji pomoću snažnih tiristora kontrolira točno koliko energije se injektira u mrežu ili apsorbira u reaktivne elemente i time znatno poboljšava svojstva mreže. Također, osim fiksnih i glomaznih uređaja postoje i kompaktni pomični FACTS uređaji koje je moguće preseliti s jedne lokacije na drugu u vrlo kratkom roku i time dobiti na velikoj fleksibilnosti mreže. Zbog svih prednosti koje nude, lako je zaključiti kako će se u budućnosti koristiti još više FACTS uređaja i time osigurati veću stabilnost i pouzdanost elektroenergetskog sustava.

## 9. LITERATURA

- [1] Hingorani, N. G.; Gyugyi, L.: „Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems“, John Wiley & Sons, Inc. Publication, New York, 2000.
- [2] Mathur, R. M., Varma, R. K., „THYRISTOR-BASED FACTS CONTROLLERS FOR ELECTRICAL TRANSMISSION SYSTEMS“, John Wiley & Sons, Inc. Publication, New York, 2002.
- [3] Dizdarević, N.: „Mogućnosti povećanja prijenosne moći EES-a korištenjem konvencionalnih i FACTS naprava“, Energija, god. 50 (2001) 5, str. 323-348, Zagreb, 2001.
- [4] Glanzmann, G.: „FACTS Flexible Alternating Current Transmission Systems“, EEH – Power Systems Laboratory, ETH Zürich, 2005.
- [5] Blasina, M., Komen, V., Čučić, R., „Regulacija napona i kompenzacija jalove snage pomoću SVC uređaja“, Eng. Rev. 30-2, str. 47-58, 2010.
- [6] Mahajan, V.: „Thyristor Controlled Series Compensator“, Department Of Electrical Engineering, M P Christian College of Engineering & Technology Bhilai, Chattisgarh, India.
- [7] Thallam, Rao S., Joós, G.: „Reactive power compensation“, poglavlje iz knjige: „Electric Power Generation, Transmission and Distribution“, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, 2012.
- [8] Padiyar, K. R., „FACTS CONTROLLERS IN POWER TRANSMISSION AND DISTRIBUTION“, New Age International (P) Ltd., Publishers, New Delhi, 2007.
- [9] Gyugy, L., Joos, G., Arrillaga j., i dr.: „Flexible Ac Transmission Systems (FACTS)“, The Institution of Engineering and Technology, London, 1999.
- [10] Zhang X., Rehtanz, C., Pal, B.: „Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [11] Levačić, G., Uglešić, I., i dr.: „PROBLEMATIKA UGRADNJE KOMPENZACIJSKIH UREĐAJA U PRIJENOSNOJ ELEKTROENERGETSKOJ MREŽI“, 13. savjetovanje HRO CIGRÉ Šibenik, 2017.
- [12] „Discover the World of FACTS Technology“, SIEMENS AG, Erlangen, Germany, 2010.
- [13] Acha, E., Fuerte-Esquivel, C. R., i dr.: „FACTS Modelling and Simulation in Power Networks“, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, 2004.
- [14] S interneta, <https://www.hops.hr/shema-ees-a>, Rujan 2021.
- [15] Napravljeno pomoću programa DIgSILENT PowerFactory



## 10. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

Zadatak diplomskog rada bio je opisati FACTS uređaje i njihovu primjenu u prijenosnoj mreži. U prvom poglavlju dan je općeniti pregled FACTS tehnologije i opisan tok snage kroz elektroenergetski vod. Zatim su opisane vrste FACTS uređaja, odnosno njihova podjela na serijske, paralelne, serijsko-serijske i serijsko-paralelne uređaje. Za svaku vrstu uređaja prikazane su tipične izvedbe i opisan je način na koji rade. Najčešće izvedbe paralelnih uređaja su SVC i STATCOM, a serijski su najčešće izvedeni kao TCSC i SSSC. Serijsko-serijski uređaj je IPFC, a serijsko-paralelni UPFC. Naposljetku je napravljena simulacija ugradnje serijskog uređaja na elektroenergetski sustav Istre. Simulacija je izvedena u programu DIgSILENT PowerFactory i analizirana su dva moguća spoja TCSC uređaja na elektroenergetsku mrežu. Prikazan je njihov utjecaj na povećanje prijenosne moći voda te je odabrano optimalno mjesto ugradnje uređaja.

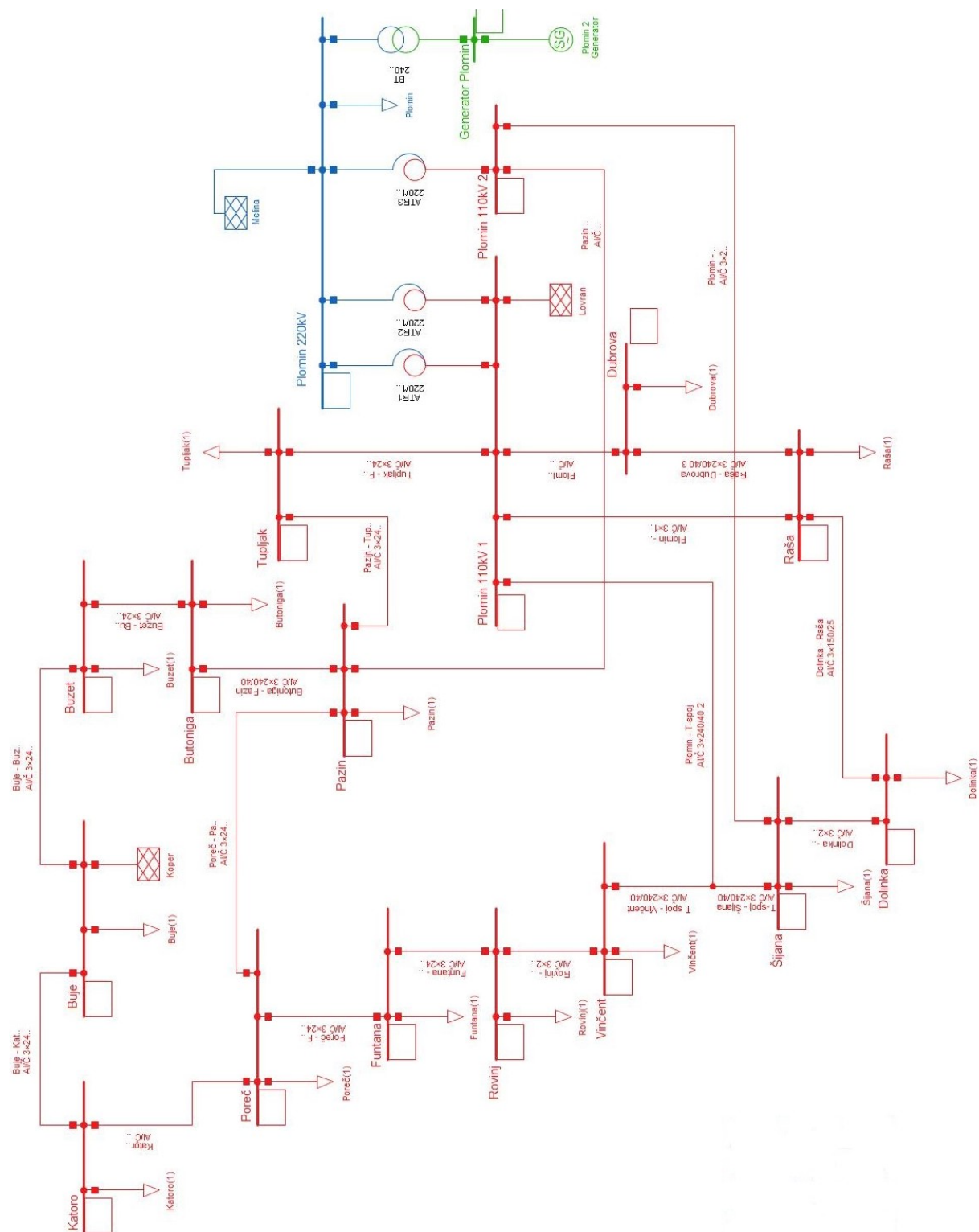
Ključne riječi: djelatna snaga, jalova snaga, FACTS uređaji, serijska kompenzacija, paralelna kompenzacija, TCSC, SVC, STATCOM

The task of this master's thesis was to describe FACTS devices and their application in the transmission network. The first chapter presents a general overview of FACTS technology and describes the flow of power through the power line. The next chapter describes the types of FACTS devices and their division into series, parallel and combined devices. Typical arrangements are shown for each type of device, and their working principle is described. The most common versions of parallel compensation devices are SVC and STATCOM, and the most common series compensation devices are TCSC and SSSC. A combined series-series device is an IPFC, and a combined series-parallel device UPFC. The installation of a series compensation device was shown on a model of transmission network in Istria. The simulation was performed in the DIgSILENT PowerFactory program, and two possible connections of TCSC device to the power grid were analyzed. Their influence on the increase in the power transfer capacity of the transmission line is shown, and the optimal installation location of the device was selected.

Key words: active power, reactive power, FACTS devices, series compensation, parallel compensation, TCSC, SVC, STATCOM

# 11. PRILOG

## Prilog P1 – Model elektroenergetske mreže Istre na 110kV [15]



Prilog P2 – Parametri vodova

Ime voda	U [kV]	Duljina, l [km]	$R_1$ [ $\Omega$ ]	$X_1$ [ $\Omega$ ]	$B_1$ [ $\mu$ S]	I <sub>max</sub> [A]
Buje – Buzet 110 kV	110	26,66	3,17	10,53	77,06	645
Buje – Katoro 110 kV	110	12,5	1,48	5,24	34	645
Butoniga – Pazin 110 kV	110	12,06	1,43	4,77	34,85	645
Buzet – Butoniga 110 kV	110	9	1,07	3,56	26,01	645
Dolinka – Raša 110 kV	110	47,2	7,87	20	131,9	470
Funtana – Rovinj 110 kV	110	18,53	2,19	7,56	51,5	645
Katoro – Poreč 110 kV	110	29,9	3,56	12,0	80,78	645
Pazin – Plomin 110 kV	110	24,94	2,97	9,85	72,08	645
Pazin – Tupljak 110 kV	110	18,75	2,25	7,88	51,01	645
Plomin – Šijana 110 kV	110	42,93	2,53	17,7	120,21	645
T-spoj – Vinčent 110 kV	110	23,42	2,81	9,84	63,7	645
Poreč – Funtana 110 kV	110	10,03	1,18	4,09	27,86	645
Poreč – Pazin 110 kV	110	20,7	2,46	8,17	59,79	645
Raša – Dubrova 110 kV	110	6,67	1,3	2,9	18,23	645
Rovinj – Vinčent 110 kV	110	19,3	2,27	7,87	53,65	645
Šijana – Dolinka 110 kV	110	6,7	0,78	2,72	18,67	645
Tupljak – Plomin 110 kV	110	13,95	1,68	5,86	37,96	645
T-spoj – Šijana 110 kV	110	10,11	1,21	4,25	27,5	645
Plomin – Dubrova 110 kV	110	6,8	1,3	2,91	18,23	645
Plomin – Raša 110 kV	110	13,48	2,72	6,97	36,65	470
TE Plomin – T - spoj 110 kV	110	32,77	1,8	13,7	89,13	645

Prilog P3 – Parametri generatora

Ime generatora	S <sub>r</sub> [MVA]	cos $\phi$	U <sub>r</sub> [kV]	X <sub>d</sub> [%]	X <sub>d</sub> ' [%]	X <sub>d</sub> '' [%]	X(2) [%]	X(0) [%]
Proizvodnja Plomin „Blok B“	247	0,85	13,8	237	30	22	20,4	11,1

Prilog P4 – Parametri transformatora

Ime transformatora	Sr [MVA]	Ur1/Ur2 [kV]	Ukr(1) [%] = Ukr(0) [%]	P <sub>Cu</sub> [kW]	P <sub>Fe</sub> [kW]	Grupa spoja (pr. Yd5)	Uzemljenje (pr. j10ohm ili ---)	
							primar	sekundar
BT 220/13,8 kV	245	240/13,8	12,62	645,4	121,5	YNd5	0	-
220/110 kV ATR1	150	220/115	10,7	399	33,6	YNyn0	0	0
220/110 kV ATR2	150	220/115	10,7	376	43,8	YNyn0	0	0
220/110 kV ATR3	150	220/115	10,4	265,2	39,5	YNyn0	0	0

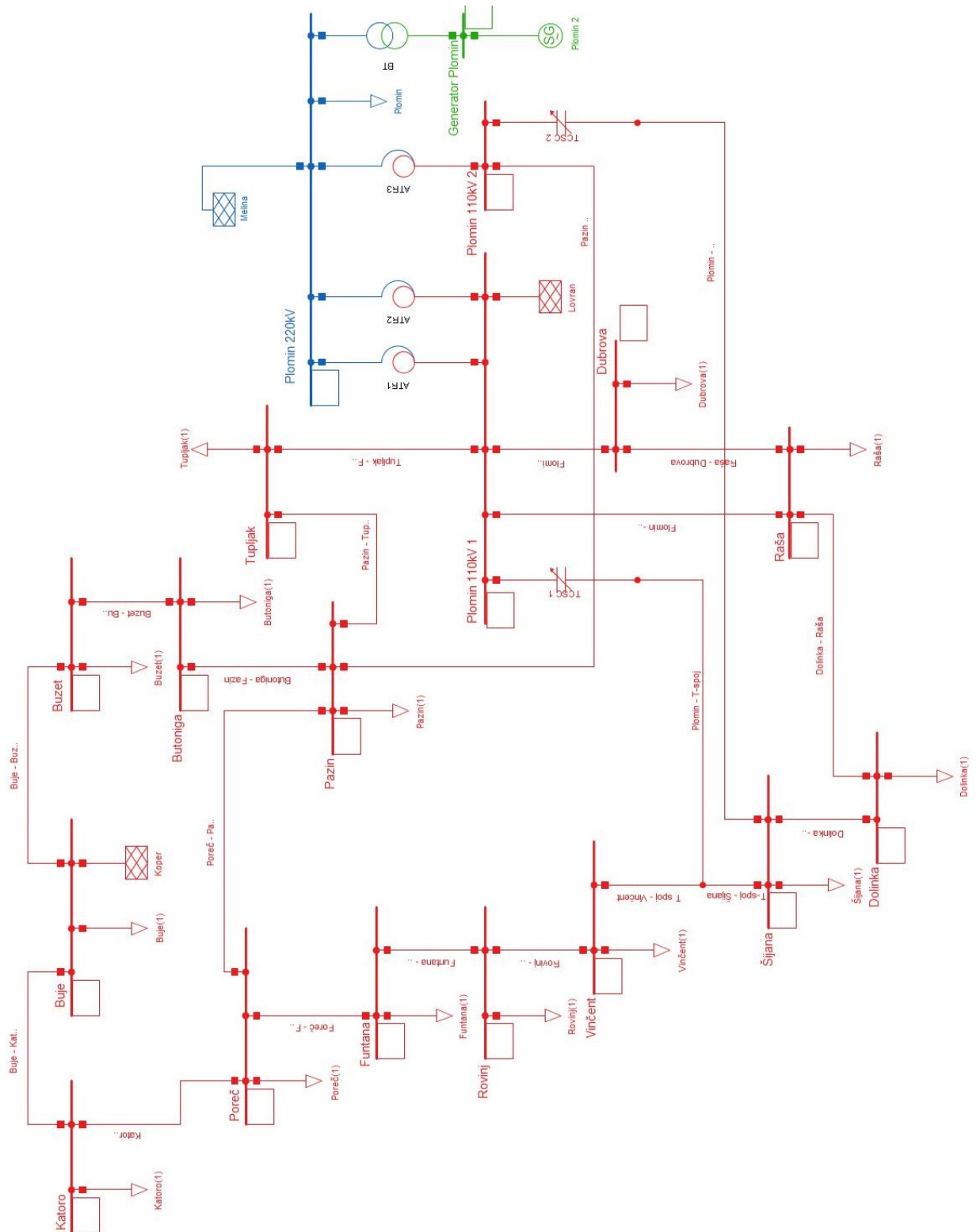
Prilog P5 – Parametri aktivnih mreža

Ime AM	Un [kV]	Sk max [MVA]	LF-Type	Opis
AM Kopar 110 kV	110	285	PV	-
AM Lovran 110 kV	110	250	PV	-
AM Melina/Pehlin 220 kV	220	1500	SL	Dvostruki vod, 220 kV simuliran s jednom AM

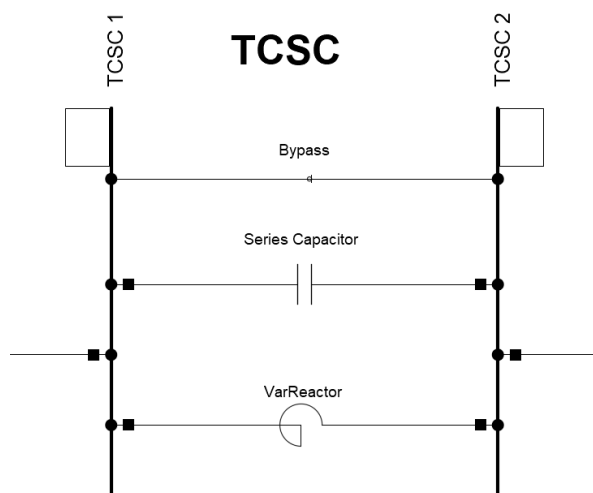
Prilog P6 – parametri potrošača

Ime potrošača	P [MVA]	Q [Mvar]
Plomin	1	1
Dubrova	3	0
Raša	12	-2
Dolinka	20	-1
Šijana	36	2
Vincent	8	-1
Rovinj	20	1
Funtana	17	2
Poreč	35	3
Pazin	13	1
Tupljak	3	0
Butoniga	4	1
Buzet	9	0
Buje	14	2
Katoro	11	2

Prilog P7 – Model elektroenergetske mreže Istre na 110kV s ugrađenim TCSC uređajima [15]

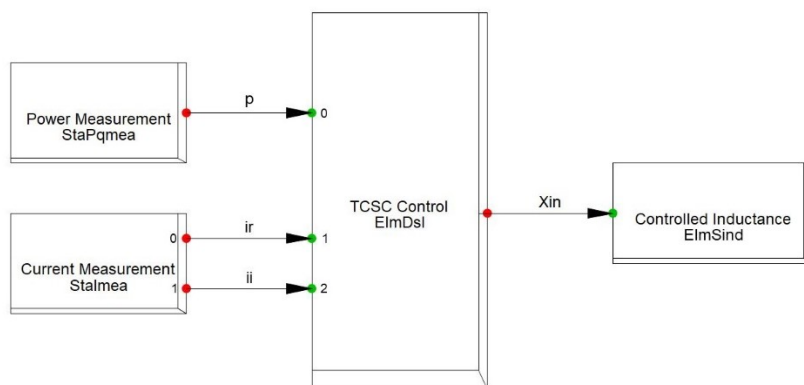


U programu DIgSILENT PowerFactory TCSC uređaj se može naći kao gotov blok čiji je simbol promjenjivi kondenzator. Na slici 11.1. prikazana je shema TCSC-a kada bi se odvojio na osnovne dijelove. Sastoji se od fiksnog kondenzatora paralelno spojenog sa TCR uređajem, odnosno promjenjivom zavojnicom. Također, spojen je i prekidač kojim se uređaj može premostiti.



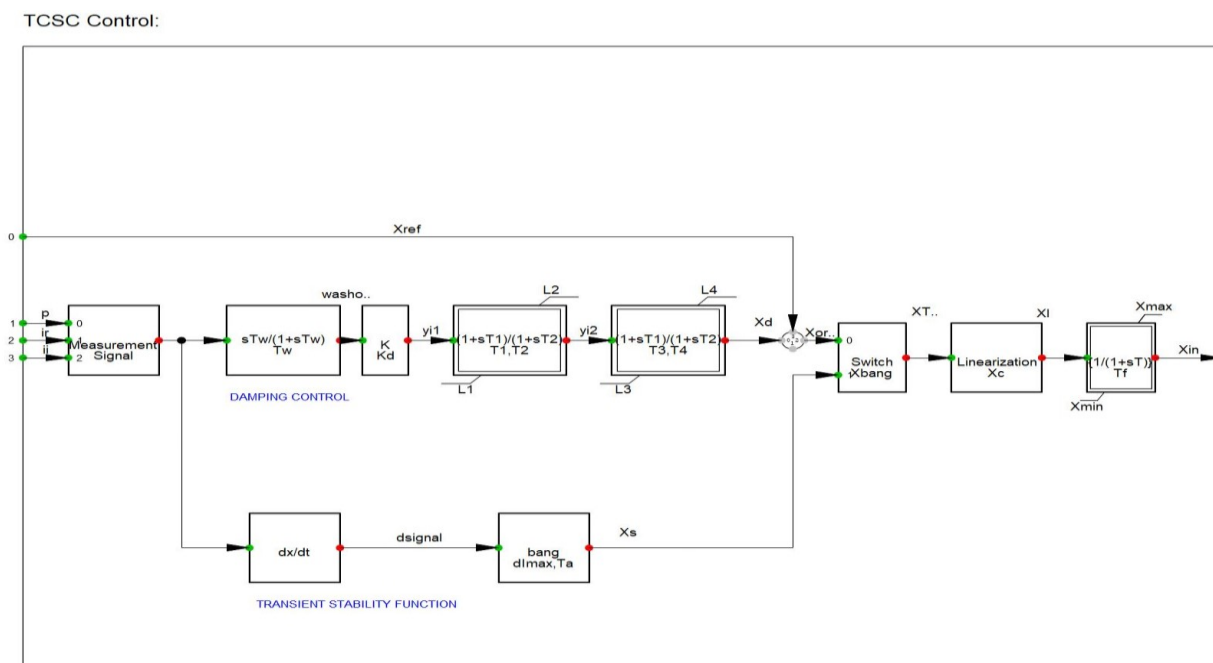
Slika 11.1. Opći prikaz TCSC uređaja [15]

Slikom 11.2. prikazana je blokovska shema TCSC uređaja. U poglavlju 7. napravljena je simulacija prilikom koje se namještala reaktancija TCSC-a kako bi se postiglo povećanje prijenosne moći voda. TCSC uređaj ima i drugih načina upravljanja, pa se njime može upravljati namještajući referentnu snagu ili referentnu struju. Uređaj se može primijeniti i za dinamičke simulacije, kao što su prigušenje oscilacija snage i poboljšanje prijelazne stabilnosti, prilikom čega njegov upravljački blok konstantno prilagođava reaktanciju, odnosno napon injektiran u mrežu. Stoga se blokovska shema sastoji od dva ulazna bloka koji mjere snagu i struju u mreži, kontrolnog bloka i bloka koji predstavlja promjenjivu reaktanciju.



Slika 11.2. Blokovska shema TCSC-a [15]

Slika 11.3. prikazuje upravljački blok TCSC uređaja. Ulazi u blok su mjerena snaga i struje u mreži te referentna vrijednost reaktancije. Signali odlaze na dva seta blokova gdje gornji set služi za ublažavanje oscilacija snage, a donji za poboljšanje prijelazne stabilnosti. Svaki blok sadrži jednu ili više makronaredbi čija su imena prikazana u bloku. Imena su u obliku formule, slova ili teksta. Makronaredbe se sastoje od nekoliko linija koda pomoću kojeg se pozivaju zadane i mjerene vrijednosti, te se matematičkim operacijama koje opisuju određeni dio upravljanja dobivaju nove veličine. Ove veličine ulaze u sljedeći blok koji vrši daljnju obradu signala što se ponavlja do zadnjeg bloka koji daje izlaznu veličinu  $X_{in}$ . Naposljetku, blok „Controlled Inductance“ na slici 11.2. namješta izlaznu reaktanciju uređaja prema vrijednosti  $X_{in}$  koja je zadana kontrolnim blokom.



Slika 11.3. Shema upravljačkog bloka TCSC-a [15]