Određivanje karakteristike FACTS uređaja s aspekta stabilnosti sustava

Junušić, Davor

Master's thesis / Diplomski rad

2016

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:257369

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-20**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Diplomski studij

ODREĐIVANJE KARAKTERISTIKE FACTS UREĐAJA S ASPEKTA STABILNOSTI SUSTAVA

Diplomski rad

Davor Junušić

Osijek, 2016.

1. UVOD 1
1.1. Zadatak diplomskog rada 1
2. PRIJENOS ELEKTRIČNE ENERGIJE I REGULACIJA NAPONA MREŽE 3
2.1. Teorija prijenosa električne energije 4
2.1.1. Prijenos prirodne snage na idealnom vodu 5
2.1.2. Prijenos prirodne snage na realnom vodu 7
2.1.3. Nepovoljni slučajevi prijenosa snage dugim vodovima 7
2.2. Regulacija napona mreže 9
2.2.1. Odnos napona i jalove snage 10
2.2.2. Mogućnosti regulacije napona i tokova jalovih snaga 13
2.2.3. Nazivni naponi u EES-u i dozvoljena odstupanja 15
3. NAPONSKA STABILNOST SUSTAVA 17
3.1. Teoretska razmatranja naponske stabilnosti 19
3.1.1. Statičke karakteristike prijenosnog sustava 23
3.1.2. Utjecaj karakteristika tereta 30
3.1.3. Kriteriji naponske stabilnosti 31
3.2. Kritični zahtjev opterećenja i kolaps napona 33
3.2.1. Utjecaj povećanja zahtjeva opterećenja 34
3.2.2. Utjecaj ispada elemenata mreže 35
3.2.3. Utjecaj oblika karakteristike tereta 35
3.2.4. Utjecaj automatske regulacije napona generatora 35
3.3. Statička analiza sustava 36
3.3.1. Naponska stabilnost i tokovi snaga 36
3.4. Dinamička analiza sustava 38
3.5. Prevencija naponskog sloma 41
4. FACTS UREĐAJI 43
4.1. Serijske FACTS naprave 44
4.1.1. Statički sinkroni serijski kompenzator (SSSC) 47
4.1.2. Tiristorski upravljivi serijski kondenzator (TCSC) 50
4.1.3. Tiristorski uklopivi serijski kondenzator (TSSC) 53
4.1.4. Ostali serijski FACTS uređaji 54
4.2. Poprečne FACTS naprave 55
4.2.1. Statički VAr kompenzator (SVC) 58
4.2.2. Staički sinkroni kompenzator (STATCOM) 62
4.3. Kombinirane FACTS naprave 65
4.3.1. Objedinjeni regulator toka snage (UPFC) 66

4.4. Usporedba troškova instalacije 68
5. EKSPERIMENTALNI DIO RADA 70
5.1. Analiza postojećih godišnjih naponskih prilika na 400 kV strani u TS Ernestinovo 71
5.2. Određivanje optimalnog tipa FACTS uređaja u TS Ernestinovo na 400 kV sabirnici 74
5.2.1. Stacionarno stanje 76
5.3. Određivanje parametara STATCOM – a s obzirom na dinamiku sustava 78
5.2.2. Kratki spoj u TS Ernestinovo 79
5.2.3. Ispad kritičnog voda 84
5.2.4. Kvar u 110 kV mreži 92
6. ZAKLJUČAK 98
LITERATURA 100
SAŽETAK 101
ABSTRACT 102
ŽIVOTOPIS 103
Prilog P1: Kompozitni model STATCOM – a 104

1. UVOD

Potražnja za električnom energijom u svijetu svakim danom sve više raste stoga je bitno osigurati da elektroenergetski sustav ispunjava određene zahtjeve poput neprekidne opskrbe električnom energijom sa što manjim troškovima i minimalnim utjecajem na okoliš. Osnovni zahtjev potrošača električne energije je kvalitetna, sigurna i pouzdana opskrba električne energije koju elektroenergetski sustav mora osigurati u razdobljima različitih pogonskih stanja sustava. Parametri koji su ključni za izvršavanje nabrojanih zahtjeva su regulacija napona i kompenzacija jalove snage.

U svrhu regulacije navedenih parametara koriste se razni uređaji poput FACTS (eng. Flexible Alternating Curent Transmission System) koji se implementiraju u elektroenergetski sustav. Da bi ti uređaji uspješno postali dio elektroenergetskog sustava potrebno je napraviti razne studije koje obuhvaćaju analize djelovanja uređaja u raznim pogonskim uvjetima. Ti uvjeti podrazumijevaju djelovanje u normalnom pogonu kao i djelovanje u različitim nepredviđenim situacijama poput kratkog spoja ili ispada nekog elementa mreže. Stoga je za uspješnu implementaciju FACTS uređaja i očuvanje stabilnosti sustava potrebno je izvršiti kako statičku tako i dinamičku analizu stabilnosti sustava. Izvršavanje tih analiza je veoma bitno za ispravan rad elektroenergetskog sustava.

Diplomski rad uz uvod i zaključak sadrži četiri poglavlja. U prvom poglavlju je opisan prijenos električne energije kao i regulacija napona gdje je objašnjena teorija prijenosa električne energije kao i veza između napona i jalove snage. Drugo poglavlje obuhvaća naponsku stabilnost sustava dok četvrto poglavlje opisuje različite vrste FACTS uređaja i njihov način rada. Peto poglavlje je ujedno i eksperimentalni dio rada u kojem se, nakon analize naponskih prilika u TS Ernestinovo tijekom jedne godine, implementira STATCOM u mrežu koja obuhvaća šire područje prijenosnog područja Osijek te simulacijom različitih vrsta prijelaznih pojava u mreži prikazan utjecaj STATCOM – a na očuvanje stabilnosti sustava te usporedba djelovanja različitih struktura regulatora STATCOM – a na promatrane veličine sustava.

1.1. Zadatak diplomskog rada

Odrediti optimalan tip FACTS uređaja za ugradnju u TS 400/110 kV Ernestinovo uvažavajući dio prijenosne mreže Prijenosnog područja Osijek s aspekta dinamike odnosno odziva kompenzacije u slučaju kratkog spoja u TS, ispad nadređene mreže, gubitak kritičnog voda i

kvar u 110 kV mreži s nepovoljnim utjecajem na naponske prilike u sustavu. Rezultat analize je: snaga kompenzacije (Mvar), opseg kompenzacije, minimalni zahtjevi na brzinu i opseg regulacije napona.

2. PRIJENOS ELEKTRIČNE ENERGIJE I REGULACIJA NAPONA MREŽE

Sastavni dio svakog elektroenergetskog sustava je prijenosna mreža. Osnovni zadatak prijenosne mreže je povezivanje jedinica za proizvodnju električne energije s grupom korisnika koji se nalaze na međusobno većim ili manjim udaljenostima, s ciljem prijenosa električne energije proizvedene u bilo kojoj elektrani u sustavu do svakog čvorišta mreže preko više mogućih pravaca prijenosa. Prijenosna mreža osigurava najekonomičniju i najpovoljniju kombinaciju proizvodnje električne energije u elektranama u pojedinom trenutku te napajanje pojedinih čvorišta sustava odnosno korisnika električnom energijom s dovoljnom sigurnošću ovisno o njenoj konfiguraciji.

Sigurnost prijenosa električne energije odnosno opskrba pojedinih čvorišta sustava i očuvanje stabilnosti elektroenergetskog sustava zadaća je Operatora prijenosnog sustava. Za normalan rad elektroenergetskog sustava te sigurnu i kvalitetnu opskrbu električnom energijom Operator prijenosnog sustava koristi pomoćne usluge sustava kao što su primarna i sekundarna regulacija djelatne snage i frekvencije, primarna i sekundarna regulacija napona i jalove snage, hladna i rotirajuća rezerva itd.

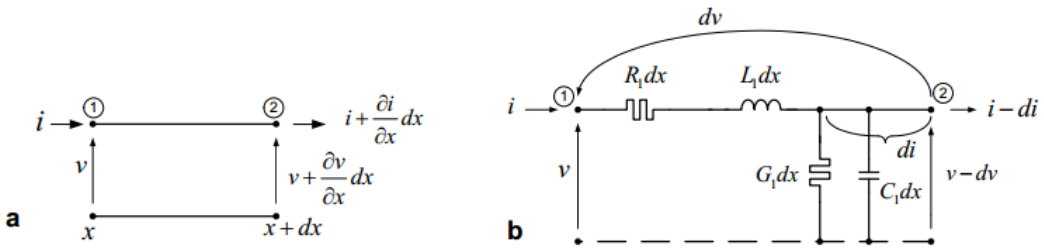
Osnovni problem prilikom prijenosa električne energije je približavanje granicama statičke stabilnosti sustava zbog velikog opterećenja sustava koje nije ispraćeno povećanjem prijenosne moći sustava. Također, prilikom malih opterećenja prijenosne mreže te ostalih prijenosnih elemenata uslijed Ferrantijevog efekta, dolazi do povišenih iznosa napona koji nastaju zbog prevladavajućih poprečnih kapaciteta dugih vodova što može dovesti do ozbiljnih oštećenja pojedinih elemenata rasklopnih postrojenja.

Da bi se osigurao maksimalni prijenos djelatne snage kroz prijenosnu mrežu, uz što manje gubitke te uz očuvanje stabilnosti sustava, potrebno je minimizirati tokove jalove snage kroz elemente mreže. Istovremeno, tokovi jalove snage kroz elemente mrežu nužni su radi održavanja mrežnog napona u dozvoljenim granicama odnosno očuvanja naponske stabilnosti sustava radi održavanja sigurnosti i kvalitete električne energije. Regulaciju napona i jalove snage osigurava Operator prijenosnog sustava, radi očuvanja stabilnosti sustava, koristeći pri tome mrežne kompenzacijske uređaje poput kondenzatorskih baterija, prigušnica, sinkronih kompenzatora i FACTS naprava ili pomoćne usluge proizvođača električne energije koji mu induktivnu ili kapacitivnu jalovu snagu isporučuju koristeći sinkrone generatore prema određenom, unaprijed dogovorenom, mehanizmu tzv. voznom redu jalove snage[1].

2.1.Teorija prijenosa električne energije

Struja i napon mijenjaju se duž voda i tijekom vremena što se može dokazati razmatrajući zbivanja na kratkom odsječku voda koji je vidljiv na slici 2.1.

Slika 2.1. Promjena struje i napona na vodu dužine *dx*



Izvor: L. Jozsa, Predavanja iz kolegija Elektroenergetske mreže, 2012./2013.

Analitičkim razmatranjem prema slici 2.1-a i fizikalnim razmatranjem prema slici 2.1-b dobivene diferencijalne jednadžbe nazivaju se telegrafske jednadžbe, dok su njihova rješenja prijenosne jednadžbe čije opće rješenje pokazuje da struja i napon u vodu nastaju superpozicijom dvaju valova koji se gibaju u suprotnim smjerovima, jednog tzv. polaznog koji putuje udesno i jednog tzv. povratnog koji putuje ulijevo. U realnom vodu ti su valovi prigušeni. Valni karakter napona i struje se vidi iz Ia i Ib oblika prijenosnih jednadžbi, dok je iz IIa i IIb oblika, koji je prikazan izrazima (2-1) i (2-2), moguće računati efektivne vrijednosti napona i struja duž voda po veličini i fazi te IIIa i IIIb oblika prijenosnih jednadžbi moguće računati samo iznosi efektivnih vrijednosti napona i struje na krajevima voda[2].

$$\bar{V}(x) = \bar{V}_1 * ch\bar{\gamma}x - \bar{I}_1 * \bar{Z}_c * sh\bar{\gamma}x$$

$$\bar{I}(x) = \bar{I}_1 * ch\bar{\gamma}x - \frac{\bar{V}_1}{\bar{Z}_c} * sh\bar{\gamma}x \qquad (2\text{-}1)$$

$$\bar{V}(x) = \bar{V}_2 * ch\bar{\gamma}x + \bar{I}_2 * \bar{Z}_c * sh\bar{\gamma}x$$

$$\bar{I}(x) = \bar{I}_2 * ch\bar{\gamma}x + \frac{\bar{V}_2}{\bar{Z}_c} * sh\bar{\gamma}x \qquad (2\text{-}2)$$

Veličina $\bar{Z}_c$ u gornjim jednadžbama predstavlja karakterističnu impedanciju ili valnu impedanciju te se određuje pomoću izraza (2-3) :

$$\bar{Z}_c = \sqrt{\frac{\bar{Z}_1}{\bar{Y}_1}} = \sqrt{\frac{R_1 + j\omega L_1}{G_1 + j\omega C_1}} \qquad (2\text{-}3)$$

Kada vodom putuje elektromagnetski val (strujni i naponski val) i nailazi na promjenu valnog otpora (to može biti korisnik, drugi vod, kabel…), dolazi do pretvorbe energije električnog polja (naponski val) u energiju magnetskog polja (strujni val) i obratno. Njihova suma u jednom i drugom vodu ostaje konstantna. Takva točka diskontinuiteta se ponaša kao izvor novog vala, kako polaznog koji tada postaje prolazni val jer prolazi u drugo sredstvo, dok povratni val postaje reflektirani val. Koliki će se dio jedne vrste energije pretvoriti u drugu ovisi o vrijednostima valnih impedancija dvaju sredstava između točke diskontinuiteta. Uz poznate iznose impedancija prvog i drugog sredstva moguće je odrediti faktor prolaza (2-4) i faktor refleksije (2-5) pomoću kojih se može odrediti amplituda upadnog odnosno povratnog vala[3].

$$p = \frac{2Z_2}{Z_1+Z_2} \tag{2-4}$$

$$r = \frac{Z_2-Z_1}{Z_1+Z_2} \tag{2-5}$$

2.1.1. Prijenos prirodne snage na idealnom vodu

Prijenos prirodne snage je najjednostavnije opisati na idealnom vodu zbog zanemarenja gubitaka. Ako se idealni vod optereti trošilom čija je impedancija jednaka valnoj impedanciji idealnog voda, dolazi se do idealnog slučaja jer nema refleksije odnosno faktor refleksije je jednak nuli. U tom idealnom slučaju prolazni val ima potpuno jednaku amplitudu kao upadni val pa je faktor prolaska 1. Tako se postiže isto stanje kao da je vod beskonačno dug. Snaga koja se prenosi u navedenom pogonskom stanju se naziva prirodna snaga voda. Električne prilike na kraju voda dane su izrazima [2]:

$$\bar{V}_2 = \bar{I}_2 * Z_v \Rightarrow \bar{I}_2 = \frac{\bar{V}_2}{\bar{Z}_v} \tag{2-6}$$

Nakon uvrštavanja izraza (2-6) u izraz (2-2) i nakon supstitucije $ch\bar{\gamma}x = cos\beta_0 x$ i $sh\bar{\gamma}x = jsin\beta_0 x$ zbog idealnog voda dobiju se prijenosne jednadžbe za idealni vod i glase:

$$\bar{V}(x) = \bar{V}_2 cos\beta_0 x + j\bar{V}_2 sin\beta_0 x = \bar{V}_2 e^{j\beta_0 x}$$

$$\overline{I}(x) = \bar{I}_2 cos\beta_0 x + j\bar{I}_2 sin\beta_0 x = I_2 e^{j\beta_0 x} \tag{2-7}$$

Kako je valna impedancija Z_v samo svojstvo voda i realnog je karaktera, struja i napon su u fazi. Efektivne vrijednosti struje i napona po duljini voda su neovisne o x jer je apsolutna

vrijednost $\left|e^{j\beta_0 x}\right| = 1$. Omjer napona i struje bilo gdje na vod pa tako i na kraju voda je jednak valnoj impedanciji voda.

$$\frac{\bar{V}(x)}{\bar{I}(x)} = \frac{\bar{V}}{\bar{I}} = Z_v = \sqrt{\frac{\omega L}{\omega C}} \tag{2-8}$$

Kada bi se izraz (2-8) napisao kao izraz (2-9) koji vrijedi pri prijenosu prirodne snage idealnim vodom:

$$\bar{V}^2 \omega C = \bar{I}^2 \omega L \tag{2-9}$$

Preko izraza (2-9) može se zaključiti da ako se idealnim vodom prenosi snaga manja od prirodne, u tom slučaju struja je manja od struje u ravnotežnom stanju pa stoga desna strana jednadžbe postaje manja od lijeve i vod se ponaša kao kondenzator. Analogno prethodnoj tvrdnji, ako je opterećenje voda veće od prirodne snage, tada je struja veća od struje u ravnotežnom stanju pa lijeva strana jednadžbe postaje manja od desne i idealni vod se ponaša kao induktivitet.

Opterećivanjem voda prirodnom snagom postižemo idealne pogonske uvijete, a neke od prednosti prijenosa prirodne snage su:

- Napon konstantan duž cijelog voda čime je najbolje iskorištena izolacija voda
- Struja konstantna duž cijelog voda čime je najbolje iskorišten vodič s obzirom na Joulove gubitke
- Napon i struja u fazi što znači da nema prijenosa jalove snage
- Nema refleksije na kraju voda čime je ostvaren najpovoljniji način prijenosa energije
- Energije električnog i magnetskog polja su jednake što znači da nema njihanja jalove energije duž voda

Prirodna snaga je djelatnog karaktera duž voda i iskazuje se izrazom:

$$P_{nat} = \bar{V}_2 * \bar{I}_2^* = \bar{V}_2 * \frac{\bar{V}_2^*}{Z_v} = \frac{V_2^2}{Z_2} \tag{2-10}$$

Za trofaznu prirodnu snagu umjesto faznog napona uzima se linijski napon. Uz poznati nazivni određeni nazivni napon voda, na iznos prirodne snage se može utjecati samo promjenom valnog otpora npr. ako se primjeni vodič u snopu čime se smanjuje induktivitet voda, a povećava kapacitet, a samim tim smanjuje se valni otpor voda što rezultira povećanjem prirodne snage.

2.1.2. Prijenos prirodne snage na realnom vodu

Kod realnog voda djelatni gubici nisu zanemareni, ali se s povećanjem presjeka smanjuju u odnosu na induktivitet voda te se može zaključiti da većina spoznaja stečenih kod idealnog voda vrijedi i za realni vod. Kao i kod idealnog voda, ako se realni vod optereti trošilom čija je impedancija jednaka valnoj impedanciji voda, vrijedi izraz (2-6) koji nakon uvrštavanja u prijenosne jednadžbe IIb (2-2) daje omjer napona i struje tj. karakterističnu impedanciju duž voda za bilo koji x koja iznosi[2]:

$$\frac{\bar{V}(x)}{\bar{I}(x)} = \bar{Z}_C = Z_C^{\angle \xi} \tag{2-11}$$

Kao i kod idealnog voda, impedancija voda ostaje ista cijelom dužinom pošto izostaje refleksija u točki diskontinuiteta. Kut između napona i struje ostaje konstantan duž voda i jednak ξ koji u praksi za duge vodove iznosi 1° - 2°.

Prividna snaga realnog voda koja se u takvim uvjetima prenosi može se izraziti izrazom:

$$\bar{S}_{nat} = \bar{S}_2 = \frac{\bar{V}_2^2}{\bar{Z}_C^*} \tag{2-12}$$

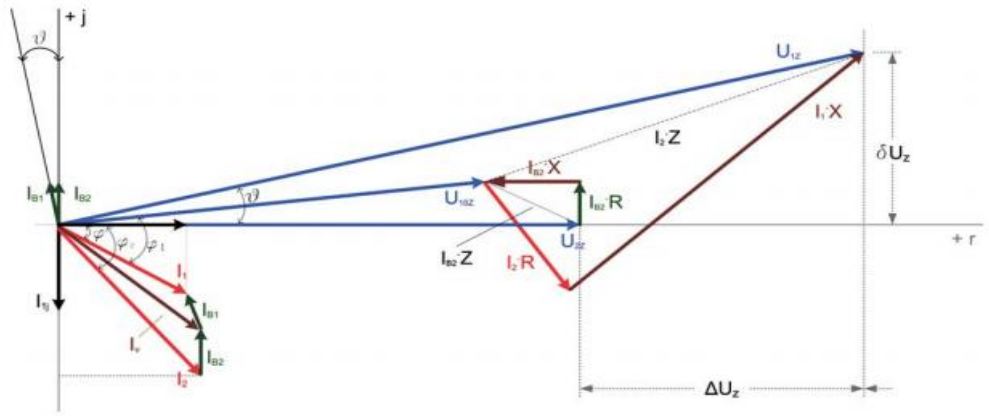
Kod trofazne prirodne snage fazni napon se zamijeni s linijskim. S obzirom na iznos ξ prirodna snaga se može smatrati djelatnom. Ipak na realnom vodu prijenos prirodne snage je u većini slučajeva samo od teoretskog značaja iz razloga što su tokovi snaga u mreži podložni velikim dnevnim i sezonskim oscilacijama pa je trajni prijenos djelatne snage iluzoran te iz razloga što nije moguće izbjeći prijenos jalove snage, dok se sredstva za mijenjanje parametara vodova, primjerice FACTS uređaji, primjenjuju radi postizanja poboljšanja statičke i tranzijentne stabilnosti, smanjenja gubitaka, poboljšanja naponskih prilika, kompenzacije jalove snage itd.

2.1.3. Nepovoljni slučajevi prijenosa snage dugim vodovima

S obzirom da je prijenos prirodne snage tek od teoretskog značaja, pomoću izraza (2-9) mogu se opisati dva nepovoljna slučaja prilikom prijenosa snage dugim vodovima. Prvi nepovoljni slučaj bi bio pojava povećanog opterećenja na vodu pri čemu dolazi do pada napona na vodu čime se smanjuje i prijenosna moć voda čime je narušena stabilnost sustava. Fazorski dijagram povećanog opterećenja voda je prikazan na slici 2.2. Drugi nepovoljni slučaj kod prijenosa snage dugim vodovima je kada je prijenosni vod veoma malo opterećen odnosno podopterećen. Tada se na vodu inducira negativni pad napona koji uzrokuju kapacitivne struje

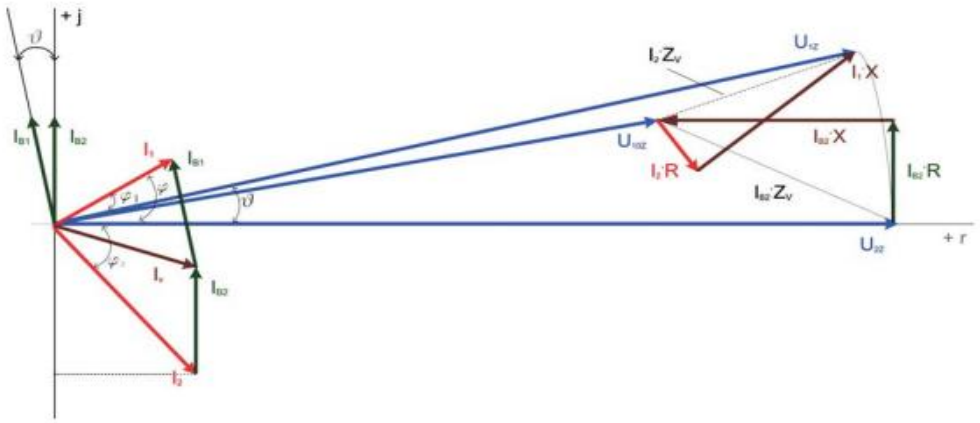
poprečnih grana voda i dolazi do povišenja napona na kraju voda. Ova pojava se naziva i Ferrantijev efekt i može dovesti do povećanog naprezanja izolacije i oštećenja vodova. Fazorski dijagram malog opterećenja dugih vodova može se vidjeti na slici 2.3.

Slika 2.2. Vektorski dijagram prijenosnog voda kod velikog opterećenja



Izvor: L. Józsa, I. Petrović, V. Angebrandt, Analiza mogućnosti korištenja serijske kompenzacije za otklanjanje neželjenih posljedica pogona dugih prijenosnih vodova, Tehnički vjesnik, Vol. 17 (2010), No 4, str. 529 - 535

Slika 2.3. Vektorski dijagram prijenosnog voda kod vrlo malog opterećenja



Izvor: L. Józsa, I. Petrović, V. Angebrandt, Analiza mogućnosti korištenja serijske kompenzacije za otklanjanje neželjenih posljedica pogona dugih prijenosnih vodova, Tehnički vjesnik, Vol. 17 (2010), No 4, str. 529 - 535

Ovakva stanja su povezana sa slučajevima kada se u mreži javlja manjak ili višak jalove snage. Pogonsko stanje prikazano na slici 2.3. s viškom jalove snage i povišenim naponom javlja se u slučaju malog opterećenja, male proizvodnje elektrana ili u novoizgrađenoj superponiranoj mreži, kojoj prijenosna moć još nije popunjena, dok se pogonsko stanje na slici 2.2 s manjkom jalove snage javlja pri velikim opterećenjima induktivnih trošila koji

zahtijevaju jalovu snagu za svoj rad. Tada postoji veliko opterećenje radnom i jalovom snagom te tada veliki tokovi snaga kroz prijenosni sustav uvjetuju velike padove napona. Iz tog razloga se u visokonaponskim mrežama problemi održavanja urednih naponskih prilika svode na tokove i regulaciju jalove snage.

Zbog česte mogućnosti nastanka ovih pojava, radi održavanja stabilnosti sustava, u prijenosni sustava se ugrađuju elementi koji imaju mogućnost regulacije napona i upravljanja tokovima jalovih snaga u elektroenergetskom sustavu poput regulacijskih transformatora s mogućnošću promjene prijenosnog omjera, statičkih kondenzatorskih baterija, poprečnih prigušnica, sinkronih kompenzatora te FACTS uređaja koji se sve više upotrebljavaju s razvojem energetske elektronike čija je najzanimljivija karakteristika upravljanje tokovima snaga, a samim time i utjecaj na iznos napona i poboljšanje iskoristivosti vodova.

2.2. Regulacija napona mreže

Nazivni napon je onaj napon za koji je određeni element mreže u širem smislu konstruiran i građen. Kod gradnje elementa mreže za određeni nazivni napon u prvom redu treba voditi računa o tome da dotični element bude jeftin, ekonomičan u pogonu, pouzdan i trajan. Nazivni napon osigurava optimalne uvijete rada elemenata mreže, aparata i pomoćnih uređaja u elektroenergetskom sustavu. Napon ne utječe samo na naprezanje izolacije, već i na ostale fizikalne veličine na kojima počiva dotični element (magnetski tok, gubici u željezu, gubici u dielektriku itd.). Prema tome. Odstupanje od nazivne vrijednosti napona istodobno znači i odstupanje od optimalnih uvjeta rada. Iz toga proizlazi da u svim točkama elektroenergetskog sustava vrijednost napona mora biti približno jednaka nazivnom naponu[4].

Trošila električne energije za svoj ispravan rad trebaju imati napon određene kvalitete. Kvaliteta napona mreže održava se uslugom namijenjenoj kvalitetnoj i sigurnoj opskrbi električnom energijom, za koju je odgovoran operator prijenosnog sustava. Veličine koje određuju kvalitetu napona su[5]:

- Odstupanje napona od nazivnih vrijednosti,
- Njihanje napona,
- Simetričnost napona
- Sinusoidalnost napona

2.2.1. Odnos napona i jalove snage

Prijenos električne energije zahtjeva pored djelatne snage i znatnu jalovu snagu. Da bi se pokazalo koji čimbenik na padove napona utječe više, a koji manje, razmatra se sljedeći slučaj[5].

Fazna snaga na kraju elementa mreže prikazanog samo pomoću uzdužne impedancije $\bar{Z} = R + jX$ definira se:

$$\bar{S}_2 = P_2 + jQ_2 = \bar{V}_2 * \bar{I}_2^* = \bar{V}_2 * \bar{I}^* \tag{2-13}$$

Napon $\bar{V}_2$ se uzima kao referentni.

Struja koja teče elementom iznosi:

$$\bar{I} = \frac{P_2 - jQ_2}{\bar{V}_2} \tag{2-14}$$

Dok će pad napona na elementu iznositi:

$$\Delta\bar{V} = \Delta V_{re} + j\Delta V_{im} = \bar{Z} * \bar{I} \tag{2-15}$$

$$\Delta V_{re} + j\Delta V_{im} = \frac{R*P_2 + X*Q_2}{V_2} + j\frac{X*P_2 - R*Q_2}{V_2} \tag{2-16}$$

Suština pada napona na impedanciji elementa će se lakše uočiti uz sljedeća zanemarenja:

$$\begin{aligned} V_1 &\approx V_2 = V \\ P_1 &\approx P_2 = P \\ Q_1 &\approx Q_2 = Q \end{aligned} \tag{2-17}$$

Relativni uzdužni pad napona iznosit će (uz mala zanemarenja može se reći da je to razlika apsolutnih vrijednosti napona):

$$\frac{\Delta V_{re}}{V} = \frac{R*P - X*Q}{V^2} \tag{2-18}$$

A relativni poprečni pad napona se može se definirati kutom fazne razlike te su i uzdužni i poprečni pad napona prikazani na slici 2.2:

$$\frac{\Delta V_{im}}{V} = \frac{X*P-R*Q}{V^2} \tag{2-19}$$

Budući da je kut između napona na početku i na kraju elementa relativno malen može se napisati:

$$\delta \approx sin\delta = \frac{\Delta V_{im}}{V} = \frac{X*P-R*Q}{V^2} \tag{2-20}$$

U visokonaponskim mrežama uzdužni radni otpori elemenata mreže su nekoliko puta manji od njihovih reaktancija, pa se izrazi (2.18) i (2.19) mogu još pojednostaviti:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta V_{re}}{V} = \frac{X*Q}{V^2}, \tag{2-21}$$

$$\delta = \frac{X*P}{V^2} \tag{2-22}$$

Iz ovog slučaja može se zaključiti da tokovi jalovih snaga utječu na padove napona, odnosno na njihove iznose, a tokovi djelatnih snaga utječu na kutove napona u mreži. Iz tog razloga se u visokonaponskim mrežama problem održavanja naponskih prilika svodi na tokove i regulaciju jalove snage.

Nakon utvrđene veze između napona i jalove snage može se zaključiti da povećanje jalove snage proizvodnje djeluje na povećanje napona, a povećanje jalove snage potrošnje na smanjenje napona te tako jalove snage u elektroenergetskom sustavu moraju biti u svakom trenutku u stanju ravnoteže, jednako kao i djelatne snage, tj. proizvedena i potrošena jalova snaga u svakom trenutku moraju biti jednake[6]. Tako je i regulacija napona i jalovih snaga u stacionarnom pogonu usmjerena na održavanje ravnoteže između proizvodnje i potrošnje jalove snage uključujući i gubitke i tokove jalove snage. Te tokove jalove snage je potrebno smanjiti na najmanju moguću mjeru iz razloga što uzrokuju djelatne gubitke te porast ili pad napona izvan dopuštenih granica. To se postiže generiranjem jalove snage neposredno u dijelu mreže gdje je ona neophodna.

Iz svega navedenog može se zaključiti da su tokovi jalove snage u sustavu nepoželjni, ali i da je jalova snaga neophodna elektroenergetskom sustavu. Neophodna je iz razloga jer služi za uspostavljanje i razgradnju izmjeničnih magnetskih i električnih polja, u vremenskom ritmu frekvencije izmjenične struje i napona. Po prirodi tih pojava, vremenski ritam uspostave i razgradnje magnetskog polja je suprotan ritmu uspostave i razgradnje električnog polja pa se

te dvije pojave međusobno usklađeno prožimaju i to pokazuje da jalova energija njiše između mjesta njezine potrošnje i mjesta njezine proizvodnje, a da pritom ne napusti elektroenergetski sustav[7]. Potreba za jalovom snagom u sustavu se javljaju zbog karakteristika trošila kao što su asinkroni motori, lučne peći itd., ali i zbog elemenata sustava poput prijenosnih vodova, kablova i energetskih transformatora. Elementi sustava kao što su vodovi i kablovi se mogu ponašati kao trošila i proizvođači jalove snage ovisno o njihovom opterećenju. Kod velikog opterećenja voda kao na slici 2.2. vod zahtjeva jalovu snagu , a kod manjih opterećenja kao na slici 2.3 prijenosni vod proizvodi jalovu snagu. Jalova snaga koja se generira vodovima može se izraziti izrazom:

$$Q_c \cong 0{,}1 \frac{U_n^2}{Z_v} \tag{2-23}$$

gdje je U_n nazivni linijski napon u kV – ima, a Z_v valna impedancija u Ω – ima, koja kod normalnih nadzemni vodova iznosi 375 Ω , a kod snopa od dva vodiča po fazi iznosi 310 Ω. S obzirom da se elektroenergetski sustav sastoji od mnogo dugih vodova koji imaju velike iznose parametara voda poput kapaciteta i induktiviteta te što generirana jalova snaga proporcionalna s kvadratom napona, iz aspekta elektroenergetskog sustava samo 110, 220, 400 kV-ne mreže predstavljaju značajne izvore jalove snage. Može se zaključiti da kada je opterećenje veće od prirodne snage vod će trošiti jalovu snagu, a u slučaju manjeg opterećenja vod će generirati jalovu snagu.

S druge strane ako prijenosnim vodom, impedancije $\bar{Z} = R + jX$ teče npr. induktivna struja $\bar{I} = I_w - jI_q$, javit će se gubici djelatne i jalove snage koji iznose:

$$P_g + jQ_g = I^2\bar{Z} = I^2R + jI^2X \tag{2-24}$$

Gubitke jalove snage I^2X će prouzrokovati ukupna struja I, tako da bi do njih došlo i u slučaju prijenosa čisto djelatne snage ($\bar{I} = I = I_w$), ali u iznosu $Q_g = I_w^2X$. Ovakvi gubici se nazivaju i uzdužni gubici jalove snage[6]. Obzirom da impedancija voda ovisi i o duljini voda, može se zaključiti da se gubici na vodu povećavaju i s većim duljinama voda.

Iz navedenoga se može zaključiti da je jalova snaga koju vod proizvodi ovisna o kvadratu napona, a da je jalova snaga koju vod troši ovisna o kvadratu struje te da će vod ovisno opterećenju tj. o iznosima Q_c i Q_g i međusobnom odnosu te dvije veličine, vod generirati ili trošiti tj. zahtijevati dodatnu jalovu snagu.

2.2.2. Mogućnosti regulacije napona i tokova jalovih snaga

Temeljni zadatak regulacije napona i jalovih snaga u stacionarnom pogonu je održavanje napona u svim čvorištima elektroenergetskog sustava kroz održavanje jednakosti između proizvodnje i potrošnje jalove snage uključujući i gubitke. Regulacija je usmjerena na proizvodnju, potrošnju i tokove jalove snage.

Regulacija napona i jalove snage u elektroenergetskom sustavu provodi se automatskim regulatorima na zasebnim jedinicama, dok se koordinacija njihovog djelovanja na razini sustava izvodi uglavnom ručno. Zahtjevi poput sigurnosti pogona, kvalitetne isporuke električne energije i ekonomičnosti, nameću uvođenje potpune automatizacije u procesu regulacije napona, proizvodnje i tokova jalovih snaga.

Jalova snaga se može jednostavno kompenzirati za slučaj sporih i predvidivih promjena u sustavu. Najvažnije je pitanje iznosa i brzine promjene potreba za jalovom snagom u sustavu. Primarnim regulatorima napona omogućeno je kompenziranje malih i slučajnih promjena napona. U slučaju pojave većih poremećaja u sustavu potrebno je koordinirano modificirati ulazne referentne vrijednosti primarnih regulatora većeg broja proizvodnih jedinica jalove snage na području pojave poremećaja. Takva regulacija se naziva sekundarna regulacija. Zbog koordinacije sekundarnih regulatora i optimizacije tokova jalovih snaga u sustavu, radi smanjenja gubitaka i ekonomičnog gospodarenja elektroenergetskim sustavom, provodi se i tercijarna regulacija napona i jalovih snaga. Primarna regulacija je lokalnog karaktera tj. na razini proizvodnih jedinica, sekundarna regulacija se provodi na dijelu mreže ili na mreži određene naponske razine dok tercijarna regulacija djeluje globalno na elektroenergetski sustav kao na cjelinu. I sekundarna i tercijarna regulacija se provode posredstvom primarne regulacije napona i tokova jalovih snaga[5].

S obzirom na spomenutu koordinaciju regulacije napona u mreži potrebno je napomenuti da se regulacija napona neke lokalne mreže može razmjerno neovisno vršiti samo do trenutka kada ta regulacija počinje negativno utjecati na napon nadređene mreže. Smanjenje napona kod visokonaponskih mreža gubi se značajan izvor jalove snage što se može vidjeti iz relacije (2-23) gdje se vidi da se proizvedena jalova snaga mijenja s kvadratom napona. U tom slučaju se zbog povećanih tokova snaga u mreži povećavaju gubici što donosi lančanu reakciju i daljnje smanjenje napona što na vrhuncu može dovesti do naponskog sloma odnosno do raspada sustava.

Kompenzacija jalove snage u mreži sadrži sljedeće efekte:

- rasterećenje vodova koji uz istu prividnu snagu mogu prenositi veću djelatnu snagu,
- smanjuju se gubici u elektroenergetskom sustavu,
- regulacija napona elektroenergetskog sustava.

Uređaji za U – Q regulaciju u elektroenergetskom sustavu su:

- sinkroni generatori,
- sinkroni kompenzatori,
- regulacijski transformatori,
- kondenzatorske baterije,
- paralelno priključene prigušnice i
- statički sustavi za kompenzaciju (temeljeni na energetskoj elektronici).

Kondenzatorske baterije i paralelno priključene prigušnice su statički izvori jalove snage te statički proizvode i troše jalovu snagu. Takvi izvori jalove snage, pri uvjetima promjene napona u čvorištu priključenja na mrežu, ne mogu upravljati izlaznom jalovom snagom. Poprečne prigušnice se koriste pri niskim opterećenjima u cilju snižavanja visokih napona, a poprečne kondenzatorske baterije se koriste pri visokim opterećenjima kao izvor induktivne jalove snage. Kondenzatorske baterije karakteriziraju niski investicijski troškovi, niski troškovi održavanja, jednostavna ugradnja i zamjena, mogućnost priključka direktno na sabirnice, visoka pouzdanost i mali gubici djelatne snage, dok im je osnovni nedostatak kvadratna ovisnost o naponu te su veoma osjetljive na paralelnu rezonanciju.

Sinkroni generatori, sinkroni kompenzatori i FACTS (eng. Flexible AC Transmission System) uređaji spadaju pod dinamičke izvore jalove snage što im omogućuje upravljanje izlaznom jalovom snagom pri uvjetima promjene napona u čvorištu priključenja. Proizvodnja jalove snage iz generatora pri stacionarnom stanju treba biti smanjena na mali iznos. Sinkrone kompenzatore karakterizira brza potrošnja i proizvodnja jalove snage, ali su im nedostaci slabija pouzdanost, visoki investicijski troškovi i veliki troškovi održavanja.

Velikim razvojem energetske elektronike se sve više u svijetu koriste FACTS uređaji. FACTS tehnologija povećava stabilnost i fleksibilnost prijenosnog sustava putem upravljanja djelatnih i jalovih snaga. Zasnovana je na elektroničkim ventilima i GTO i IGBT tiristorima. Vrijeme upravljanja je red veličine nekoliko milisekundi, a to znači da su u stanju kontinuirano

upravljati karakterističnim varijablama. FACTS uređaji ugrađuju se u postojeća postrojenja i traže manje prostora u usporedbi s izgradnjom novog voda. FACTS uređaji se sastoje od nekoliko izvedbi: serijski, poprečni i kombinirano serijsko poprečni uređaji. Poprečni FACTS uređaji reguliraju iznos napona putem kontroliranog injektiranja jalove snage. Serijski FACTS uređaji reguliraju serijske tokove snaga pomoću injektiranog izvora napona u serijskom spoju s vodom. Kombinirana izvedba FACTS uređaja istodobno regulira iznos napona i tokove djelatne i jalove snage kroz spojni vod[5].

Prednosti FACTS tehnologije:

- upravljanje tokovima snage
- povećanje opteretivosti voda do termičkih i dielektričnih ograničenja
- povećanje sigurnosti sustava kroz podizanje granice prijelazne stabilnosti,
- ograničavanje struja kratkog spoja i preopterećenja
- nadogradnja mreže
- pojačavanje postojećih vodova
- smanjenje tokova jalove snage čime se omogućava prijenos većeg iznosa snage

2.2.3. Nazivni naponi u EES-u i dozvoljena odstupanja

Elektroenergetski sustav se sastoji od visokonaponskih mreža različitih naponskih razina, a koji su međusobno povezani energetskim transformatorima. Iznosi nazivnih napona tih mreža su različiti, a zbog padova napona u mreži, iznosi napona iste naponske razine nisu jednaki u svim čvorištima. Elektroenergetski sustav treba biti izveden tako da se napon u svim pogonskim uvjetima može održavati unutar dozvoljenih granica. U prijenosnoj mreži hrvatskog elektroenergetskog sustava koriste se normirani nazivni naponi prema HRN IEC 60038:1998 »IEC normirani naponi«. U sljedećoj tablici dani su normirani naponi veći od 1 kV[14]

Tablica 2.1. Normirani naponi veći od 1 kV:

Nazivni napon mreže (kV)	$3^{(1)}$	$6^{(1)}$	10	20	$35(30)^{(3)}$	110	220	$(400)^{(2)}$
Najviši napon opreme (kV)	$3{,}6^{(1)}$	$7{,}2^{(1)}$	12	24	38	123	245	420

Napomene:

(1) Nije dopušteno korištenje u javnoj distribucijskoj mreži. Može se koristiti kao generatorski napon te u industrijskim i rudarskim pogonima.
(2) Nije normiran jer je za mreže s naponom višim od 220 kV standardiziran samo najviši napon opreme.
(3) Iako nije normiran, još uvijek je u korištenju, u nekim dijelovima mreže.

U normalnim pogonskim uvjetima iznos napona održava se u sljedećim granicama:

- U mreži 400 kV: 400 – 10% + 5% = 360 – 420 kV,
- U mreži 220 kV: 220 ± 10% = 198 – 242 kV,
- U mreži 110 kV: 110 ± 10% = 99 – 121 kV.

U poremećenom pogonu, iznosi napona mogu biti u sljedećim granicama:

- U mreži 400 kV: 400 ± 15% = 340 – 460 kV,
- U mreži 220 kV: 220 ± 15% = 187 – 253 kV,
- U mreži 110 kV: 110 ± 15% = 94 – 127 kV.

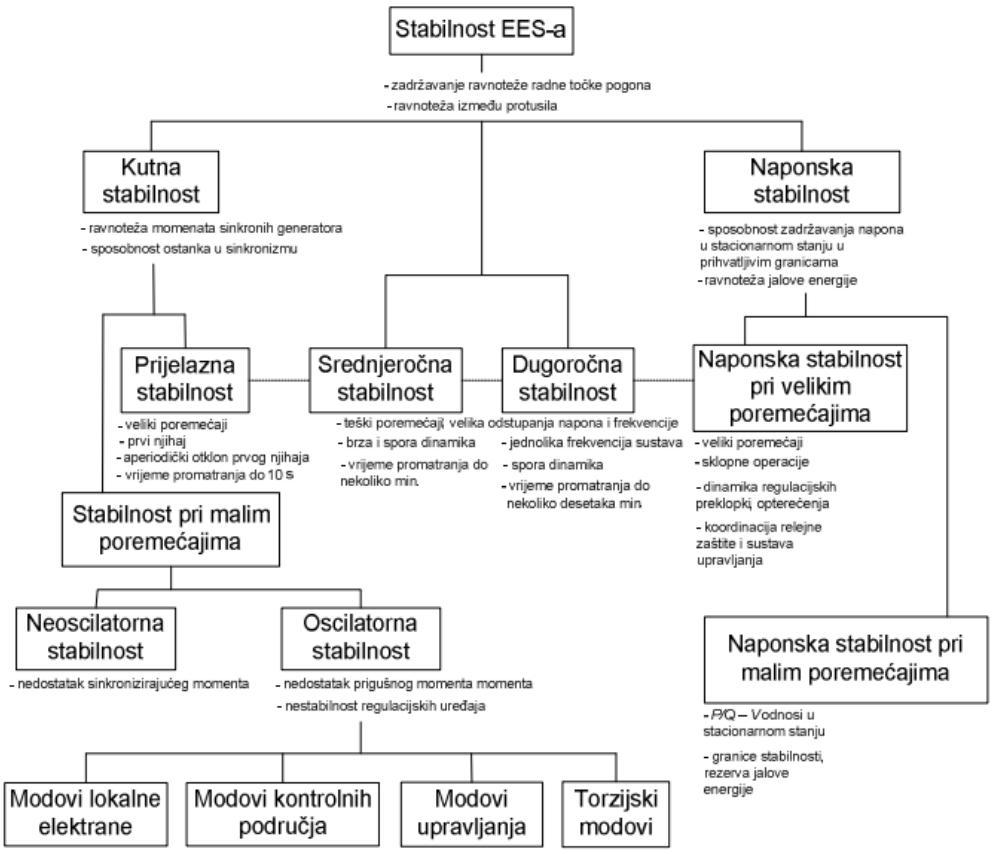
Maksimalni pogonski napon je određen izolacijskim karakteristikama mreže. Previsoki naponi dovode do uništavanja izolacije i smanjuju njenu životnu dob i tako povećavaju vjerojatnost kratkih spojeva prouzrokovanim probojem ili preskokom izolacije. Minimalni pogonski napon ograničen je zbog regulacijskog opsega transformatora prema distribucijskoj mreži i iz ekonomskih razloga u pogledu gubitaka u mreži što je vidljivo iz relacije (2-21). da gubici rastu s manjim naponom.

Zaključno s ovim poglavljem mogu se izvesti zaključci da je regulacija jalove snage temeljno sredstvo smanjivanja gubitaka u prijenosu, povećanja sigurnosti i pouzdanosti te sprječavanja naponskih poremećaja u elektroenergetskom sustavu. Da bi se to ostvarilo nužno je da uređaji za regulaciju napona i jalove snage, poput FACTS uređaja, zadovoljavaju postavljene zahtjeve u svezi opsega regulacije, veličine, brzine odziva, lokacije s obzirom na karakteristike sustava i konzuma .

3. NAPONSKA STABILNOST SUSTAVA

Definicija stabilnosti se može definirati na sljedeći način: Stabilnost je, odnoseći se na elektroenergetski sustav, svojstvo sustava ili jednog njegovog dijela koje ga čini sposobnim razviti među svojim elementima povratne sile veće ili jednake silama poremećaja uspostavljajući ponovno stanje ravnoteže među elementima [9]. Stabilnost se dijeli na kutnu i naponsku stabilnost, a na slici 3.1 prikazana je klasifikacija stabilnosti Elektroenergetskog sustava.

Slika 3.1: Klasifikacija stabilnosti sustava EES-a



Izvor: S. Ćurlin, Naponska stabilnost elektroenergetskog sustava, HEP – OPS d.o.o., Zagreb, Hrvatska, 2003.

Pojam naponske stabilnosti se može definirati kao sposobnost elektroenergetskog sustava da održi prihvatljive vrijednosti napona u svim čvorištima sustava, kako u normalnom pogonu tako i nakon nastanka poremećaja. Glavni uzrok naponske nestabilnosti je nemogućnost elektroenergetskog sustava da isporuči potrebne količine jalove energije što uzrokuje propadanje napona, a naposljetku i slom napona.

S obzirom na dinamički odziv sustava na veće poremećaje uvode se pojmovi prijelazne, srednjoročne i dugoročne stabilnosti sustava. Ozbiljniji i veći poremećaji uzrokuju fluktuacije frekvencije, napona i tokova snaga što za posljedicu ima djelovanje raznih procesa, regulacijskih mehanizama i zaštita koji nisu modelirani u klasičnim modelima analize prijelazne stabilnosti. Tako se kod prijelazne stabilnosti u obzir uzimaju elementi elektroenergetskog sustava s vrlo brzim odzivom na promjenu napona, dok dugotrajna stabilnost uključuje modeliranje elemenata elektroenergetskog sustava sa sporim odzivom na promjene napona poput dinamike kotlova turbogeneratora, zasićenje transformatora itd. Srednjoročna stabilnost je smještena između prijelazne i dugoročne stabilnosti te uključuje pojave poput djelovanja regulacijskih preklopki transformatora, FACTS uređaja itd.

Uobičajeni vremenski periodi za nabrojane pojave iznose:

- Prijelazna stabilnost: 0 – 10 sekundi
- Srednjoročna stabilnost: 10 sekundi do nekoliko minuta
- Dugoročna stabilnost: nekoliko minuta do desetak minuta

U ovisnosti o intenzitetu poremećaja, naponska stabilnost se dijeli na:

- Stabilnost pri malim poremećajima
- Stabilnost pri velikim poremećajima

Naponska stabilnost pri velikim poremećajima je mogućnost održavanja napona u propisanim granicama nakon što je sustav izložen poremećajima kao što su ispad proizvodne jedinice, opterećenja ili visoko opterećenog dalekovoda. Dinamika naponske stabilnosti pri velikim poremećajima uključuje promatranje elemenata kao što su regulacijska preklopka transformatora ili limiter struje uzbude generatora. Ova pojava se proučava pravilnim modeliranjem elemenata mreže, a simulira se u nelinearnoj vremensko – frekvencijskoj domeni te se koristi dinamička analiza. Može se još dodatno podijeliti na prijelaznu i dugoročnu.

Naponska stabilnost pri malim poremećajima odnosi se na sposobnost sustava da održi napone u propisanim granicama pri malim poremećajima u sustavu poput kontinuiranog poremećaja sustava. Stabilnost pri malim poremećajima određena je karakteristikama trošila i djelovanjem raznih uređaja za upravljanje u jednom zadanom trenutku. Osnovne pojave koje doprinose nestabilnosti pri malim poremećajima su u suštini stacionarnog karaktera, stoga se

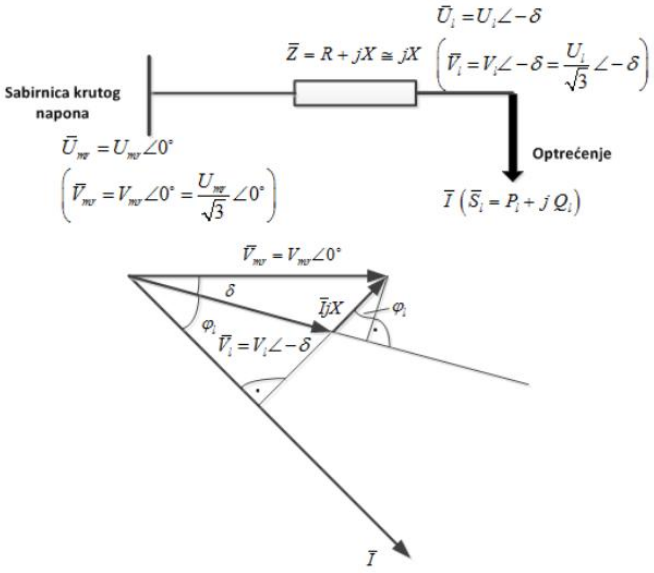
ova problematika može promatrati sa stacionarnog stajališta na način da se u radnoj točki linearizira dinamičke jednadžbe sustava.

Naponska nestabilnost je u osnovi lokalni problem, ali se može inicirati niz događaja koji dovode do progresivnog i nekontroliranog sniženja napona u znatnom dijelu sistema pri čemu se napon snižava ispod prihvatljivih vrijednosti. Ova pojava se naziva naponski slom ili naponski kolaps. U slučaju naponskog sloma operatori sustava gube kontrolu nad tokovima snaga i vrijednostima napona u pojedinim dijelovima ili cijelom sustavu.

3.1. Teoretska razmatranja naponske stabilnosti

Na slici 3.2 prikazan je jednostavni sustav prijenosa te fazorski dijagram prikazanog sustava gdje se opterećenje opskrbljuje iz krute mreže preko dalekovoda.

Slika 3.2: Jednostavni prijenosni sustav i pripadajući fazorski dijagram



Izvor: L. Jozsa, Predavanja iz kolegija Analiza elektroenergetskog sustava, 2013./2014.

Uz pretpostavku da ne postoje djelatni gubici, tj. da je djelatni otpor R = 0, tada se za sustav prema gornjoj slici mogu napisati jednadžbe jalovog i djelatnog opterećenja:

$$Q_l = \frac{V_l V_{mr} cos\delta - V_l^2}{X} \tag{3-1}$$

$$P_l = \frac{V_l V_{mr}}{X} sin\delta \tag{3-2}$$

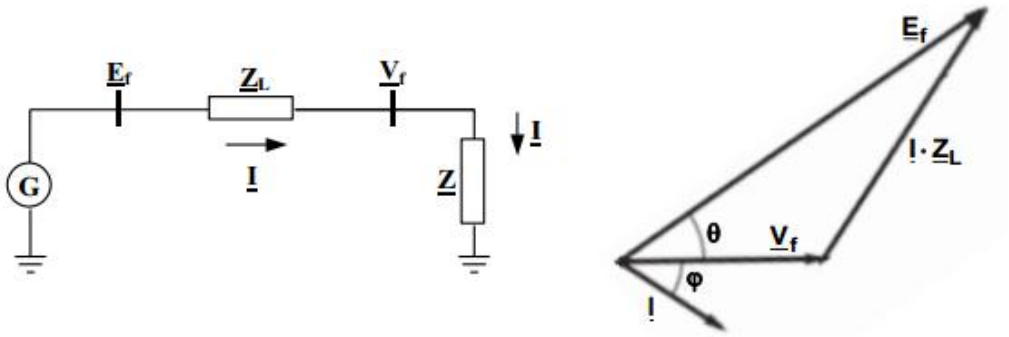
Kut δ nije značajan za analizu naponske stabilnosti te se može eliminirat identitetom $sin^2\delta + cos^2\delta = 1$ pa se tako kvadriranjem i zbrajanjem prikazanih jednadžbi dobije:

$$\left(\frac{V_l V_{mr}}{X}\right)^2 = P_l^2 + \left(Q_l + \frac{V_l V_{mr}}{X}\right)^2 \tag{3-3}$$

Pomoću dobivene jednadžbe se mogu odrediti sve moguće radne točke sustava u statičkom stanju za poznate snage opterećenja, a o čemu će se malo više reći u daljnjem tekstu. Sabirnica krutog napona iznosa V_{mr} može se zamijeniti s ekvivalentnim generatorom čiji ekvivalentni napon iznosi E.

Nadalje za određivanje karakteristika koje su interesantne za analizu naponske stabilnosti mogu se odrediti koristeći sliku 3.3:

Slika: 3.3: Pojednostavljeni prijenosni sustav s pripadajućim fazorskim dijagramom



Izvor: S. Smaka, Predavanja iz kolegija Elektroenergetski sistemi 2, Predavanje IV, 2014/2015.

Kompleksna struja opterećenja i njezin modul iznose:

$$\bar{I} = \frac{\bar{E}_f}{\bar{Z}+\bar{Z}_L} \tag{3-4}$$

$$I = \frac{E_f}{\sqrt{(Z_L cos\beta + Z cos\varphi)^2 + (Z_L sin\beta + Z sin\varphi)^2}} = \frac{I_{ks}}{\sqrt{\left(1+\left(\frac{Z}{Z_L}\right)^2 + 2\left(\frac{Z}{Z_L}\right)\cos(\beta-\varphi)\right)^2}} \tag{3-5}$$

Gdje je I_{ks} struja tropolnog kratkog spoja na krajevima potrošača i računa se preko relacije:

$$I_{ks} = \frac{E_f}{Z_L} \tag{3-6}$$

Iz relacije (3-5) β predstavlja fazni kut impedancije voda dok φ predstavlja fazni kut impedancije opterećenja.

Modul faznog napona na prijemnom kraju iznosi:

$$V_f = I * Z = \frac{Z}{Z_L} * \frac{E_f}{\sqrt{1+\left(\frac{Z}{Z_L}\right)^2+2\left(\frac{Z}{Z_L}\right)\cos(\beta-\varphi)}} = \frac{ZI_{ks}}{\sqrt{1+\left(\frac{Z}{Z_L}\right)^2+2\left(\frac{Z}{Z_L}\right)\cos(\beta-\varphi)}} \quad (3\text{-}7)$$

Pomoću relacija (3-5) i (3-7) može se izračunati radna i jalova snaga na kraju voda tj. snaga potrošača te iznosi:

$$P = 3V_f I\cos\varphi = \frac{3E_f^2}{Z_L\left[1+\left(\frac{Z}{Z_L}\right)^2+2\left(\frac{Z}{Z_L}\right)\cos(\beta-\varphi)\right]}\frac{Z}{Z_L}\cos\varphi = \frac{3ZI_{ks}^2\cos\varphi}{\left[1+\left(\frac{Z}{Z_L}\right)^2+2\left(\frac{Z}{Z_L}\right)\cos(\beta-\varphi)\right]} \quad (3\text{-}8)$$

$$Q = 3V_f I\sin\varphi = \frac{3E_f^2}{Z_L\left[1+\left(\frac{Z}{Z_L}\right)^2+2\left(\frac{Z}{Z_L}\right)\cos(\beta-\varphi)\right]}\frac{Z}{Z_L}\sin\varphi = \frac{3ZI_{ks}^2\sin\varphi}{\left[1+\left(\frac{Z}{Z_L}\right)^2+2\left(\frac{Z}{Z_L}\right)\cos(\beta-\varphi)\right]} \quad (3\text{-}9)$$

Iz navedenih relacija može se zaključiti da faktor snage trošila kao parametar sustava ima značajan utjecaj na performanse prijenosnog sustava. Povećanjem faktora snage trošila povećava se kapacitet prijenosa aktivne snage putem voda te se smanjuje tok jalove snage istim vodom.

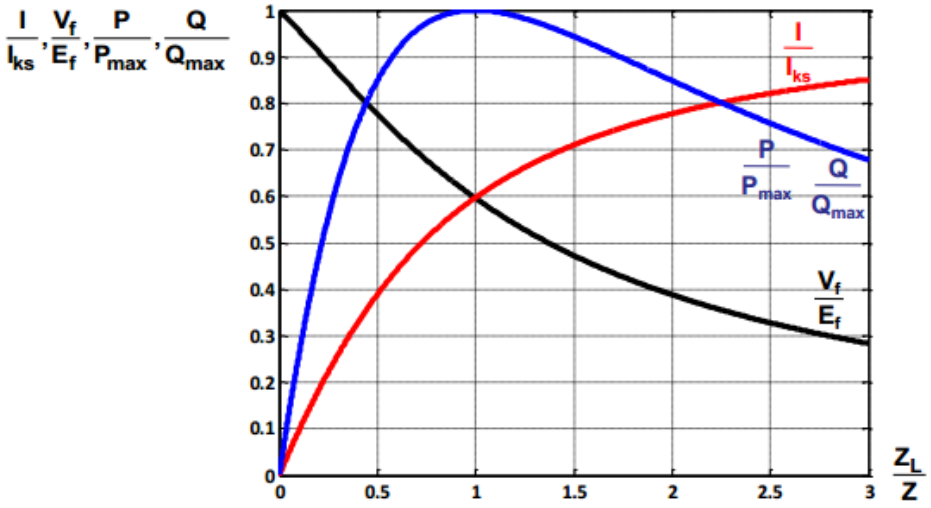
Još jedan parametar sustava poput kuta impedancije voda nema značajan utjecaj na naponsku stabilnost sustava. Za realne visokonaponske vodove može se pretpostaviti da je reaktancija voda veća od radnog otpora za otprilike 10 puta čime kut impedancije iznosi približno 84° što je veoma blizu iznosu od 90° što se može vidjeti i u relacijama (3-8) i (3-9)

Dijagrami relativnih vrijednosti struje (I/I_{ks}), napona (V_f/E_f), aktivne (P/P_{max}) i reaktivne snage (Q/Q_{max}) na prijemnom kraju voda u funkciji odnosa modula impedancija (Z_L/Z), za slučaj kada je $tg\beta = 10$ i $\cos\varphi = 0.95$ prikazani su na slici 3.4.

Prilikom povećanja opterećenja sustava, tj. prilikom priključenja novih trošila, smanjuje se impedancija opterećenja Z što znači da raste admitancija opterećenja Y. Obzirom da je Z_L = konst., povećanjem opterećena raste vrijednost odnosa na apscisi sa slike 3.4. Prilikom povećanja opterećenja sistema dolazi do brzog rasta isporučene djelatne snage P. Sa slike 3.4 može se vidjeti da je strmina porasta struje I veća od strmine sniženja napona V_f, stoga snaga

raste razmjerno struji. Približavanjem maksimalne vrijednosti snage rast se smanjuje, a nakon dostizanja maksimuma za vrijednosti opterećenja $Z_L/Z > 1$ dolazi do smanjenja isporučene aktivne snage. Razlog smanjenju isporučene aktivne snage je pad napona na impedanciji mreže Z_L uzrokovan velikom strujom opterećenja što se može vidjeti i na slici 3.4.

Slika 3.4: Dijagrami relativnih vrijednosti struje (I/I_{ks}), napona (V_f/E_f), aktivne (P/P_{max}) i reaktivne snage (Q/Q_{max}) na prijemnom kraju voda



Izvor: S. Smaka, Predavanja iz kolegija Elektroenergetski sistemi 2, Predavanje IV, 2014/2015.

Vrijednost impedancije opterećenja za maksimalnu snagu prijenosa dobiva se deriviranjem relacije (3-8) po impedanciji opterećenja te izjednačavajući istu relaciju s nulom:

$$\frac{\delta P}{\delta Z} = \frac{3I_{ks}^2 cos\varphi (Z_L - Z)^2}{Z_L^2\left[1+\left(\frac{Z}{Z_L}\right)^2+2\left(\frac{Z}{Z_L}\right)\cos(\beta-\varphi)\right]^2} = 0 \qquad (3\text{-}10)$$

Daljnjim sređivanje relacije (3-10) dobije se optimalna impedancija opterećenja pri kojoj je maksimalna aktivna snaga prijenosa te iznosi $Z_{opt} = Z_L$. To se može i potvrditi ako se dobivene impedancije uvrste u relacije (2-4) i (2-5) gdje se može vidjeti da je faktor refleksije putnih valova na vodu jednak nuli dok je faktor prolaska vala jednak jedinici čime se potvrđuje da nema smanjenja amplitude prolaznog vala.

Za izračunavanje maksimalnih vrijednosti aktivne i reaktivne snage prijenosa potrebne su vrijednosti kritičnih iznosa napona i struje, koje odgovaraju maksimalnom iznosu snage prijenosa, a dobiju se ako se u izraze (3-5) i (3-7) uvrsti $Z/Z_L = Z_{opt}/Z_L = 1$:

$$V_{crit} = \frac{E_f}{\sqrt{2[1+\cos(\beta-\varphi)]}} = \frac{E_f}{2cos\frac{\beta-\varphi}{2}} \tag{3-11}$$

$$I_{crit} = \frac{I_{ks}}{\sqrt{2[1+\cos(\beta-\varphi)]}} = \frac{I_{ks}}{2cos\frac{\beta-\varphi}{2}} \tag{3-12}$$

Koristeći izraze (3-11) i (3-12) mogu se odrediti maksimalne vrijednosti aktivne i reaktivne snage prijenosa i iznose:

$$P_{max} = 3V_{crit}I_{crit}cos\varphi = \frac{3E_f^2}{Z_L}\frac{cos\varphi}{2[1+\cos(\beta-\varphi)]} = \frac{3E_f^2}{Z_L}\frac{cos\varphi}{4cos^2\left(\frac{\beta-\varphi}{2}\right)} \tag{3-13}$$

$$Q_{max} = 3V_{crit}I_{crit}sin\varphi = \frac{3E_f^2}{Z_L}\frac{sin\varphi}{2[1+\cos(\beta-\varphi)]} = \frac{3E_f^2}{Z_L}\frac{sin\varphi}{4cos^2\left(\frac{\beta-\varphi}{2}\right)} \tag{3-14}$$

Nakon određivanja (3-13) i (3-14) dolazi se do zaključka da je područje lijevo od točke P_{max}, na slici 3.4, odgovara normalnom stabilnom pogonu, a područje desno od te točke predstavlja područje u kojemu je pogon nestabilan. To znači da ako su zahtjevi opterećenja veći od maksimalno moguće snage prijenosa, kontrola snage promjenom opterećenja će biti nestabilna jer će pri povećanju opterećenja (povećanje admitancije, odnosno smanjenje impedancije) dolaziti do smanjenja snage. U tom području može doći do progresivnog opadanja napona i konačno do naponskog sloma što je vidljivo i na slici 3.4. Te konstatacije dovode do admitantnog kriterija naponske stabilnosti koji definira da je sustav naponski stabilna ako povećanje admitancije trošila rezultira povećanjem snage opterećenja potrošačkog čvorišta i obrnuto [10].

Iz jednadžbi (3-8) i (3-13) jasno se vidi da se snaga prijenosa i njena maksimalna vrijednost mogu povećati povišenjem napona izvora E_f i/ili smanjenjem faznog kuta φ impedancije trošila odnosno poboljšanjem faktora snage opterećenja.

3.1.1. Statičke karakteristike prijenosnog sustava

Metoda analize naponske stabilnosti sastoji se u crtanju statičkih karakteristika prijenosa i određivati će se za sustav prema slici 3.3. Statičke karakteristike opisane su slijedećim relacijama:

$$p = \frac{X_L P}{E^2} \qquad q = \frac{X_L Q}{E^2} \qquad v = \frac{V}{E} \tag{3-15}$$

- **P – Q statičke karakteristike**

Jednadžba statičke prijenosne karakteristike P – Q dobije se pomoću relacije (3-3):

$$P^2 = \frac{V^2E^2}{X_L^2} - \left(\frac{V^2}{X_L} + Q\right)^2 \tag{3-16}$$

Koristeći relacije (3-15) jednadžba prijenosne karakteristike (3-16) može se izraziti kao:

$$p^2 = v^2 - (v^2 + q)^2 \tag{3-17}$$

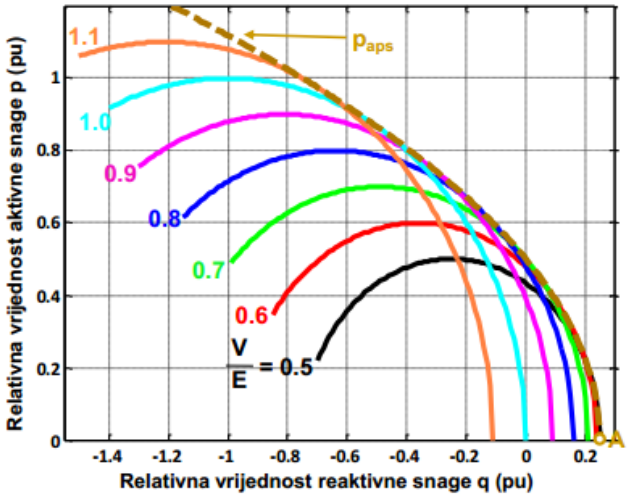
Envelopa p – q karakteristike koja daje geometrijsko mjesto apsolutne maksimalne snage prijenosa razmatranog sustava dobiva se na način:

$$\frac{dp}{dv} = 0 \tag{3-18}$$

Nakon dobivenog rješenja i uvrštenja istog u relaciju (3-17) dobije se relacija koja opisuje geometrijsko mjesto točaka koje daju apsolutne maksimalne vrijednosti aktivne snage prijenosa p u funkciji relativne vrijednosti snage q:

$$p_{aps}^2 = \frac{1}{4} - q^2 \tag{3-19}$$

Slika 3.5: P – Q statičke karakteristike prijenosnog sustava



Izvor: S. Smaka, Predavanja iz kolegija Elektroenergetski sistemi 2, Predavanje IV, 2014/2015.

Slika (3-5) pokazuje da je potrebno izvršiti kompenzaciju jalove snage prilikom većih prijenosa aktivne snage za uobičajene odnose napona V i E.

Svakoj radnoj točki unutar parabole odgovaraju dvije moguće vrijednosti napona na sabirnicama trošila. Točki koja leži na samoj envelopi odgovara samo jedna vrijednost napona. Izvan envelope ne postoje radne točke.

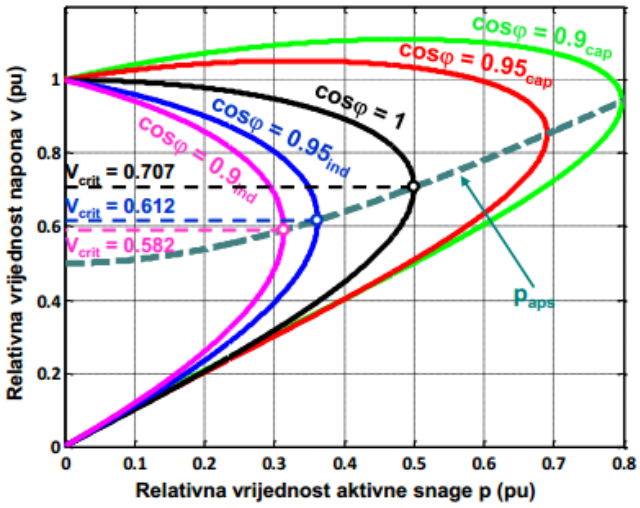
- **P – V statičke karakteristike**

P – V krivulje pokazuju ovisnost napona o injektiranoj radnoj snazi u promatrano čvorište. I za ovu statičku karakteristiku vrijede relacije (3-16 – 3-18). Jednadžba geometrijskog mjesta točaka apsolutnih maksimuma prijenosnih snaga iznosi:

$$p_{aps}^2 = v^2 - \frac{1}{4} \tag{3-20}$$

Geometrijsko mjesto ovih kritičnih radnih točaka prikazano je na slici 3.6 isprekidanom linijom.

Slika 3.6: P – V statičke karakteristike prijenosnog sustava s različitim faktorom snage



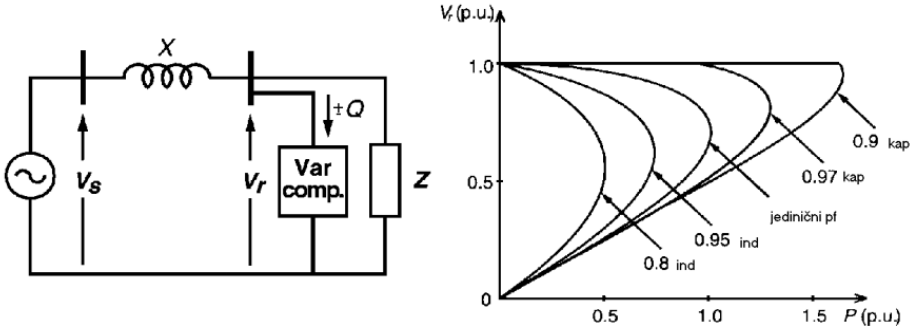
Izvor: S. Smaka, Predavanja iz kolegija Elektroenergetski sistemi 2, Predavanje IV, 2014/2015.

Iz krivulje se primjećuje nelinearan odnos dvaju promatranih veličina. S obzirom da je elektroenergetski sustav radno – induktivnog ili radnog karaktera, primjećuje se da se za takve karaktere opterećenja pri injektiranju snage na sabirnicu potrošača, napon sabirnice opada. Točka kojoj odgovara kritični prijenos snage naziva se koljeno P – V krivulje. Na slici 3.6

može se vidjeti da za cosφ = 1 prijenos aktivne snage na koljenu krivulje iznosi 0.5 p.u. dok vrijednost napona iznosi oko 70 %. Kada bi na promatranoj sabirnici opterećenje naraslo iznad 0.5 p.u. došlo bi do pada prijenosa snage i naglog pada napona što dovodi no nestabilnosti sustava i mogućnosti pojave naponskog sloma. Prilikom velikog opterećenja javljaju se velike struje a posljedica toga su i veliki gubici koji su proporcionalni kvadratu struje i stvaraju velike padove napona.

Jedno od rješenja koje se implementira u prijenosni sustav je ugradnja kompenzacijskih uređaja poput kondenzatorskih baterija koje predstavljaju jeftin izvor reaktivne snage. Sa slike 3.6 može se vidjeti da priključenjem sve više kondenzatorskih baterija koljeno P – V krivulje pomiče u desnu stranu i prema gore. Može se zaključiti da se povećavaju napon i maksimalna snaga prijenosa. Takva situacija može biti neugodna iz razloga jer se maksimalna vrijednost snage prijenosa postiže pri naponima koji se malo razlikuju u odnosu na nazivnu vrijednost. Ta negativna posljedica dodavanja velikog broja kondenzatorskih baterija naziva se maskiranje koljena V – P karakteristike i njome nestaje najvažniji pokazatelj naponske nestabilnosti, a to je nagli pad napona. Isto tako na slici 3.6 se može primijetiti da na obje karakteristike kojima je opterećenje u kapacitivnom području postoji dio karakteristike u kojemu napon raste s povećanjem opterećenja na iznose većih od nazivnih. Taj problem se može riješiti ugradnjom poprečnog FACTS kompenzacijskog uređaja s mogućnošću regulacije napona koji će održavati napon na potrošačkoj sabirnici na iznosu od 1 p.u. što se može vidjeti na slici 3.7

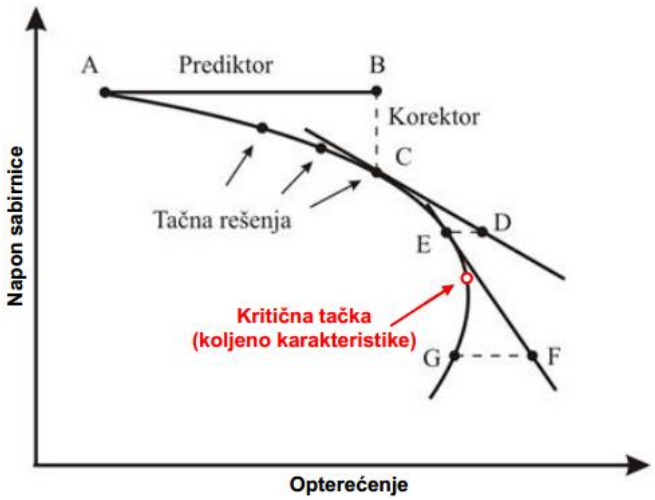
Slika 3.7: Utjecaj poprečne kompenzacije na stabilnost napona s regulacijom napona u čvorištu



Izvor: N. Dizdarević, Mogućnost povećanja prijenosne moći EES –a korištenjem konvencionalnih i FACTS naprava, Energija, Vol 50 (2001), No 5, str. 323-348

Analiza naponske stabilnosti uslijed sporog porasta opterećenja temelji se na proračunu tokova snaga, a za proračun se najčešće koristi Newton – Raphsonova metoda za riješavanje nelinearnih jednadžbi. Problem kod proračuna tokova snaga je što Jacobijeva matrica u točki koljena P – V krivulje postaje singularna odnosno rješenje divergira. To uzrokuje poteškoće pri određivanju naponske stabilnosti, a tehnika kojom se rješava spomenuti problem naziva se metoda kontinuiranih tokova snaga i napona [9]. Prikaz metode dan je na slici 3.8:

Slika 3.8: Metoda proračuna kontinuiranih tokova snaga



Izvor: S. Smaka, Predavanja iz kolegija Elektroenergetski sistemi 2, Predavanje IV, 2014/2015.

Polazi se od poznatog stanja koje je na slici označeno sa slovom A. Zatim se za željenu promjenu opterećenja prognozira sljedeće stanje, koje je na slici označeno sa slovom B, na način da se povuče tangenta na krivulju u točki A. To je faza predikcije, a $\overline{AB}$ se naziva prediktor. Ova procjena se korigira korištenjem Newton – Raphsonove metode. Ta faza se naziva fazom korekcije s kojom se dobiva točno rješenje koje je na slici označeno točkom C. $\overline{BC}$ se naziva korektor. Korekcija se dobije uz fiksiranje jedne varijable što je u ovom slučaju promjena opterećenja, ali isto tako može biti i napon sabirnice. Naponi za daljnja opterećenja pretpostavljaju se na temelju novog tangentnog prediktora. Ako je novo opterećenje (točka D) veće od maksimalnog opterećenja pri točnom rješenju, korektorski korak pri fiksiranim opterećenjima neće konvergirati. Tada se koristi korektorski korak s fiksiranim naponom na promatranoj sabirnici za određivanje točnog rješenja (točka E). Ovaj postupak se naziva lokalna parametrizacija, a to znači da se u fazi korekcije fiksiraju različite varijable za različite točke na karakteristici. Postupak se ponavlja za željeni opseg točaka na karakteristici. Divergiranje rješenja u proračunu tokova snaga koje se javlja kod koljena karakteristike može

se koristiti kao indikator naponske nestabilnosti. Rad na granici stabilnosti ili blizu nje je neprihvatljiv u praktičnim situacijama i zadovoljavajući radni uvjeti se osiguravaju preko postojanja dovoljnih granica snage. Rezerva do naponske nestabilnosti obično se izražava kao razlika snage između maksimuma promatrane P – V karakteristike i trenutne radne točke.

- **Q – V statičke karakteristike**

Q – V krivulje se razvijaju za sabirnice koje se smatraju kritičnim odnosno najpodložnijim naponskoj nestabilnosti pa čak i naponskom slomu. Ove karakteristike pokazuju reaktivnu osjetljivost, odnosno ovisnost promjene reaktivne snage od varijacija napona na promatranim sabirnicama. Svaka Q – V krivulja prikazuje koliko je dodatne reaktivne snage potrebno injektirati u sabirnicu kako bi se napon te sabirnice održao u propisanim granicama pri konstantnoj injekciji aktivne snage.

Jednadžba statičke prijenosne karakteristike Q - V dobije e pomoću relacije (3-3):

$$Q = \frac{V^2}{X_L} - \sqrt{\frac{V^2 E^2}{X_L^2} - P^2} \tag{3-21}$$

Koristeći relacije (3-15) jednadžba prijenosne karakteristike (3-21) može se izraziti kao:

$$q = v^2 + \sqrt{v^2 - p^2} \tag{3-22}$$

Geometrijsko mjesto točaka apsolutnog minimuma q – v krivulja za razmatrani sistem dobije se iz uvjeta:

$$\frac{dq}{dv} = 0 \tag{3-23}$$

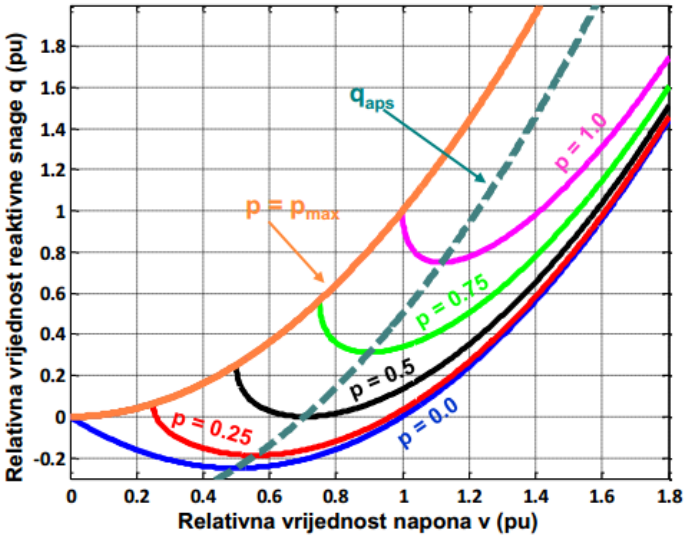
Iz tog uvjeta se dobije relacija:

$$q_{aps} = v^2 - \frac{1}{2} \tag{3-24}$$

Sve q – v karakteristike leže u oblasti između graničnih krivulja s lijeve i desne strane. Granična krivulja s s desne strane je plava q – v krivulja dobivena za p = 0, a granična krivulja s lijeve strane određena je uvjetom $p = p_{max}$. Dno q – v karakteristike definira granicu stabilnosti. Sve točke koje se nalaze desno od minimuma povećanje reaktivne snage rezultira povećanjem napona na sabirnicama što znači stabilan rad. U točkama lijevo od točke

minimuma q - v karakteristike pri povećanju reaktivne snage dolazi do sniženja napona što znači nestabilan rad. Slika Q- V krivulja prikazana je na slici 3.9:

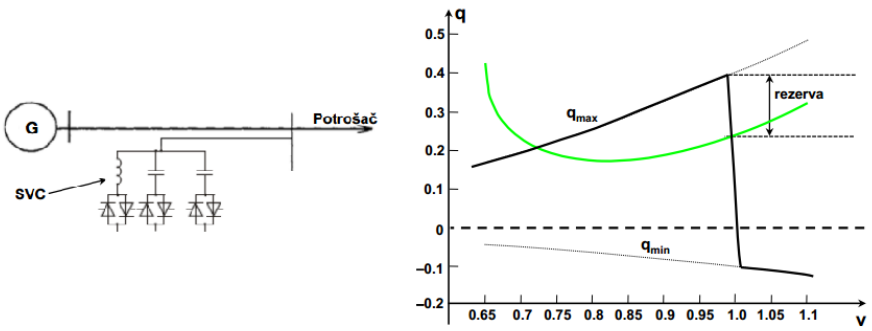
Slika 3.9: Q – V statičke karakteristike prijenosnog sustava



Izvor: S. Smaka, Predavanja iz kolegija Elektroenergetski sistemi 2, Predavanje IV, 2014/2015.

Rezerva reaktivne snage, koja označava blizinu naponske nestabilnosti, izražava se preko razlike reaktivne snage u radnoj točki sustava i minimuma Q – V karakteristike. Ako je rezerva reaktivne snage negativna tada sistem ne može raditi bez injektiranja dodatne reaktivne snage. Takva situacija se javlja kada uslijed poremećaja dođe do povećanja reaktancije sistema. Za primjer je uzeta situacija uspostave stabilnosti jednostavnog sustava pomoću SVC – a. Prikazani sustav s karakteristikom je prikazan na slici 3.10.

Slika 3.10: Uspostava stabilnog rada pomoću SVC – a i pripadajuća statička Q – V karakteristika



Izvor: S. Smaka, Predavanja iz kolegija Elektroenergetski sistemi 2, Predavanje IV, 2014/2015.

Na slici 3.10 na Q - V karakteristici prikazana je i karakteristika SVC – a na kojoj q_{max} označava injektiranje reaktivne snage u sabirnicu, a q_{min} preuzimanje reaktivne snage sa sabirnice. Na slici je vidljivo da priključivanjem SVC – a na potrošačku sabirnicu injektira se u tu sabirnicu oko 220 p.u. jalove snage da bi se napon održao oko 1 p.u., a stvorila se određena rezerva jalove snage za slučaj daljnjeg povećanja opterećenja. Isto tako se vidi i rezerva u slučaju naglog smanjenja opterećenja sve do q_{min}.

- **Kombiniranje P – V i Q – V krivulja**

Kombinacija P –V i Q – V krivulja koristi se radi lakšeg dobivanja informacija vezanih za naponsku stabilnost sustava. Nakon identifikacije kritične sabirnice, za tu sabirnicu se određuje V – P karakteristika te utvrđuje vrijednost aktivne snage na koljenu krivulje te se odabire radna točka koja je zbog sigurnosnih razloga na manjoj snazi nego koljeno karakteristike. Tada se za tu radnu točku kreira Q – V karakteristika putem koje se utvrđuje kolika reaktivna snaga ja potrebna za održavanje raznih opsega napona na sabirnici i utvrđuje se rezerva reaktivne snage.

3.1.2. Utjecaj karakteristika tereta

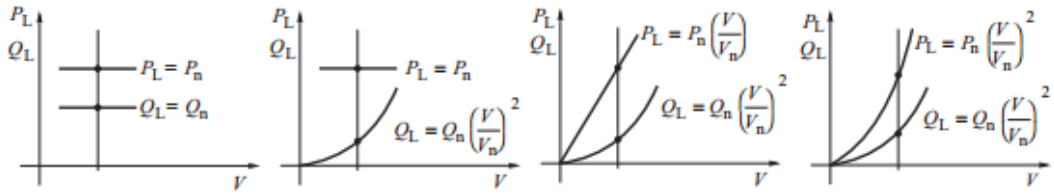
U dosadašnjem razmatranju, pri određivanju P – V i Q – V karakteristika snaga opterećenja se mijenjala kao neovisan parametar ne vodeći pri tome računa o priključenom trošilu. U realnom slučaju, snaga trošila ovisna je o naponu te sabirnice i takva funkcija se naziva naponskom karakteristikom opterećenja. To se vidi iz sljedeće relacije[11]:

$$P_l(V) = P_n * \left(\frac{V}{V_n}\right)^{k_p} = \frac{P_n}{V_n^2} V^2 = G_n V^2 \qquad Q_l(V) = Q_n * \left(\frac{V}{V_n}\right)^{k_p} = \frac{Q_n}{V_n^2} V^2 = B_n V^2 \qquad (3.25)$$

Eksponent k_p ovisi o vrsti trošila pa tako da za trošila s konstantnom snagom, promjenjivom strujom i promjenjivom impedancijom, on poprima cjelobrojne vrijednosti 0, 1 i 2. U dužem vremenskom periodu promatranja kod većine potrošača sustavi regulacije nastojat će održati snagu konstantnom, dakle neovisnom o naponu, što znači da će $k_p \approx 0$. Tako će tereti poput rezidencijalnih opadati s padom napona što ima za posljedicu i smanjenje opterećenja vodova odnosno jalovih gubitaka. Indukcijski tereti s velikim udjelom indukcijskih motora će se malo mijenjati s promjenom napona. Kada su naponi na distribucijskoj strani niski nekoliko minuta, regulacijski uređaji pokušat će vratiti opterećenje na normalno. Ovo nastojanje povrata opterećenja na reguliranu vrijednost uzrokovati će dodatne padove napona. Ako napon pade

na određenu vrijednost, neki motori mogu stati i početi vući veliku jalovu struju što dodatno snižava napon. Naposljetku, motori mogu ispasti iz pogona što će podignuti napon. Na slici 3.11 vidljive su naponske karakteristike sustava s različitim eksponentom:

Slika 3.11:



Izvor: J. Machowski, J. W. Bialek, J. R. Bumby, Power system dynamics: stability and control, John Wiley & Sons, Chippenham, Wiltshire, 2008.

Iz relacije (3-26) vidljivo je ja je teret izražen preko ekvivalentne admitancije koja iznosi $\underline{Y_n} = G_n + jB_n$. Iz iste relacije se zaključuje da se na snagu opterećenja trošila utječe mijenjanjem njegove admitancije . Prilikom mijenjanja admitancije tereta vrijedi definicija admitantnog kriterija naponske stabilnosti, koja je već ranije spomenuta, a glasi: Sustav je naponski stabilan ako povećanje admitancije potrošača rezultira povećanjem snage opterećenja potrošačkog čvora i obrnuto.

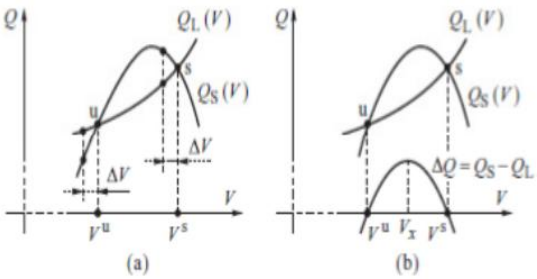
3.1.3. Kriteriji naponske stabilnosti

Svakoj radnoj točki unutar envelope na slici 3.5 odgovaraju dvije vrijednosti napona. Jedna vrijednost je veća od druge vrijednosti pa je stoga potrebno ispitati koja vrijednost odgovara stabilnom stanju. To se može ispitati pomoću kriterija naponske stabilnosti[11].

- ***d*Δ*Q*/*dV* Kriterij**

Ovaj kriterij se može objasniti pomoću slike 3.12:

Slika 3.12: $Q_S(V)$ i $Q_L(V)$ karakteristike: (a) dvije ravnotežne točke; (b) ilustracija klasičnoga kriterija stabilnosti



Izvor: J. Machowski, J. W. Bialek, J. R. Bumby, Power system dynamics: stability and control, John Wiley & Sons, Chippenham, Wiltshire, 2008.

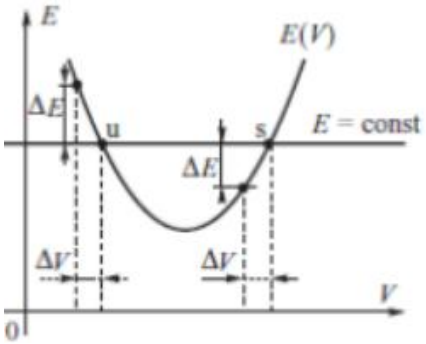
U ravnotežnoj točki proizvodnja mora biti jednaka potrošnji tj. $Q_S(V) = Q_L(V)$ dok su ravnotežne točke V^u i V^s. Pretpostavka je da se dogodi mali poremećaj napona negativnog iznosa ΔV . U desnoj ravnotežnoj točki će tada isporučena jalova snaga $Q_s(V)$ biti veća od jalove snage potrošnje $Q_L(V)$. Višak isporučene jalove snage će prouzročiti porast napona te će se napon vratiti u ravnotežnu točku s. zaključak je taj da je točka s stabilna. S druge strane isti poremećaj će prouzročiti $Q_s(V) < Q_L(V)$ što dovodi do daljnjeg pada napona. Zaključak je da je točka u nestabilna. To dovodi do zaključka da je promjena viška reaktivne energije suprotno predznaka u ravnotežnim točkama što znači da je u stabilnoj točki negativna, a u nestabilno točki pozitivna:

$$\frac{d(Q_s - Q_L)}{dV} < 0 \tag{3-26}$$

- ***dE/dV* Kriterij**

Ovaj kriterij se može objasniti pomoću slike 3.13:

Slika 3.13: Kriterij stabilnosti *dE/dV*



Izvor: J. Machowski, J. W. Bialek, J. R. Bumby, Power system dynamics: stability and control, John Wiley & Sons, Chippenham, Wiltshire, 2008.

I u ovom kriteriju rješenja se ispituju prema kriteriju malog poremećaja u sustavu. Uzima se pretpostavka da je elektromotorna sila izvora konstanta. Pri ovom kriteriju sustav je stabilan ako vrijedi:

$$\frac{dE}{dV} > 0 \tag{3-27}$$

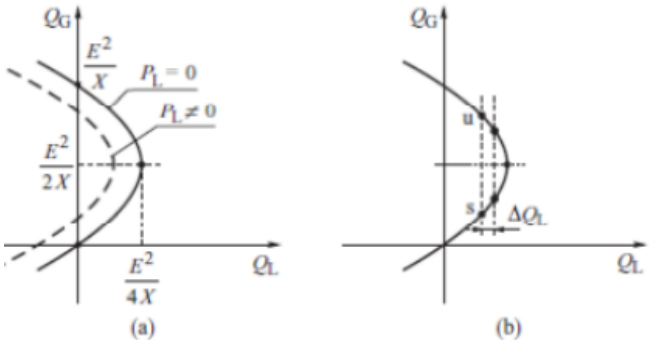
Relacija (3-27) govori da pri svakom poremećaju napona u sustavu iznosa ΔV istog predznaka mora biti i promjena napona ΔE. To znači da prilikom smanjenja napona potrošača za ΔV smanjiti će se i napon $E(V)$. S obzirom da je E prevelik da bi održavao smanjenje

opterećenja, napon trošila se vraća na svoju početnu poziciju. Slično se događa i pri povećanju napona na trošilu za ΔV kada se napon $E(V)$ poveća. Za ravnotežnu točku na lijevoj strani pri istim poremećajima relacija (3-27) neće biti zadovoljena te se dolazi do zaključka da ravnotežna stabilna točka leži na desnoj strani karakteristike. U sustavu s više strojeva, svako generatorsko čvorište mora zadovoljiti ovaj kriterij.

- **dQ_G/dQ_L Kriterij**

Ovaj kriterij se može objasniti pomoću slike 3.14:

Slika 3.14: Generirana jalova snaga i karakteristike opterećenja: (a) Q_G (Q_L) sa P_L kao parametrom; (b) metoda mali-poremećaj primijenjena na Q_G (Q_L) karakteristiku



Izvor: J. Machowski, J. W. Bialek, J. R. Bumby, Power system dynamics: stability and control, John Wiley & Sons, Chippenham, Wiltshire, 2008.

Kao i u prethodna dva kriterija i u ovom kriteriju se rješenja ispituju pomoću kriterija malog poremećaja i postoje dvije ravnotežne točke tj. dvije vrijednosti generirane jalove snage koje odgovaraju danom zahtjevu jalove snage. U ravnotežnoj točki *s*, prilikom poremećaja ΔQ_L koji povećava zahtjev trošila za jalovom snagom, dolazi do porasta generirane jalove snage Q_G te je ta točka stabilna. U ravnotežnoj točki *u* povećanje Q_L izaziva smanjenje Q_G te je ta točka nestabilna. Dolazi se do zaključka da je ravnotežna točka stabilna ako mala promjena reaktivnog opterećenja proizvede promjenu generiranje jalove snage istog predznaka:

$$\frac{dQ_G}{dQ_L} > 0 \qquad (3\text{-}27)$$

3.2. Kritični zahtjev opterećenja i kolaps napona

Za svrhu ove analize potrebno je teorijski odvojiti vezu između $Q_L(V)$ i $Q_S(V)$. $Q_S(V)$ reaktivna snaga dobivena od izvora tada neće biti određena reaktivnom snagom tereta koju

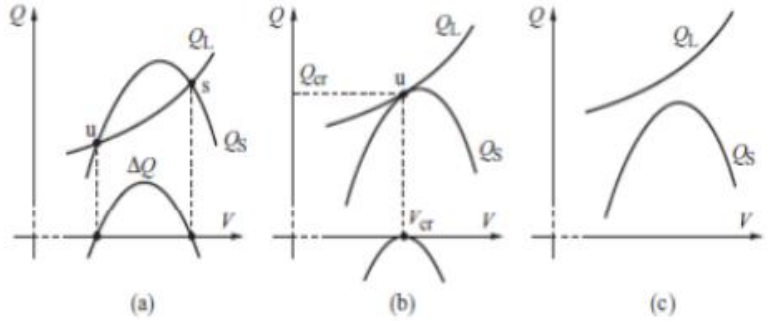
zahtjeva teret. Tada vrijedi da je $P_L(V) = P_S(V)$ te su istovjetne s relacijom (3.2), dok je $Q_S(V)$ jednaka relaciji (3-1). Tada se relacija (3-3) može napisati na način:

$$Q_S(V) = \sqrt{\left[\frac{EV}{X}\right]^2 - [P_L(V)]^2} - \frac{V^2}{X} \tag{3-28}$$

3.2.1. Utjecaj povećanja zahtjeva opterećenja

Polagano povećanje zahtjeva opterećenja u sustavu kao što su normalne dnevne varijacije opterećenja mogu imati dvije štetne posljedice za naponsku stabilnost. Prema relaciji (3-28) povećanje djelatne snage snižava $Q_S(V)$ karakteristiku, dok povećanje reaktivne snage povećava $Q_L(V)$ karakteristiku. Kao posljedica toga, stabilna točka *s* pomiče se prema nižim vrijednostima napona, a nestabilna točka *u* pomiče se prema višim vrijednostima napona. Kako zahtjevi dalje rastu, ravnotežne točke se približavaju jedna drugoj dok se konačno ne preklope u kritičnoj ravnotežnoj točki što je vidljivo na slici 3.15:

Slika 3.15: Relativni položaj karakteristike generirane snage i karakteristike snage opterećenja: (a) dvije ravnotežne točke; (b) jedna kritična ravnotežna točka ; (c) bez ravnotežne točke



Izvor: J. Machowski, J. W. Bialek, J. R. Bumby, Power system dynamics: stability and control, John Wiley & Sons, Chippenham, Wiltshire, 2008.

Kada se opterećenje nalazi na kritičnoj točki, malo povećanje zahtjeva za reaktivnom snagom prouzročit će manjak reaktivne snage u sustavu s obzirom da je potražnja veća od proizvedene jalove snage što dovodi do pada napona. Sa smanjivanjem iznosa napona povećava se i smanjenje jalove snage čime se nastavlja smanjivati iznos napona sve dok ne padne ispod kritične vrijednosti. Taj fenomen se naziva naponski kolaps dok se u nekim zemljama naziva i naponska lavina [11]. Naponski kolaps se može podijeliti na trajan i djelomičan naponski kolaps. Djelomični naponski kolaps je stanje kada povećana potražnja za jalovom snagom uzrokuje pad napona ispod prihvatljive vrijednosti, ali ne uzrokuje ne stabilnost što znači da

sustav funkcionira te je u stanju upozorenja na totalni naponski kolaps. Zaključno iz aspekta zaštite napon čvorova trebao bi se držati što dalje od kritičnih vrijednosti. Na žalost nelinearnost naponske karakteristike stvara problem derivacije opće formule za kritični napon koja je valjana za bilo koji tip aktivne i reaktivne promjene snage. Ipak postoje neke jednostavne iterativne formule kojima se mogu odrediti kritični napon V_{cr} i kritični porast zahtjeva opterećenja ξ_{cr} [11].

3.2.2. Utjecaj ispada elemenata mreže

Relativni položaj karakteristike opskrbe $Q_S(V)$ koja je definirana relacijom (3-28) ovisi o ekvivalentnoj reaktanciji sustava. Velike promjene u iznosu reaktancije poput ispada nekih elemenata sustava mogu utjecati na karakteristiku $Q_S(V)$ tako da je pomaknu prema dolje tj. smanjit će se generacija jalove snage izvora što meže prouzrokovati probleme naponske stabilnosti.

3.2.3. Utjecaj oblika karakteristike tereta

Iz relacije (3-28) se može vidjeti da se povećanjem zahtjeva realne snage $P_L(V)$ tjeme parabole karakteristike reaktivne snage opskrbe $Q_S(V)$ spušta prema dole. To zapažanje ima značajnu ulogu pri naponskoj stabilnosti sustava gdje aktivna snaga se mijenja s naponom. Primjerice, ako se aktivna snaga smanjuje s naponom tada je stabilnost sustava puno bolja za razliku od slučaja kada je aktivna snaga neovisna o naponu. Takav slučaj potencijalnog naponskog kolapsa je opisan u poglavlju 3.1.2.

3.2.4. Utjecaj automatske regulacije napona generatora

Važnu ulogu pri određivanju i održavanju naponske stabilnosti ima i utjecaj automatske regulacije napona generatora. Ako postoji AVR (eng. Automatic voltage regulator) koji će održavati napon konstantnim na sabirnicama generatora, može se sinkrona reaktancija izuzeti iz ukupne ekvivalentne reaktancije mreže. Međutim, za slučaj da ne postoji AVR, tada će uz konstantnu uzbudu sinkronih strojeva konstantna biti unutarnja elektromotorna slila generatora te će se sinkrona reaktancija morati biti pridodana ekvivalentnoj reaktanciji sustava. Iz relacije (3-28) može se vidjeti da povećanje ekvivalentne reaktancije spušta parabolu $Q_S(V)$ prema dolje. Rezultat je snižavanje maksimuma proizvodnje reaktivne snage stoga i kritične snage i napona. Za slučaj ako se prekorači limit regulacije napona AVR – a tada se također mora uvrstiti sinkrona reaktancija što također loše utječe karakteristiku $Q_S(V)$, a samim tim i na naponsku stabilnost.

3.3. Statička analiza sustava

U dosadašnjim razmatranjima naponska stabilnost je obuhvaćala problematiku jednostavnog sustava prikazanog na slici 3.3. Analiza naponske stabilnosti višestrojnog sustava koji napajaja složene terete putem složene zamkaste mreže je ipak složenija. Za potrebe upravljanja elektroenergetskim sustavom, kritično opterećenje sustava može se izračunati *offline* koristeći prilagođene programe koji izračunavaju tokove snaga i $d\Delta Q/dV$ *ili* dQ_G/dQ_L kriterije stabilnosti opisane u poglavlju *3.1.3.* Princip rada je sličan kao u poglavlju *3.2.1,* a plan je da se sistem povećanjem zahtjeva opterećenja, nekog potrošača ili grupe potrošača, dovede u kritično stanje. Korištenjem programa za izračunavanje tokova snaga moguće je vidjeti utjecaj efekata poput kontrole napona na stezaljkama generatora putem AVR - a, kompenzacije jalove snage, naponske karakteristike tereta itd. Ova metoda se ne može koristiti *online* tj. može se koristiti samo za ustaljeno stanje. Da bi se odredila udaljenost od kritičnog stanja koriste se indikatori naponske stabilnosti koji se određuju iz kriterija naponske stabilnosti ili koeficijent kritičnog porasta zahtjeva opterećenja ξ_{cr}.

3.3.1. Naponska stabilnost i tokovi snaga

Obzirom da se prilikom ove analize promatra ustaljeno stanje sustava, za svrhu analize promatrati će se karakteristike idealnog krutog tereta. Naponska karakteristika idealnog krutog tereta je horizontalna linija $Q_L\,(V) = Q_n = konst.$ Tada kritična vrijednost napona odgovara vrhu karakteristike $Q_S(V)$ sa slike 3.15. U toj točki vrijedi $dQ_S/dV = 0.$ Za idealni kruti teret vrijedi odnos $Q_n = P_n\,tan\varphi$ preko kojeg se može zaključiti da za dani kut φ radna snaga doseže svoj maksimum kada jalova snaga doseže svoj maksimum. To znači da pri kritičnoj vrijednosti napona uz $dQ_S/dV = 0$ vrijedi i $dP_n/dV = 0$ što odgovara koljenu krivulje sa slike 3.6. Stoga, kada se potražnja približava kritičnoj vrijednosti idealnog krutog tereta, vrijedi:

$$\frac{dP}{dV} \to 0 \qquad i \qquad \frac{dQ}{dV} \to 0 \tag{3-29}$$

Iz relacije (3-29) se zaključuje da derivacija radne i jalove snage po naponu čvora dobivene iz jednadžbi tokova snaga sustava teže ka nuli.

Radna snaga P, jalova snaga Q, iznos napona V i kut napona δ čvorišta u elektroenergetskom sustavu međusobno su ovisne veličine koje su povezane nelinearnim jednadžbama tokova snaga[12]:

$$F(P, Q, V, \delta) = 0 \tag{3-30}$$

Jednadžbe tokova snaga mogu se linearizirati u u radnoj točki koristeći sljedeće ovisnosti:

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \tag{3-31}$$

gdje se matrica:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix}^{-1} \tag{3-32}$$

računa inverzijom Jakobijeve matrice koja se sastoji od podmatrica parcijalnih derivacija izraza za radnu i jalovu snagu po naponima i kutovima čvorišta. Kada je potražnja kritična tada je determinanta jakobijeve matrice jednaka nuli i matrica je singularna. Kritično stanje može se dosegnuti prilikom različitih scenarija povećanja opterećenja jednog tereta, opterećenja određenog područja ili određenog podsustava. Krećući od prvog iterativnog koraka računanja tokova snaga opterećenje se povećava postepeno i za svaku promjenu vrši se novi iterativni proračun tokova snaga. Ako se determinanta Jakobijeve matrice približava nuli, sustav se približava kritičnom stanju. Iterativni postupci tokova snaga se rješavaju Newton – Raphsonovom metodom. Prilikom svakog iterativnog koraka, korištenjem prigodnog programa za izračun tokova snaga,uzimaju se u obzir i ostali faktori koji utječu na naponsku stabilnost poput naponske karakteristike tereta, preklopke transformatora itd. Koljeno P –V krivulja mogu se odrediti u svakom koraku te se prikazati grafički. Nagib koljena krivulje određuje kritičnu aktivnu potražnju tereta. Nakon određivanja koljena krivulje aktivne snage i prilikom povećanja potražnje aktivne snage u svakom simulacijskom koraku potrebno je povećati i potražnju jalove snage također.

Da bi se utvrdio odnos između napona i radne i jalove snage iz relacije (3-31) se uzima funkcija:

$$\Delta V = C * \Delta P + D * \Delta Q \tag{3-33}$$

Radna snaga je određena potrošnjom i ona se ne može mijenjati da bi se ostvarila određena promjena napona, a obzirom da je opterećenje konstantno vrijedi da je $\Delta P = 0$. Tada je u relaciji (3-33) vidljivo da se promjena napona može postići promjenom iznosa jalove snage

koja se injektira u čvor. Može se zaključiti da je podmatrica D najutjecajnija podmatrica u relacijama (3-31) i (3-33) tj. u najvećoj mjeri određuje mogućnost promjene napona u mreži. Odgovarajućim iznosima dijagonalnih elemenata navedene podmatrice $D_{ii} = (\partial Q_{ii}/\partial V_{ii})$ za pojedino čvorište u mreži može se zaključiti o efektima regulacije napona promjenom jalove snage u promatranom čvorištu. Jednako tako, odgovarajući vandijagonalni elementi $D_{ij} = (\partial Q_{ij}/\partial V_{ij})$ daju osnovnu indikaciju mogućnosti promjene napona u jednom čvorištu mreže ukoliko se regulacija jalovom snagom vrši u nekom drugom čvoru. Takva analiza se naziva V – Q analiza osjetljivosti sustava.

3.4. Dinamička analiza sustava

Dosadašnja razmatranja naponske stabilnosti uključivala su pretpostavku da su karakteristike tereta predstavljene statičkim karakteristikama pomoću kojih se može uvidjeti ponašanje tereta tijekom malih naponskih oscilacija. U praksi stvarno ponašanje tereta i sustava usko je povezano s dinamičkim procesima poput dinamikom indukcijskih motora, dinamikom AVR – a i dinamikom sustava zaštite. Neki od tih procesa ili svi zajedno mogu ubrzati, usporiti ili spriječiti kolaps napona. Neki od klasičnih scenarija naponskog kolapsa su:

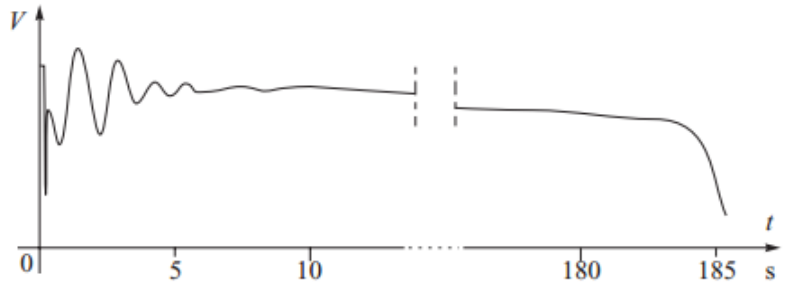
- **Povećanje opterećenja**

U poglavlju 3.2.1 opisano je kako naponski kolaps može nastati kao posljedica velikog povećanja opterećenja. Glavni faktori, u ovom scenariju, koji pridonose naponskom kolapsu su primjerice indukcijski motori koji imaju konstantnu karakteristiku opterećenja te imaju veliku potražnju za radnom i jalovom snagom unatoč padu napona na tom području. Preklopke distributivnih transformatora nastoje održati napon konstantan pa je stoga pri padu vrijednosti napona velika potražnja za radnom i jalovom snagom što je veoma nepoželjno. Isto tako i ograničenost kontrole jalove snage putem sinkronih generatora ima nepovoljan utjecaj na naponsku stabilnost te za vrijeme velike potražnje jalove snage, sinkroni generatori ne mogu više održavati konstantni napon na svojim stezaljkama te iznos napona još više pada. Tako naponski kolaps za vrijeme povećanog opterećenja može biti izazvan od jednog ili svih nabrojanih faktora u ovom scenariju, a dinamika djelovanja različitih uređaja za kontrolu napona, poput generatora, kompenzatora i transformatora, može djelovati na način da se aktualni naponski kolaps dogodio na različit način od predviđenog načina putem statičkih karakteristika.

- **Ispadi mrežnih elemenata**

U poglavlju 3.2.2. opisan je utjecaj ispada elementa mreže na reaktanciju sustava. Primjerice ispad jednog voda u prijenosnom sustavu povećava ekvivalentnu reaktanciju sustava što povećava padove napona na ostalim vodovima koji su sada više opterećeni i smanjuje se maksimalna snaga koja se može dostaviti potrošaču. U tom slučaju rizik od naponskog kolapsa je velik. Isto tako i ispad generatora ima sličan učinak na sustav gdje se uz povećanje reaktancije smanjuje kapacitet proizvodnje radne i jalove snage u sustavu. Dinamika uređaja za kontrolu napona i ovdje može utjecati na scenarij naponskog kolapsa. Na slici 3.16. su prikazane oscilacije napona tijekom naponskog kolapsa. U prvih 10 sekundi vidljive su prijelazne oscilacije uzrokovane ispadom nekog elementa mreže te nakon toga blagi pad napona uzrokovan blagom potražnjom jalove snage u sustavu uzimajući u obzir djelovanje uređaja za kontrolu napona i njihova ograničenja. Vidljivo je da se uređaji za kontrolu napona odgodili naponski kolaps.

Slika 3.16: Primjer naponskog kolapsa uzrokovanog ispadom elementa mreže



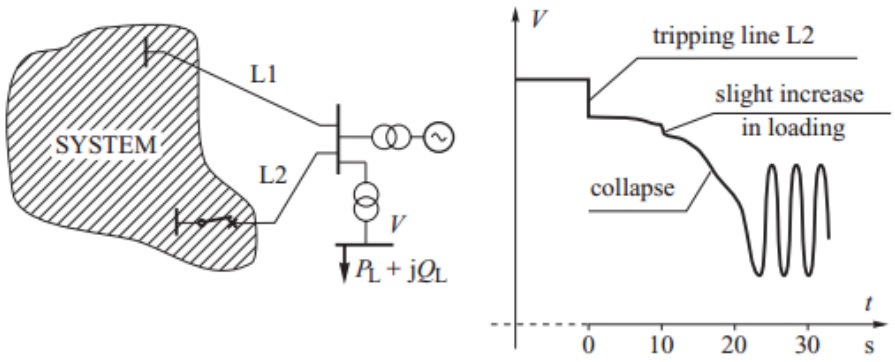
Izvor: J. Machowski, J. W. Bialek, J. R. Bumby, Power system dynamics: stability and control, John Wiley & Sons, Chippenham, Wiltshire, 2008.

- **Naponski kolaps i asinkrone operacije**

Naponski kolaps na jednom ili nekoliko čvorova mogu prouzročiti propade napona na susjednim čvorovima što dovodi do naponskog kolapsa na tim čvorovima. Ti događaji loše utječu na mrežu i sinkrone generatore. Ako su ti generatori slabo povezani sa sustavom oni mogu ispasti iz sinkronizma. Pad napona, popraćen povećanjem potražnje jalove snage u sustavu i smanjenjem potražnje djelatne snage, ima sličan utjecaj na generatore kao kratki spoj u mreži. Za primjer se može uzeti slika 3.17 gdje ispad voda L2 uzrokuje povećanje opterećenja dugačkoga voda L1. Opterećenje se nalazi u kritičnom stanju i mali porast opterećenja rezultira naponskim kolapsom te generator ispada iz sinkronizma sa sustavom. Tada napon počinje periodički oscilirat u asinkronom radu. Generator koji radi u asinkronom

radu tada mora biti isključen iz sustava što dalje pogoršava situaciju na čvorištu na kojem je spojen teret i dovodi do potpunog kolapsa napona.

Slika 3.17: Gubitak sinkronizma generatora uzrokovan naponskim kolapsom: a) shema sustava; b) oscilacije napona



Izvor: J. Machowski, J. W. Bialek, J. R. Bumby, Power system dynamics: stability and control, John Wiley & Sons, Chippenham, Wiltshire, 2008.

- **Različite pojave unutar kompozitnog tereta**

Već ranije je spomenuto da je krutost opterećenja jedan od dominantnih faktora uzroka naponskog kolapsa. Dinamički odziv kompozitnog opterećenja može rezultirati razlikom dinamičkih i statičkih karakteristika. Ta razlika se uglavnom pripisuje indukcijskim motorima te može rezultirati smanjenjem naponske stabilnosti sve do naponskog kolapsa. Primjerice, nagli veliki pad napona, kao pri sporo otklonjenom kratkom spoju, može uzrokovati smanjivanje momenta motora i uzrokovati gubitak brzine rotacije motora. Takvi motori zahtijevaju više reaktivne snage što dodatno smanjuje naponsku stabilnost te takvo stanje uzrokuje istu situaciju ostalim bliskim motorima. Takvo stanje opadanja napona traje sve dok zaštitna oprema ili elektromehanički kontakti ne isključe motor s mreže te tako smanjuju potražnju za reaktivnom snagom. Napon se tada počinje stabilizirati, ali nekontrolirano ponovno uklapanje tereta poput velikih samozaletnih indukcijskih motora ponovno smanjuje napon te vodi ka naponskom kolapsu.

Neki od najpoznatijih naponskih kolapsa u svijetu su [11]:

- naponski kolaps u Ateni 2004. godine
- naponski kolaps u SAD/Kanada 2003. godine
- skandinavijski naponski kolaps 2003. godine

3.5. Prevencija naponskog sloma

Da bi se naponski slom spriječio poduzimaju se mjere u periodima planiranja, eksploatacije te upravljanja . Nekada su te mjere neekonomične, ali su potrebne. Prilikom perioda planiranja pouzdanost sustava mora biti zadovoljena za sve moguće slučajeve N – 1 kriterija. Sljedeće mjere su [13]:

- **Mjere u periodu planiranja:**
  - Upotreba uređaja za kompenzaciju reaktivne snage;
  - Pojačanje prijenosnih kapaciteta (vodovi, transformatori) kako bi se reaktivna energija mogla prenijeti iz udaljenih generatora do mjesta gdje je potrebna;
  - Pravilno planiranje veličine lokacije reaktivnih izvora u blizini potrošačkih centara;
  - Koordinacija uređaja zaštite i upravljanja:
    - Djelovanje uređaja zaštite da bi se spriječilo preopterećenje u sustavu je posljednja akcija koja se poduzima;
    - Adekvatne upravljačke mjere trebale otkloniti nastali problem prije djelovanja uređaja zaštite.
- **Mjere u periodu eksploatacije:**
  - Korištenje lokalnih rezervi aktivne snage kako bi se spriječio prijenos velikih iznosa reaktivne snage;
  - Ugovori sa susjednim elektroenergetskim sustavima za međusobnu ispomoć kako bi se napon u graničnim točkama povezivanja držao u definiranim granicama;
  - Smanjenje reaktivnih gubitaka u prijenosnim vodovima
- **Mjere u periodu upravljanja:**
  - Elektroenergetski sustav treba raditi s adekvatnom granicom naponske stabilnosti, a koju osigurava pravilna raspodjela izvora reaktivne snage i naponskih profila;
  - Rotirajuća rezerva (od generatora se zahtijeva da svojim radom osiguraju potrebnu rotirajuću rezervu reaktivne snage);
  - Radnje koje poduzimaju operatori (operatori trebaju prepoznati simptome vezane za naponsku stabilnost i izvršiti odgovarajuće akcije kako bi se uklonio nastali problem);

- Blokiranje djelovanja automatskih regulatora napona regulacijskih transformatora pri velikim padovima napona u prijenosnim vodovima;
- Automatsko upravljanje radom uređaja za kompenzaciju jalove snage;
- Primjena automatske, zonski orijentirane sekundarne regulacije napona i reaktivnih snaga.

U ovim mjerama je vidljivo da se upotrebom FACTS sustava uvelike može utjecati na navedene mjere te tako spriječiti nastanak naponskog kolapsa.

4. FACTS UREĐAJI

Problem prijenosa u elektroenergetskim sustavima u kojima se očekuju različite snage prijenosa predstavlja ozbiljan inženjerski izazov u fazi projektiranja sustava, ali u operatorski pri vođenju sustava. Nedovoljan iznos jalove snage može uzrokovati značajne probleme pa i prekide napajanja električnom energijom. Stoga se velika pozornost posvećuje problemu ograničenosti prijenosne moći u uvjetima povećane sigurnosti napona te projektiranju različitih načina njegova izbjegavanja, kako u normalnim uvjetima tako i u uvjetima poremećenog pogona [14].

FACTS (eng. Flexible AC Transmission System) naprave su izmjenični sustavi temeljeni na energetskoj elektronici i drugoj statičkoj opremi kojima se povećava stabilnost i fleksibilnost prijenosnog sustava upravljanjem tokovima djelatne i jalove snage. One doprinose povećanju prijenosne moći sa statičkog i dinamičkog aspekta rješavanjem problema stabilnosti napona te problema regulacije napona i kompenzacije jalove snage na način da upravljaju s jednim ili više parametara izmjeničnog sustava. Njihovo djelovanje je usmjereno prema prigušenju elektromehaničkih oscilacija, regulaciji tokova djelatnih i jalovih snaga, serijskoj i poprečnoj kompenzaciji te regulaciji kuta prijenosa. Vrijeme upravljanja je unutar nekoliko milisekundi, što znači da su u stanju kontinuirano upravljati karakterističnim varijablama. Prednosti FACTS tehnologije su:

- Upravljanje tokovima snaga prema postavljenim zahtjevima.
- Povećanje opteretivosti vodova do termičkih i dielektričnih ograničenja.
- Povećanje sigurnosti sustava putem podizanja granice prijelazne stabilnosti, ograničavanja struje kratkog spoja i preopterećenja, izbjegavanjem kaskadnih raspada sustava i prigušenja elektromehaničkog njihanja u sustavu.
- Omogućavanje sigurnog povezivanja spojnim vodom susjednih sustava i područja, čime se smanjuje potreba za ukupnom rezervom proizvodnje na obije strane.
- Omogućava veće prilagodljivosti u planiranju novih proizvodnih izvora.
- Pojačavanje postojećih vodova
- Smanjivanje tokova jalove snage čime se omogućava prijenos većeg iznosa djelatne snage.
- Smanjivanje zamkastih tokova snage.
- Povećanje iskoristivosti proizvodnih izvora s najnižim troškovima.

Ove prednosti FACTS naprava su moguće zahvaljujući sposobnosti FACTS naprava da nadziru značajne veličine u prijenosnom sustavu: serijska i poprečna impedancija, struja, napon, fazni kut i stupanj prigušenja njihanja na različitim frekvencijama ispod nazivne.

FACTS naprave prema vrsti priključka na prijenosni sustav moguće je podijeliti na:

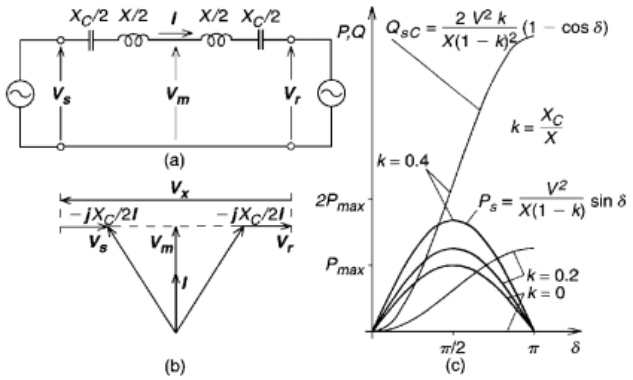
- Serijske naprave
- Poprečne naprave
- Kombinirane serijsko - serijske naprave
- Kombinirano serijsko - poprečne naprave

4.1. Serijske FACTS naprave

Serijske FACTS naprave izvode se u obliku promjenjive impedancije (kondenzator ili prigušnica) ili promjenjivog izvora napona zasnovanog na energetskoj elektronici. Sve serijske naprave injektiraju napon u seriji s vodom pa čak i promjenjiva impedancija pomnožena sa strujom predstavlja jedan oblik injektiranja serijskog napona u vod. Kada se napon održava fazno okomitim u odnosu na struju koja teče vodom, serijska naprava proizvodi ili troši jalovu snagu promjenjivog iznosa. Za slučaj odstupanja faznog položaja od okomitog pojavljuje se i djelatna snaga. Pri definiranim iznosima napona čvorišta, prijenosnu snagu određuje serijska impedancija voda i razlika kutova napona čvorišta između kojih teče snaga [14].

Osnovna ideja serijske kapacitivne kompenzacije jest smanjenje ukupne serijske reaktancije između dvije točke prijenosnog sustava. Primjer kapacitivne serijske kompenzacije može se vidjeti na slici 4.1.a. Prikazan je jednostavni dvostrojni sustav u kojem se pomoću serijskog kondenzatora kompenzira induktivna reaktancija voda prema vektorskom dijagramu prikazanom na istoj slici pod b. Djelatna snaga prijenosa izrazito se povećava s povećanjem stupnja serijske kompenzacije k što je prikazano na slici 4.1.c. Jalova snaga koju serijski kompenzator dobavlja također se izrazito povećava s povećanjem stupnja kompenzacije k i mijenja se u ovisnosti o kutu δ na sličan način kao i radna snaga.

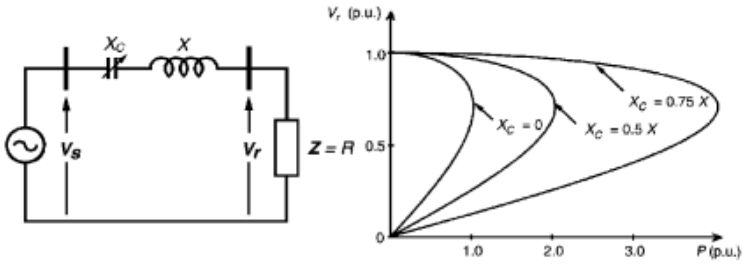
Slika 4.1. Kompenzacija pomoću serijske naprave; a) dvostrojni sustav; b) vektorski dijagram; c) ovisnost djelatne i jalove snage o kutu i stupnju kompenzacije



Izvor: N. Dizdarević, Mogućnost povećanja prijenosne moći EES –a korištenjem konvencionalnih i FACTS naprava, Energija, Vol 50 (2001), No 5, str. 323-348

Prema konvencionalnom objašnjenju, reaktancija serijskog kondenzatora poništava dio serijske induktivne reaktancije voda čime se smanjuje ukupna efektivna serijska reaktancija kao da je vod fizički skraćen. Prema drugom objašnjenju, da bi se povećala struja kroz serijsku induktivnu reaktanciju voda, a time bi se povećala ujedno i snaga, nužno je povećati napon na toj reaktanciji. Povećanje napona stvara se priključenjem serijskog elementa čija impedancija proizvodi napon suprotnog smjera naponu serijske induktivne reaktancije na vodu. Serijska kapacitivna kompenzacija putem smanjenja ukupne serijske induktivne reaktancije voda utječe na stabilnost napona na način da se minimizira promjenjivost napona na kraju prijenosnog voda , a time se smanjuje mogućnost nastanka naponskog sloma u prijenosnom sustavu što je prikazano na slici 4.2 uz pripadne P – V krivulje za različite stupnjeve kompenzacije na kojima se vidi kako se primjenom serijske kompenzacije povećava maksimalna snaga prijenosa snage vodom.

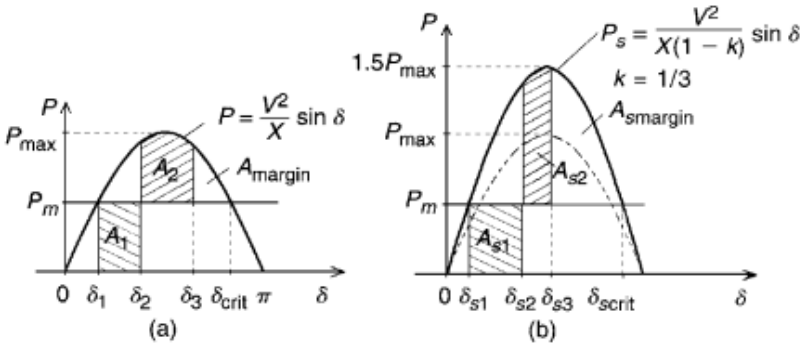
Slika 4.2. Utjecaj serijske kompenzacije na stabilnost napona



Izvor: N. Dizdarević, Mogućnost povećanja prijenosne moći EES –a korištenjem konvencionalnih i FACTS naprava, Energija, Vol 50 (2001), No 5, str. 323-348

Među FACTS napravama postoje i one naprave koje su iskoristive tijekom pojava vezanih uz prijelaznu stabilnost. Na slici 4.3.a i 4.3.b mogu se vidjeti P – δ krivulje bez kompenzacije i s kompenzacijom. Vidljivo je da se korištenjem kompenzacije površina između P – δ krivulje i crte konstantne mehaničke snage P_m u rasponu iznosa kuta od δ_{s3} do δ_{scrit}, u odnosu na istu tu površinu bez kompenzacije, znatno povećala. Te površine označene s A_{margin} i $A_{smargin}$ određuju margine prijelazne stabilnosti. Njihovom usporedbom zaključuje se kako je u slučaju primjene serijske kompenzacije margina prijelazne stabilnosti znatno veća. Ipak u praktičnim slučajevima, stupanj kompenzacije ne prelazi 75% od serijske induktivne reaktancije voda zbog mogućih poteškoća u upravljanju tokovima snaga te visokih struja kratkog spoja.

Slika 4.3. Kriterij jednakih površina u primjeni serijske kompenzacije; a) bez primjene i b) s primjenom serijske kompenzacije

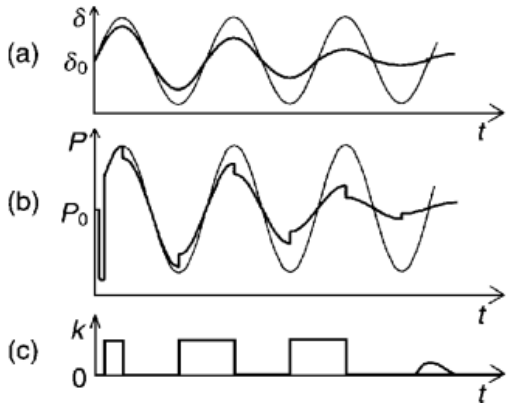


Izvor: N. Dizdarević, Mogućnost povećanja prijenosne moći EES –a korištenjem konvencionalnih i FACTS naprava, Energija, Vol 50 (2001), No 5, str. 323-348

Upravljivu serijsku kompenzaciju moguće je primijeniti i radi prigušenja elektromehaničkih njihanja što je prikazano na slici 4.4. Tada je nužno mijenjati stupanj kompenzacije velikom brzinom kako bi se utjecalo na ubrzavajuće i usporavajuće njihanje generatora u poremećaju. Za slučaj kada generator ubrzava i povećava se kut δ ($d\delta/dt>0$), električnu snagu prijenosa potrebno je povećati kako bi se kompenzirao višak mehaničke ulazne snage. U obrnutom slučaju kada generator usporava, smanjuje se kut δ($d\delta/dt<0$), električnu snagu je potrebno smanjiti kako bi se kompenzirao manjak mehaničke ulazne snage. Za primjer na slici 4.4 uočava se da je stupanj kompenzacije maksimalan pri $d\delta/dt>0$, a jednak nuli pri $d\delta/dt<0$. Pri maksimalnom iznosu stupnja kompenzacije, efektivna reaktancija voda je minimalna dok je pri minimalnom stupnju kompenzacija reaktancija voda maksimalna. Pri prigušenju velikih njihanja kao na slici 4.4. koristi se skokovita promjena stupnja kompenzacije sa samo dvije vrijednosti (maksimalnom i minimalnom). To se može postići tiristorskim prekidačima bez

mogućnosti upravljanja kuta paljenja. Za prigušenje malih njihanja, kontinuirano upravljanje stupnja kompenzacije je mnogo bolje rješenje a može se izvesti pomoću tiristora s mogućnošću upravljanja kuta paljenja.

Slika 4.4. Prigušenje njihanja primjenom serijske kompenzacije; a) kut generatora, B) djelatna snaga prijenosa i c) stupanj kompenzacije



Izvor: N. Dizdarević, Mogućnost povećanja prijenosne moći EES –a korištenjem konvencionalnih i FACTS naprava, Energija, Vol 50 (2001), No 5, str. 323-348

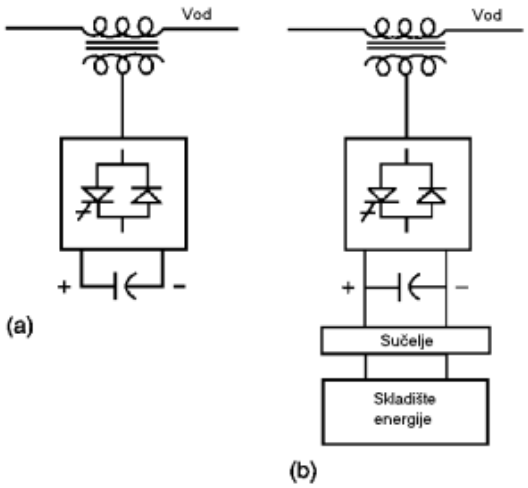
Primjena serijske kapacitivne kompenzacije može, u nekim slučajevima, izazvati pojavu torzijskog naprezanja na frekvencijama manjim od temeljne frekvencije sustava, odnosno subsinkronu rezonanciju. Pri tome su najugroženiji veliki generatori s višestupanjskom parnom turbinom koji imaju višestruke torzijske modove s frekvencijama ispod temeljne. Stoga je nužno uvesti dodatnu funkciju zaštite od pojave subsinkrone rezonancije.

4.1.1. Statički sinkroni serijski kompenzator (SSSC)

Statički sinkroni serijski kompenzator je serijski kompenzator čiji je izlazni napon neovisno upravljiv i u okomici je sa strujom voda, ako nije uveden vanjski izvor energije. Na taj način se povećava ili smanjuje jalova komponenta pada napona na vodu i upravljiva snaga prijenosa. SSSC može uključivati i skladište energije radi poboljšanja prijelaznih pojava u sustavu korištenjem dodatne privremene kompenzacije djelatne snage. SSSC je jedna od najznačajnijih FACTS naprava. Zasniva se na pretvaraču s naponskim ili strujnim izvorom. Uobičajeno je serijski injektirani napon prilično malen u usporedbi s linijskim, dok zahtjevi za dozemnom izolacijom mogu biti prilično visoki. Uz odgovarajuću izolaciju između primara i sekundara transformatora, pretvaračka oprema je smještena na zemnom potencijalu ukoliko nije na platformi u stanu potpune izolacije od zemlje. Omjer transformacije se određuje prema kriteriju najekonomičnije izvedbe pretvarača. Skladište energije može biti priključeno na napravu kako bi injektirao vektor napona promjenjivog kuta u seriji s vodom dok se bez

skladišta energije injektira promjenjivi napon koji je u okomici sa strujom što je vidljivo na slici 4.5.

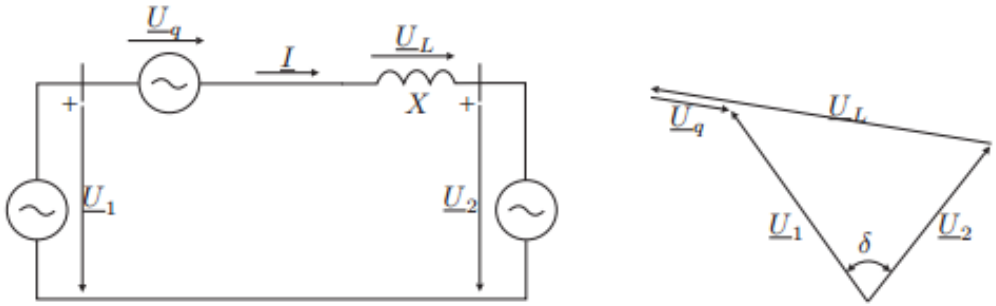
Slika 4.5. SSSC a) bez dodatnog skladišta energije i b) s dodatnim skladištem energije



Izvor: N. Dizdarević, Mogućnost povećanja prijenosne moći EES –a korištenjem konvencionalnih i FACTS naprava, Energija, Vol 50 (2001), No 5, str. 323-348

Princip rada SSSC – a bez dodatnog izvora energije prikazan je na slici 4.6. na jednostavnom dvostrojnom sustavu. Na fazorskom dijagramu je vidljivo kako naponski izvor povećava amplitudu napona na reaktanciji voda tj. na vodu, a samim time se povećava amplituda struje što rezultira povećanjem toka snage na vodu.

Slika 4.6. SSSC u jednostavnom dvostrojnom sustavu s pripadajućim fazorskim dijagramom



Izvor: G. Glanzmann, FACTS Flexible Alternating Current Systems, EEH – Power System Laboratory, ETH Zurich, 14. January 2015.

Takvo opisano stanje odgovara efektu kondenzatora spojenog u seriju s vodom. Izlazni napon sinkronog naponskog izvora $\underline{U_q}$, prikazan relacijom 4.1, funkcija je struje $\underline{I}$ te se postiže ista kompenzacija kao kompenzacija omogućena serijskim kondenzatorom:

$$\underline{U_q} = -jX_C\underline{I} \tag{4-1}$$

gdje je X_C reaktancija kondenzatora. Ipak, sinkronim naponskim izvorom moguće je održavati kompenzacijski napon konstantnim pri pojavi promjenjive struje voda jer se napon U_g može regulirati neovisno o iznosu struje. Sinkroni naponski izvor može jednako tako smanjiti iznos napona duž induktiviteta voda što ima jednak učinak povećanju reaktancije voda. Stoga se zaključuje da SSSC može kako smanjiti tako može i povećati tok snage istog stupnja na vodu jednostavnom promjenom polariteta injektiranog izmjeničnog napona. Princip rada SSSC – a može se objasniti relacijama koje slijede. SSSC injektira kompenzacijski napon u seriju s vodom neovisno o struji voda. S obzirom da je napon U_g reaktivni izvor, okomit je na struju voda čime se dobija izraz za struju:

$$\underline{I} = \frac{\underline{U_1} - \underline{U_q} - \underline{U_2}}{jX} \tag{4-2}$$

$$\underline{I} = \frac{1}{jX}\left[\left(\underline{U_1} - \underline{U_2}\right) - U_q \frac{(\underline{U_1} - \underline{U_2})}{|\underline{U_1} - \underline{U_2}|}\right] \tag{4-3}$$

$$\underline{I} = \frac{j(U_2 - U_1)}{X}\left(1 - \frac{U_q}{|U_1 - U_2|}\right) \tag{4-4}$$

Izraz $\left(\underline{U_1} - \underline{U_2}\right)$ predstavlja faznu razliku između napona na početku i na kraju voda. Bez SSSC – a taj izraz bi predstavljao pad napona na reaktanciji X. Fazor injektiranog napona U_g ima smjer kao izvor reaktivnog napona, a taj smjer određen je izrazom $\left(\underline{U_1} - \underline{U_2}\right)/\left|\underline{U_1} - \underline{U_2}\right|$. Množenje tog izraza s injektiranim naponom amplitude U_g matematički određuje fazor $\underline{U_q}$. Odabirući napon $\underline{U_2}$ kao referentni napon tada vrijedi $\underline{U_2} = U_2$, $\underline{U_1} = U_1(cos\delta + jsin\delta)$, prijenosna karakteristika se može dobiti preko sljedećih jednadžbi:

$$P_1 = P_2 = P = \Re\left\{\underline{U_1}\underline{I}^*\right\} = \Re\left\{\underline{U_2}\underline{I}^*\right\} = U_2 * \Re\{I\} \tag{4-5}$$

Uzimajući u obzir izraz:

$$\left|\underline{U_1} - \underline{U_2}\right| = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 - 2U_1U_2cos\delta} \tag{4-6}$$

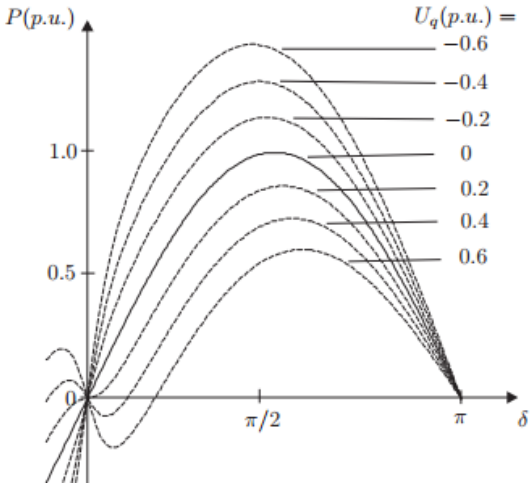
Uvrštavajući relaciju (4-6) u relaciju (4-4), a zatim relaciju (4-4) u relaciju (4-5) dobije se formula za snagu prijenosa:

$$P = \frac{U_1U_2sin\delta}{X}\left(1 - \frac{U_q}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 - 2U_1U_2cos\delta}}\right) \tag{4.-7}$$

Iz relacije (4-7) može se vidjeti da je aktivna snaga prijenosa funkcija injektiranog napona U_q. Karakteristika prijenosa u ovisnosti o kutu prijenosa δ dana je na slici 4.7. Vidljivo je da je za povećanje maksimalne snage prijenosa potrebno injektirati negativni napon U_g te da se u tom

slučaju kut δ za maksimalnu snagu prijenosa pomiče ulijevo. Prilikom smanjenja maksimalne snage prijenosa potrebno je injektirati pozitivni napon te se kut δ za pri maksimalnoj snazi prijenosa pomiče udesno.

Slika 4.7. Karakteristike prijenosa snage u odnosu na kut δ i injektirani napon u vod

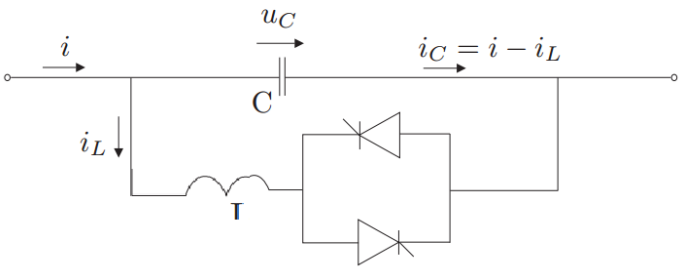


Izvor: G. Glanzmann, FACTS Flexible Alternating Current Systems, EEH – Power System Laboratory, ETH Zurich, 14. January 2015.

4.1.2. Tiristorski upravljivi serijski kondenzator (TCSC)

TCSC je serijski FACTS uređaj s kapacitivnom reaktancijom koji se sastoji od serijske kondenzatorske baterije u paralelnom spoju s tiristorski upravljivom prigušnicom. Omogućava kompenzaciju putem kontinuirano promjenjive ukupne serijske kapacitivne reaktancije. Zasnovan je na tiristorima bez mogućnosti isključenja signalom na upravljačku elektrodu te predstavlja alternativu već ranije spomenutom SSSC – u. Shema TCSC – a je dana na slici 4.8.

Slika 4.8. Shema TCSC –a



Izvor: G. Glanzmann, FACTS Flexible Alternating Current Systems, EEH – Power System Laboratory, ETH Zurich, 14. January 2015.

Parametar koji opisuje glavni krug TCSC – a je λ koji je kvocijent rezonantne frekvencije i frekvencije mreže te prikazan relacijom (4-8):

$$\lambda = \sqrt{\frac{-X_C}{X_L}} \tag{4-8}$$

gdje je X_C kapacitivna reaktancija, a X_L induktivna reaktancija. Raspon vrijednosti u kojima se kreće λ iznosi između 2 i 4. Načini rada TCSC –a opisani su tzv. faktorom pojačanja prikazan relacijom (4-9):

$$K_B = \frac{X_{TCSC}}{X_X} \tag{4-9}$$

Blokirajući način rada TCSC – a je način kada se tiristori nalaze u stanju ne vođenja. Struja voda prolazi samo kroz banku kapaciteta te faktor pojačanja iznosi 1. U ovom načinu rada TCSC radi kao fiksni serijski kondenzator.

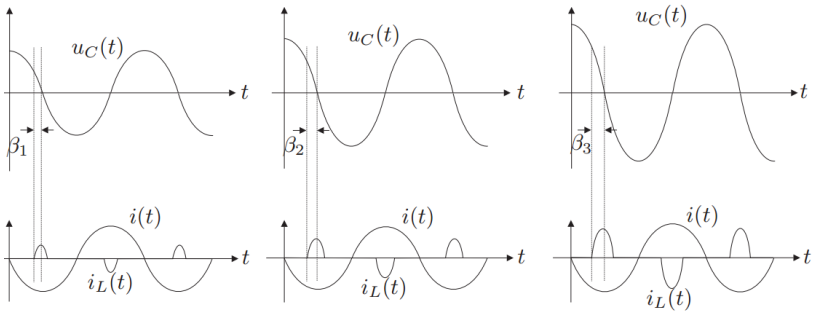
Zaobilazni način rada je način kada je TCSC kontinuirano u stanju vođenja. Tada se ponaša kao paralelan spoj kondenzatora i zavojnice. S obzirom da je reaktancija TCSC –a:

$$X_{TCSC} = \frac{X_L X_C}{X_L + X_C} = \frac{-X_C}{1-\lambda^2} \tag{4-10}$$

napon je induktivan, a faktor pojačanja je negativan. Ako je λ znatno veća od izraza (4-10) tada je amplituda napona na kondenzatoru mnogo manja nego u blokirajućem načinu rada. Ovakav način rada se koristi za ublažavanje struja kvara.

Kapacitivni način se može opisati na sljedeći način. Ako se propusni napon impulsa tiristora nalazi taman prije prolaska kapacitivnog napona kroz nulu, struja pražnjenja kondenzatora će protjecati kroz paralelnu induktivnu granu. Struja pražnjenja dodaje se linijskoj struju voda kroz kondenzator. Ta struja kapacitivni napon koji se dodaje linijskom naponu voda koji je prouzrokovala linijska struja voda. Vršni kapacitivni napon će rasti proporcionalno struji koja prolazi kroz tiristorsku granu. Ta struja ovisi o kutu vođenja tiristora β što se može vidjeti na slici 4.9.

Slika 4.9. Valni oblici pri različitom faktoru pojačanja u kapacitivnom načinu rada



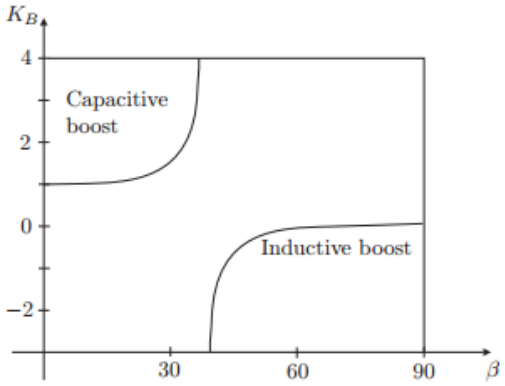
Izvor: G. Glanzmann, FACTS Flexible Alternating Current Systems, EEH – Power System Laboratory, ETH Zurich, 14. January 2015.

Matematička formula faktora pojačanja dana je relacijom (4-11):

$$K_B = 1 + \frac{2}{\pi}\frac{\lambda^2}{\lambda^2-1}\left[\frac{2cos^2\beta}{\lambda^2}(\lambda tan(\lambda\beta) - tan\beta) - \beta - \frac{sin2\beta}{\beta}\right] \quad (4\text{-}11)$$

Zbog člana *tan(λβ)* prethodna jednadžba sadrži asimptotu u $\beta_\infty = \frac{\pi}{2\lambda}$. TCSC radi u kapacitivnom načinu rada kada je kut vođenja $0 < \beta < \beta_\infty$. Primjer odnosa faktora pojačanja i kuta vođenja tiristora dan je na slici 4.10.

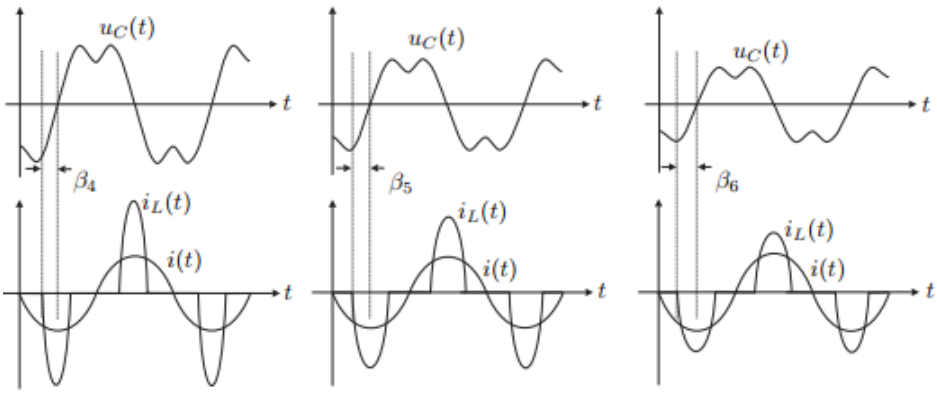
Slika 4.10. Ovisnos faktora pojačanja i kuta vođenja tiristora



Izvor: Izvor: G. Glanzmann, FACTS Flexible Alternating Current Systems, EEH – Power System Laboratory, ETH Zurich, 14. January 2015.

Induktivni način rada može se opisati na sljedeći način. Ako se kut vođenja tiristora poveća iznad β_∞, način rada prelazi iz kapacitivnog u induktivni način rada. U induktivnom načinu rada moguća je pojava velikih struja na tiristorima. Naponski oblik kapacitivnog napona je veoma iskrivljen što je vidljivo na slici 4.11. Zbog takvog naponskog oblika i velikog strujnog naprezanja tiristora ovaj način rada manje je poželjan u stabilnom stanju.

Slika 4.11. Valni oblici pri različitom faktoru pojačanja u induktivnom radu

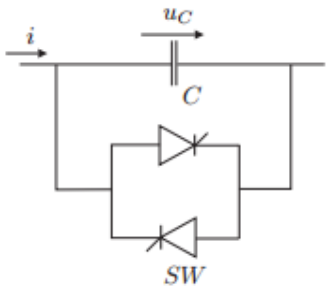


Izvor: G. Glanzmann, FACTS Flexible Alternating Current Systems, EEH – Power System Laboratory, ETH Zurich, 14. January 2015.

4.1.3. Tiristorski uklopivi serijski kondenzator (TSSC)

TSSC je element kao i TCSC ali bez mogućnosti upravljanja kutom vođenja tiristora. Glavna odlika mu je da omogućava skokovito upravljanje serijskom kapacitivom reaktancijom. Shema TSSC –a je prikazana na slici 4.12.

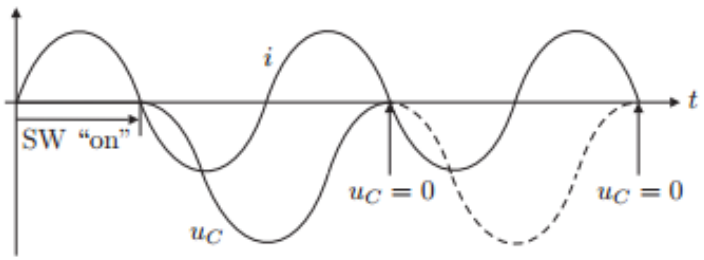
Slika 4.12. Shema TSSC – a



Izvor: G. Glanzmann, FACTS Flexible Alternating Current Systems, EEH – Power System Laboratory, ETH Zurich, 14. January 2015.

Kondenzator je postavljen serijski s vodom u slučaju kada tiristori ne provode struju, inače su premošćeni. Tiristori se isključuju u trenutku prolaska struje kroz nulu. Prema tome, kondenzator je u seriji s vodom samo prilikom prolaska struje voda kroz nulu. Nadalje, tiristor treba biti uključen radi premošćivanja kondenzatora samo za slučaj kada je napon na kondenzatoru jedna nuli kako bi se minimalizirale početna struja tiristora i ostale prijelazne pojave. To može uzrokovati moguće kašnjenje paljenja tiristora. Stoga, ako je kondenzator u seriji s vodom, nabijat će se od nule do maksimalne vrijednosti od strane struje voda u prvom dijelu ciklusa tj. za vrijeme negativne poluperiode struje, a praznit će se do nulte vrijednosti za vrijeme drugog ciklusa tj. za vrije pozitivne poluperiode struje, sve dok ponovno ne bude mogao biti premošten tj. dok napon ne padne na nulu, što se može vidjeti na slici 4.13.

Slika 4.13. Odnos napona i struje na kondenzatoru prilikom vođenja i ne vođenja tiristora



Izvor: G. Glanzmann, FACTS Flexible Alternating Current Systems, EEH – Power System Laboratory, ETH Zurich, 14. January 2015.

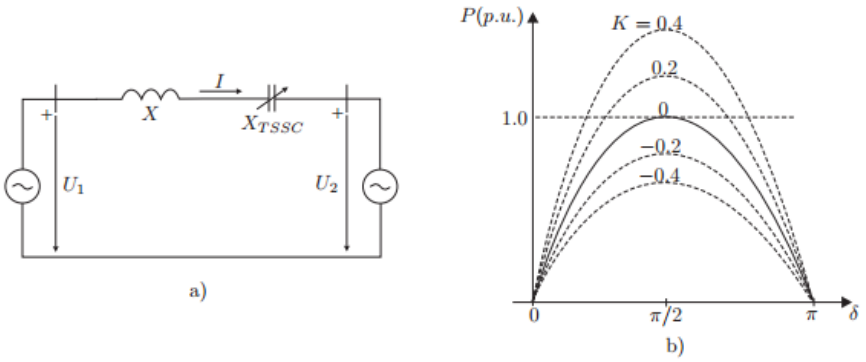
TSSC je građen od nekoliko osnovnih elemenata, prikazanih na slici 4.12, spojenih u seriju. Stupanj serijske kompenzacije je upravljan skokovito na način povećanja ili smanjivanja elemenata u seriji. TCSC se može primijeniti za kontrolu tokova snaga i prigušenja oscilacija snage.

TSSC se može promatrati kao upravljiva kapacitivna reaktancija spojena u seriju s reaktancijom voda. Omjer reaktancije TSSC – a i reaktancije voda je stupanj kompenzacije voda i dan je relacijom (4-12):

$$K = -\frac{-X_{TSSC}}{X} \tag{4-12}$$

Može se promatrati jednostavan dvostrojni sustav prikazan na slici 4.14.a:

Slika 4.14. a) Jednostavni dvostrojni sustav s ugrađenim TSSC – om i b) pripadajući snaga – kut dijagram



Izvor: G. Glanzmann, FACTS Flexible Alternating Current Systems, EEH – Power System Laboratory, ETH Zurich, 14. January 2015.

Sada se može izračunati snaga prijenosa djelatne snage vodom i glasi:

$$P = \frac{U_1 U_2}{X + X_{TSSC}} sin\delta = \frac{U_1 U_2}{X(1-k)} sin\delta \tag{4-13}$$

Iz relacije (4-13) može se vidjeti da snaga prijenosa ovisi o stupnju kompenzacije, a na slici 4.14.b mogu se vidjeti dijagrami za različite stupnjeve kompenzacije. Ova karakteristika jednako vrijedi i za TCSC.

4.1.4. Ostali serijski FACTS uređaji

- **Tiristorski upravljiva serijska prigušnica (TCSR)**

Tiristorski upravljiva serijska prigušnica je uređaj čiji je koncept veoma sličan TCSC – u. Razlika je u tome što se u seriju s vodom stavlja prigušnica. Dakle, TCSR je uređaj s induktivnom reaktancijom koji se sastoji od serijske prigušnice u paralelnom spoju s

tiristorski upravljivom prigušnicom. Moguće je upravljati kutom vođenja tiristora i na taj način je omogućena glatka promjenjiva serijska reaktancija. Pri kutu paljenja od 180°, tiristor nije u stanju vođenja i tada prigušnica djeluje kao limiter struje kvara. Pri smanjenju kuta upravljanja tiristora, smanjuje se i ukupna impedancija sve dok kut vođenja tiristora ne poprimi vrijednost 90° te tada ukupna induktivna reaktancija poprima vrijednost impedancije paralelne kombinacije dviju prigušnica. Također i ovaj uređaj može doći u izvedbi s jednom velikom jedinicom ili nekoliko manjih serijskih jedinica.

- **Tiristorski uklopiva serijska prigušnica (TSSR)**

Uređaj je isti kao i TCSR, ali bez mogućnosti upravljanja kutom vođenja tiristora. Tiristori su kao i kod TSSC, u mogućnosti ili punog vođenja ili nultog vođenja. TSSR omogućava skokovito upravljanje serijskom induktivnom reaktancijom.

4.2. Poprečne FACTS naprave

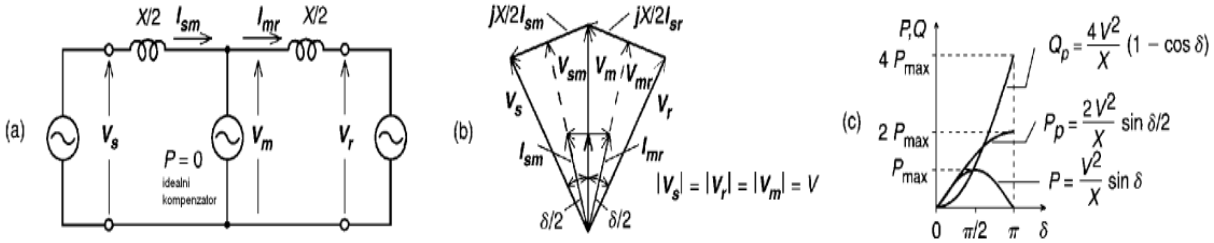
Kao i serijske naprave, poprečne FACTS naprave se izvode u obliku promjenjivih impedancija, promjenjivih elektroničkih izvora napona ili njihove kombinacije. Sve poprečne naprave injektiraju struju u čvorište povezivanja sa sustavom. Kada se injektirana struja nalazi u položaju fazne okomice u odnosu prema naponu čvorišta priključka, tada poprečna naprava proizvodi ili troši promjenjivu jalovu snagu, a za slučaj odstupanja od faznog položaja pojavljuje se i djelatna snaga.

Ideja poprečne kompenzacije jest mijenjanje prirodnih električnih veličina prijenosnog voda kako bi ga se učinilo prilagodljivim na promjenu opterećenja. Tako se poprečne prigušnice koriste za snižavanje napona u uvjetima malih opterećenja dok se poprečni kondenzatori koriste za podizanje napona pri velikim opterećenjima. Tako je krajnji cilj poprečne kompenzacije u povećanju prijenosne moći radi poboljšanja osobina sustava u stacionarnom stanju i prijelaznim stanjima. Poprečne FACTS naprave se koriste i za dinamičku regulaciju napona radi poboljšanja prijelazne stabilnosti i prigušenja njihanja.

Korištenjem jednostavnog dvostrojnog sustava i idealnog kompenzatora smještenog na sredini voda, moguće je postaviti temeljne jednadžbe koje opisuju prednosti poprečne regulacije napona što je i prikazano na slici 4.15. Na slici pod c) se može vidjeti ovisnost djelatne i jalove snage o kutu prijenosa te se vidi da je korištenjem poprečne kompenzacije u sredini voda značajno povećanja snaga prijenosa uz izrazito povećanje potrebe za jalovom snagom. Kompenzacija na sredini voda u ovom primjeru je najbolje rješenje s obzirom da s obzirom da

je pad napona najveći u sredini voda. Korištenjem kompenzacije u sredini voda, vod se segmentira na dva jednaka dijela s jednakim maksimalnim prijenosnim snagama. Za slučaj nejednakih segmenata, maksimalna snaga prijenosa dužeg segmenta određivala bi ograničenje prijenosa ukupnog voda.

Slika 4.15. Kompenzacija pomoću poprečne naprave; a) dvostrojni sustav, b) Vektorski dijagram i c) ovisnost djelatne i jalove snage o kutu prijenosa



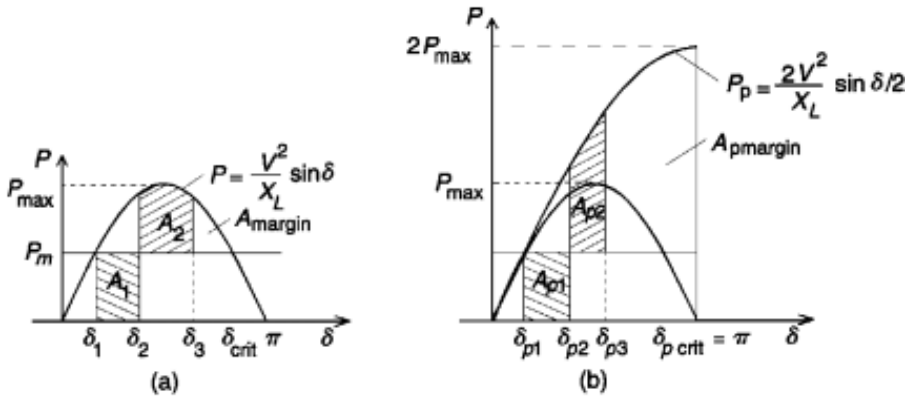
Izvor: N. Dizdarević, Mogućnost povećanja prijenosne moći EES –a korištenjem konvencionalnih i FACTS naprava, Energija, Vol 50 (2001), No 5, str. 323-348

Jednako tako se u razmatranje može uzeti poseban slučaj radijalnog prijenosa kada se pasivni teret koji troši snagu P pri određenom naponu priključi na kraj voda. Bez primjene kompenzacije bi u toj točki bio veoma promjenjiv s obzirom na promjenu tereta i faktora snage te bi P – V krivulja izgledala kao na slici 3.6. Dodavanjem poprečne kompenzacije na kraj voda se povećava maksimalna snaga prijenosa te se reguliranjem napona u čvorištu održava konstantan napon te čime se rješava negativne pojave poput maskiranja koljena. P – V krivulja s regulacijom napona u čvorištu može se vidjeti na slici 3.7. Održavanje napona u zadanom čvorištu je važno i kod velikih promjena opterećenja ili ispada generatora ili vodova na početnoj strani prijenosa. Primjerice, ispad jednog proizvodnog izvora može iznenadno povećati opterećenja na preostalom dijelu prijenosnog sustava čime se uzrokuje ozbiljan pad napona što u konačnici dovodi do naponskog sloma.

Kao i kod serijskih FACTS naprava, uz odgovarajuću brzinu upravljanja, moguće je utjecati na promjene tokova snaga u prijelaznim stanjima. Prema kriteriju jednakih površina značajna je razlika između veličina margina prijelazne stabilnosti. Margina u slučaju bez primjene kompenzacije A_{margin} mnogo je manja od margine za slučaj poprečne kompenzacije $A_{pmargin}$ što je i vidljivo na slici 4.16. Kompenzator ne sudjeluje u razmjeni djelatne snage sa sustavom već kontinuirano dobavlja jalovu snagu. Potreba za jalovom snagom se povećava u stanjima velikog prijenosa snage, a pri uvjetima maksimalnog prijenosa poprima dvostruko veći iznos od djelatne snage. Iz ekonomskih razloga najveća izlazna snaga kompenzatora je

manja od snage koju zahtjeva potpuna kompenzacija. Stoga realni kompenzatori djeluju kao idealni samo dok su potrebe tereta manji od nazivne snage kompenzatora. Iznad nazivne snage kompenzatora, on postaje konstantna reaktancija ili izvor konstantne struje što ovisi o izvedbi. Stoga se snaga mkompenzatora određuje studijskim radovima kako bi se upravljanje tokovima snage ostvarilo uz zadovoljavajuću stabilnost prilikom ispada elemenata.

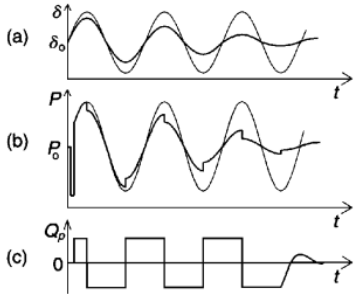
Slika 4.16. Kriterij jednakih površina u primjeni poprečne kompenzacije; a) bez primjene i b) s primjenom kompenzacije



Izvor: N. Dizdarević, Mogućnost povećanja prijenosne moći EES –a korištenjem konvencionalnih i FACTS naprava, Energija, Vol 50 (2001), No 5, str. 323-348

Poprečnu kompenzaciju je moguće, kao i serijsku, primijeniti radi prigušenja elektromehaničkih njihanja. Slično kao i kod serijske kompenzacije upravlja se sa izlaznom snagom generatora pa se tako na slici 4.17.c vidi da se napon u središtu voda povećava te da izlazna jalova snaga poprima pozitivnu vrijednost pri $d\delta/dt>0$, a da se napon u središtu voda smanjuje te da izlazna jalova snaga poprima negativnu vrijednost pri $d\delta/dt<0$. U ovom primjeru je upravljanje izlaznom jalovom snagom skokovito, dok se u uvjetima prigušenja malih oscilacija koristi kontinuirana vrsta upravljanja [14].

Slika 4.17. Prigušenje njihaja primjenom poprečne kompenzacije; a) kut genratora, b) djelatna snaga prijenosa i c) izlazna jalova snaga kompenzatora



Izvor: N. Dizdarević, Mogućnost povećanja prijenosne moći EES –a korištenjem konvencionalnih i FACTS naprava, Energija, Vol 50 (2001), No 5, str. 323-348

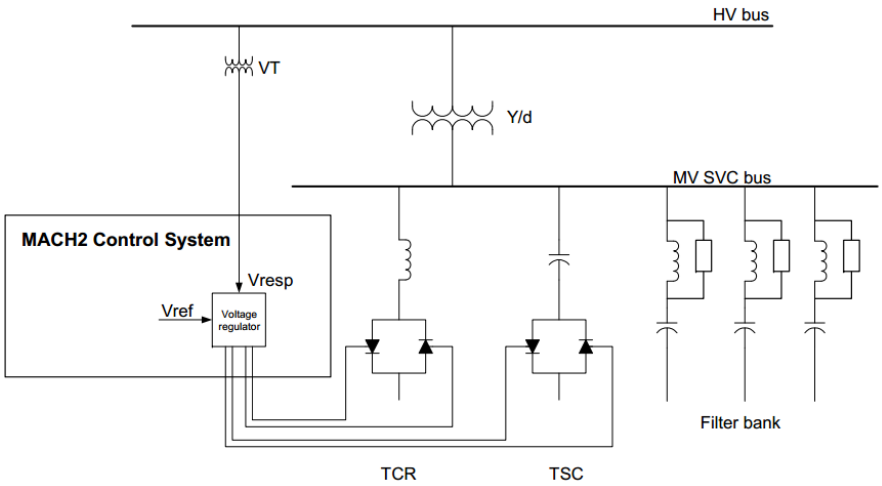
4.2.1. Statički VAr kompenzator (SVC)

SVC je statički generator jalove snage u poprečnom spoju koji se koristi u radi razmjene kapacitivne ili induktivne struje sa sustavom kako bi upravljao sa specifičnim parametrima sustava (uobičajeno s naponom čvorišta) [14].

SVC je zasnovan na tiristorima koji nemaju mogućnost isključenja signalom na upravljačku elektrodu. Sastoji se od više uređaja među kojima su tiristorski upravljiva prigušnica (TCR), tiristorski uklopiva prigušnica (TSR) koji služe za apsorpciju jalove snage te tiristorski uklopiv kondenzator (TSC) za dobavu jalove snage. Uz nabrojano još se sastoji i od harmoničkih filtara. Ima i svoj upravljački sustav MACH 2 te je spojen preko transformatora na visoki napon. Primjer jednog SVC – a je prikazan na slici 4.18.

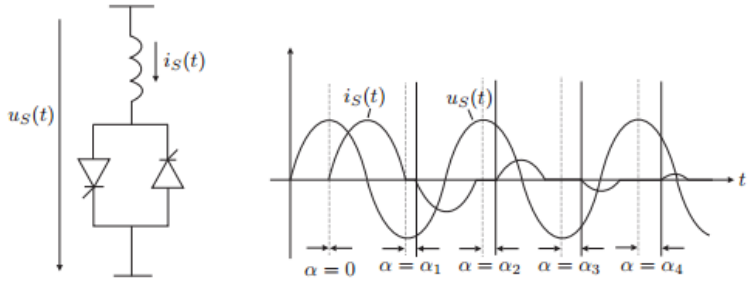
TCR je tiristorski upravljiva prigušnica u poprečnom spoju čija je efektivna reaktancija kontinuirano promjenjiva putem djelomičnog vođenja tiristora. Strujom prigušnice se upravlja tako da se upravlja kutom paljenja tiristora te se na slici 4.19. može vidjeti da interval vođenja struje prigušnice ovisi o trenutku paljenja tiristora u odnosu na iznos napona u svakoj poluperiodi. Za kut $\alpha = 0$ amplituda je maksimalna dok je za kut $\alpha = 90$ amplituda struje jednaka nuli te struja en protječe. TSR je poduređaj SVC – a kojem se za razliku od TCR – a ne može kontinuirano upravljati reaktancijom već samo skokovito putem pune i nulte vodljivosti tiristora.

Slika 4.18. Struktura SVC uređaja



Izvor: P. Andersson, DynamicS hunt Compensation, ABB FACTS, 09.20.2012.

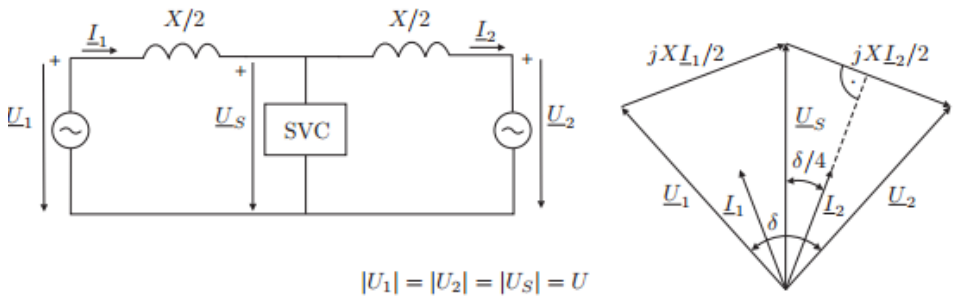
Slika 4.19. TCR i ovisnost struje o kutu paljenja tiristora



Izvor: G. Glanzmann, FACTS Flexible Alternating Current Systems, EEH – Power System Laboratory, ETH Zurich, 14. January 2015.

Ako se TCR ili TSR postave u sredini voda radi održavanja napona na sredini voda u iznosu kao na krajevima voda, snaga prijenosa će se udvostručiti. To se može objasniti sljedećim primjerom vidljivim na slici 4.20.

Slika 4.20. Dvostrojni sustav s SVC – om u sredini voda



Izvor: G. Glanzmann, FACTS Flexible Alternating Current Systems, EEH – Power System Laboratory, ETH Zurich, 14. January 2015.

Pretpostavka je da su naponi na krajevima voda i na sredini voda jednakog iznosa. Napon $\underline{U}_2$ je uzet kao referentni napon pa stoga vrijedi:

$$\overline{U}_2 = U,\ \overline{U}_1 = Ue^{j\delta},\ \overline{U}_s = Ue^{j\delta/2} \tag{4-14}$$

Iz fazorskog dijagrama sa slike 4.20, primjenom trigonometrije može se izraziti $\underline{I}_2$:

$$\underline{I}_2 = \frac{4U}{x}\sin\left(\frac{\delta}{4}\right) * e^{j\delta/4} \tag{4-15}$$

Stoga prenesena snaga iznosi:

$$P = \Re\left\{\overline{U}_1 * \overline{I}_1^*\right\} = \Re\left\{\overline{U}_2 * \overline{I}_2^*\right\} \tag{4-16}$$

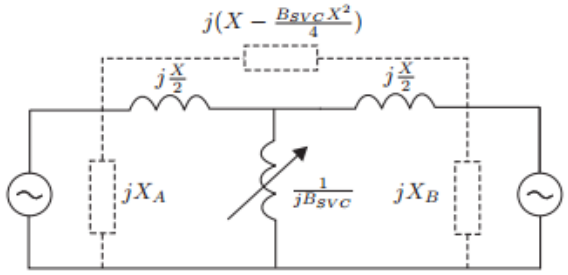
$$= \Re\left\{\frac{4U^2}{X}\sin(\delta/4)\left(\cos(\delta/4) - jsin(\delta/4)\right)\right\} \tag{4-17}$$

$$= \frac{2U^2}{X}\sin(\delta/2) \tag{4-18}$$

Stoga se iz zadnje relacije vidi da prenesena snaga udvostručena. Ipak u prethodnim razmatranjima se pretpostavljalo da SVC je u mogućnosti osigurati iznos napona na sredini voda kao i na krajevima voda za bilo koji kut prijenosa. Ako se SVC sagleda kao prilagodljiva susceptancija B_{svc} tada postoje ograničenja te iste susceptancije. Što se više povećava kut prijenosa, potrebna je veća susceptancija jer je za jednaki napon potrebno osigurati veću struju. Ako vrijednost susceptancije dosegne svoju gornju granicu, tada jednadžba (4-18) više ne vrijedi. To se može pokazati na primjeru kada bi u sustavu sa slike 4.20 izvršili Y - Δ transformaciju elemenata što je prikazano na slici 4.21. Paralelne reaktancije X_A i X_B ne igraju nikakvu ulogu zbog pretpostavke da su naponi na početku i na kraju voda konstantni. Tako jednadžba prenesene snage glasi:

$$P = P_2 = P_2 = \frac{U_1 U_2}{X - \frac{X^2 B_{SVC}}{4}} \tag{4-19}$$

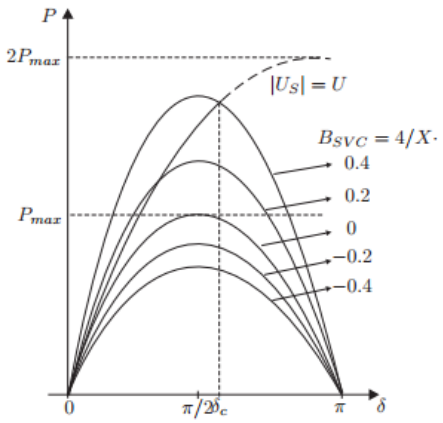
Slika 4.21. Dvostrojni sustav nakon Y - Δ transformacije



Izvor: G. Glanzmann, FACTS Flexible Alternating Current Systems, EEH – Power System Laboratory, ETH Zurich, 14. January 2015.

Prema prethodnoj formuli, može se odrediti karakteristika ovisnosti prenesene snage o kutu prijenosa koja je prikazana na slici 4.22.

Slika 4.22. Karakteristika prijenosa snage u ovisnosti o kutu prijenosa za SVC



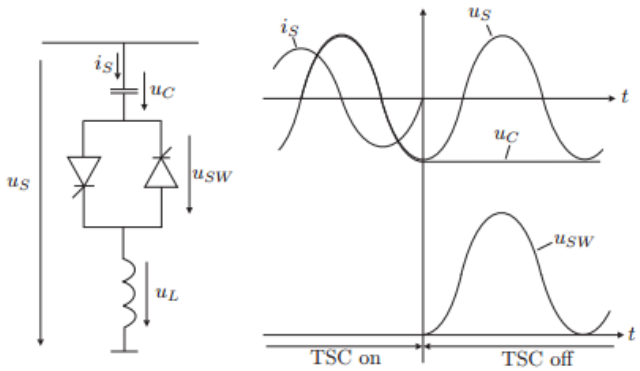
Izvor: G. Glanzmann, FACTS Flexible Alternating Current Systems, EEH – Power System Laboratory, ETH Zurich, 14. January 2015.

Sve dok je SVC sposoban održati napon na sredini voda jednakim kao na krajevima voda, karakteristka slijedi krivulju $|U_S| = U$ sve do točke gdje ta krivulja presijeca krivulju maksimalne vrijednosti susceptancije. Nakon te točke susceptanciju nije moguće povećavati te karakteristika tada slijedi krivulju maksimalne susceptancije.

Utjecaj viših harmonika, što se posebno odnosi na 13. i 15. pa nadalje, se zanemaruju jer nemaju skoro nikakav utjecaj na električne prilike u čvorištu priključka SVC – a. Problem nižih harmonika rješava se uporabom aktivnih ili pasivnih filtra koji se nalaze u samoj strukturi SVC – a i prikazani su na slici 4.18. Pošto se SVC spaja na sustav preko transformatora, nužno je da je SVC spojen u trokut radi nepropuštanja harmonika u sustav pošto u tom slučaju prodire tek 7. harmonik i svaki sljedeći neparni.

TCS je poduređaj SVC sustava. On je tiristorski uklopivi kondenzator u paralelnom spoju čija se efektivna reaktancija mijenja u skokovima pute nulte ili pune vodljivosti tiristora. TSC se isključuje u trenutku prolaska struje kroz nulu. U tom trenutku vrijednost napona kondenzatora dostiže maksimalnu vrijednost. Isključen kondenzator ostaje nabijen te napon na njemu ostaje maksimalan dok se napon na tiristorima koji su u stanju nevođenja mijenja u fazi s izmjeničnim naponom mreže što se može vidjeti na slici 4.23.

Slika 4.23. TSC i valni oblici napona i struje na kondenzatoru i tiristotu



Izvor: G. Glanzmann, FACTS Flexible Alternating Current Systems, EEH – Power System Laboratory, ETH Zurich, 14. January 2015.

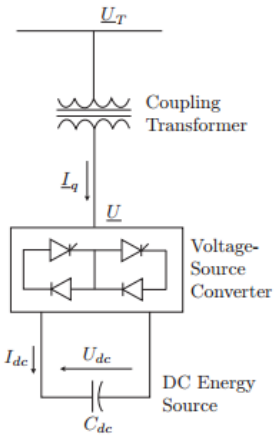
Kada se kondenzator ponovno priključuje na napon mreže tj. prilikom ponovnog paljenja tiristora, veoma je bitno da je napon na kondenzatoru jednak naponu napajanja u samom trenutku uklapanja tiristora pa će tada struja biti konačna, jer će u protivnom poteći velike struje kroz kondenzator. Ipak, veličina promjene struje je veoma visoka u usporedbi s strujama koju mogu podnijeti sami tiristori. Radi ograničavanja tih promjena struja, u TSC je nužno umetnuti dodatnu prigušnicu u seriju s tiristorima i kondenzatorom, a još i onemogućuje nastanak rezonancije s izmjeničnom mrežom.

Sva električna oprema se mora odabrati na način da može izdržati različita električna preopterećenja koja nisu vezana uz normalno pogonsko stanje. Kod SVC – a veoma je bitno obratiti pozornost na tiristorske prekidače koji omogućavaju uklapanje TSC – a i TCR – a. Neki od kvarova koji su mogući na tiristorima su [15]: paljenje tiristora u krivom trenutku, nedostatak paljenja na jednom od tiristora ili cijeloj sekciji, različita mehanička oštećenja tiristora, naponska i strujna preopterećenja tiristora. Stoga je potrebno vršiti stalni nadzor elektirčnih krugova kako bi se na vrijeme utvrdilo stanje pojedinih tiristora te se po potrebi upotrijebile adekvatne mjere. Od previsokih temperatura se tiristori štite sustavom hlađenja, a najznačajniji sustav je sustav hlađenja vodom.

4.2.2. Statički sinkroni kompenzator (STATCOM)

STATCOM je statički sinkroni generator koji djeluje kao poprečno spojeni statički var kompenzator čija kapacitivna ili induktivna izlazna struja mogu biti kontrolirane neovisno o naponu izmjeničnog sustava [16]. STATCOM je upravljivi reaktivni izvor. Osigurava podršku napona generirajući ili apsorbirajući jalovu snagu u čvorištu na koji je spojen bez potrebe veliki vanjskih prigušnica ili banki kapaciteta. Shema STATCOMA je prikazana na slici 4.24.

Slika 4.24. Shema STATCOMA



Izvor: G. Glanzmann, FACTS Flexible Alternating Current Systems, EEH – Power System Laboratory, ETH Zurich, 14. January 2015.

Nabijeni kondenzator C_{dc} osigurava istosmjerni napon pretvaraču koji proizvodi upravljivi trofazni izlazni napon koji ima frekvenciju izmjeničnog sustava. Mijenjajući amplitudu izlaznog napona $\underline{U}$ moguće je upravljati jalovom snagom koja se razmjenjuje između pretvarača i izmjeničnog sustava. Za slučaj kada amplituda izlaznog napona $\underline{U}$ bude veća od amplitude napona izmjeničnog sustava $\underline{U}_T$, STATCOM se ponaša kao kondenzator, dok se za

slučaj smanjenja amplitude napona U STATCOM ponaša kao prigušnica. Ako su amplitude jednake tada nema razmjene energije.

Za slučaj kada se koristi istosmjerni kondenzator, energija pohranjena u tom kondenzatoru se troši na unutarnje gubitke pretvarača. Ako se podesi da izlazni napon pretvarača malo kasni za naponom izmjeničnog sustava, pretvarač će apsorbirati male količine aktivne snage iz izmjeničnog sutava da bi se kompenzirali gubici u pretvaraču. Taj način promjene kuta između napona također se može iskoristiti za kontrolu apsorpcije ili generacije jalove snage na način da se utječe na iznos napona kondenzatora U_{dc}.

Ako se umjesto kondenzatora koristi baterija kao izvor energije tada pretvarač može upravljati razmjenom kako reaktivne tako i aktivne snage s izmjeničnim sustavom. Mogućnost upravljanja aktivnom snagom značajno je svojstvo STATCOM – a koje se može iskoristiti prilikom prigušenja oscilacija, izjednačavanja vršne potražnje i osiguravanja neprekidnog napajanja kritičnog tereta. Neki od tih skladišta energije su:

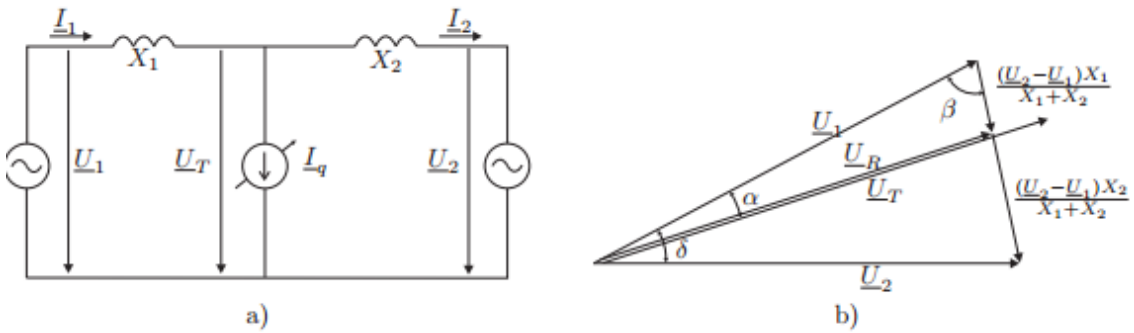
- Statički sinkroni generator (SSG)
- Baterijski sustav uskladištenja energije (BESS)
- Sustav uskladištenja energije pomoću supravodljivog magneta (SMES)

Formula za prenesenu snagu zahtjeva popriličan proračun. Da bi se došlo do njega koriste se varijable i pripadni vektorski dijagram sa slike 4.25. Na kraju formula za prenesenu djelatnu snagu iznosi [16]:

$$P = \frac{U_1 U_2 sin\delta}{(X_1+X_2)} * \left(1 + \frac{I_q}{U_R} * \frac{X_1 X_2}{(X_1+X_2)}\right) \tag{4-20}$$

Gdje je $\underline{U_R}$ priključni napon STATCOM – a za slučaj kada je STATCOM van rada, odnosno kada je struja $\underline{I_q} = 0$.

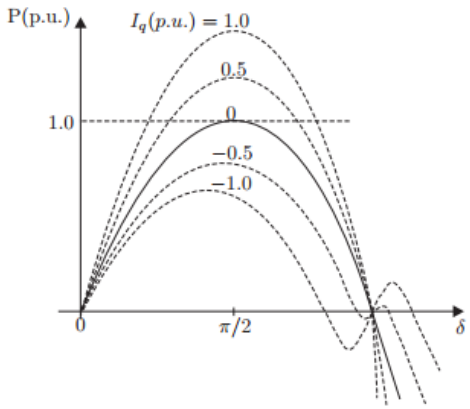
Slika 4.25. Dvostrojni sustav sa STATCOM – om



Izvor: G. Glanzmann, FACTS Flexible Alternating Current Systems, EEH – Power System Laboratory, ETH Zurich, 14. January 2015.

Nakon što je poznata formula prenesene aktivne snage dana je i karakteristika prikazana na slici 4.26. Na slici se može vidjeti karakter STATCOM – a prilikom injektiranja i apsorpcije jalove struje gdje se prilikom injektiranja postiže povećanje maksimalne snage prijenosa, a prilikom apsorpcije se postiže smanjenje maksimalne snage prijenosa.

Slika 4.26. Karakteristika prijenosa snage u ovisnosti o kutu prijenosa za STATCOM

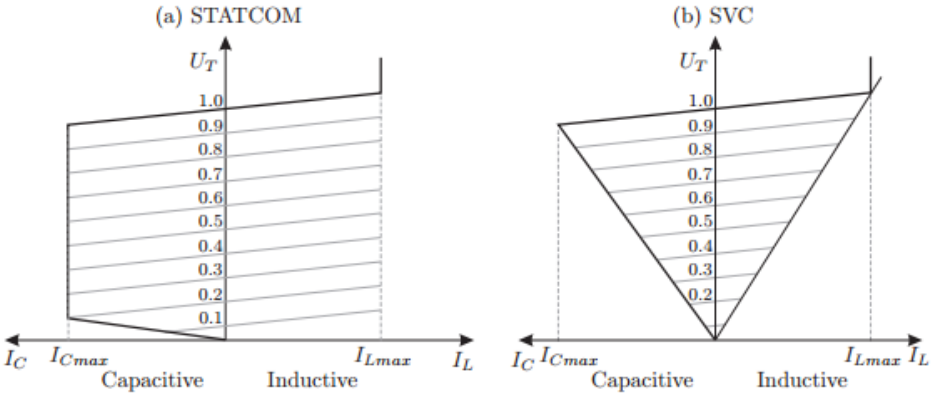


Izvor: G. Glanzmann, FACTS Flexible Alternating Current Systems, EEH – Power System Laboratory, ETH Zurich, 14. January 2015.

- **Usporedba STATCOM – a i SVC – a**

Iako imaju istu funkciju, razlikuje im se princip rada tako što STATCOM radi kao paralelni sinkroni izvor napajanja, dok SVC djeluje kao reaktivna admitancija. Iz tog razloga STATCOM ima bolju funkcionalnu karakteristiku, bolju izvedbu i fleksibilnost. Iz V – I karakteristike prikazane na slici 4.27. može se vidjeti da su u linearnom dijelu veoma slične. Ipak, u nelienarnom području rada, za razliku od SVC – a, STATCOM može kontrolirati izlaznu vrijednost struje povećanjem opsega kapaciteta i induktiviteta., neovisno o izmjeničnom naponu sustava. Kod SVC – a maksimalna ostvariva kompenzacijska struja linearno se povećava s izmjeničnim naponom. Tako se može zaključiti da je STATCOM efikasniji od SVC – a u pružanju naponske podrške prilikom većih poremećaja u sustavu, gdje se krivulja napona nalazi van linearnog područja rada kompenzacije. Vremenski odzivi i širina naponske regulacije su također bolji kod STATCOM – a. Također SVC nema mogućnost kompenzacije aktivne snage.

Slika 4.27. V – I karakteristike STATCOM – a i SVC – a



Izvor: G. Glanzmann, FACTS Flexible Alternating Current Systems, EEH – Power System Laboratory, ETH Zurich, 14. January 2015.

4.3. Kombinirane FACTS naprave

- **Kombinirane serijsko – serijske naprave**

Serijsko – serijske naprave imaju moguću izvedbu u dva oblika. U prvom obliku se koordinirano upravlja odvojenim serijskim napravama u sustavu s više vodova dok je drugi oblik objedinjena naprava kod koje serijske grane omogućavaju neovisnu serijsku kompenzaciju jalove snage za svaki vod te putem postojeće veze omogućavaju transfer djelatne snage. Time se postiže ravnoteža između toka djelatne i jalove snage u vodovima te se tako maksimizira iskoristivost prijenosnog sustava.

- **Kombinirane serijsko – poprečne naprave**

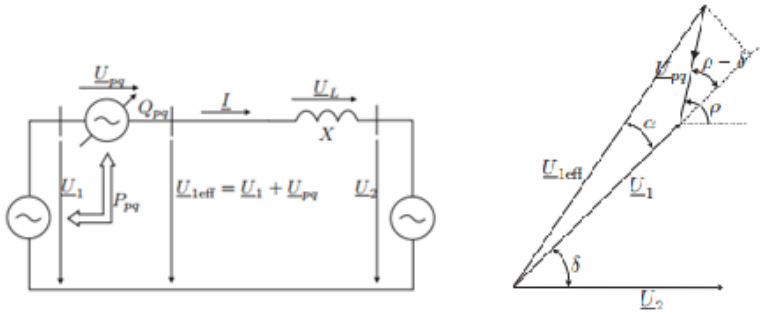
Ove naprave također imaju moguću izvedbu u dva oblika. Prvi oblik su razdvojene poprečne i serijske naprave kojima se koordinirano upravlja, dok su drugi oblik objedinjene poprečne i serijske naprave. Princip rada im je da poprečne naprave injektiraju struju u sustav, a serijske naprave injektiraju napon u seriji s vodom. Prilikom objedinjenja poprečnih i serijskih naprava javlja se razmjena djelatne snage između serijske i poprečne naprave putem istosmjerne veze. Moguća je i izvedba kada svaki vod zahtjeva posebno serijsku napravu radi sprječavanja ispada voda. Za upravljanje tokovima snaga i prigušenja njihanja, serijska naprava je mnogo bolji izbor, dok je za regulaciju napona u priključenom čvorištu poprečna naprava mnogo bolji izbor. Kombiniranjem serijske i poprečne naprave postižu se najbolja svojstva od obje vrste.

4.3.1. Objedinjeni regulator toka snage (UPFC)

UPFC je kombinacija STATCOMA i SSC – a koji su povezani istosmjernom vezom koja omogućuje dvosmjerni tok aktivne snage između izlaznih terminala dva povezana uređaja te su upravljani na način da omoguće istovremenu aktivnu i reaktivnu kompenzaciju bez korištenja vanjskog izvora energije. UPFC se koristi za trenutnu i dinamičku kompenzaciju izmjeničnih prijenosnih sustava. U mogućnosti je kontrolirati sve parametre sustava koji utječu na tokove snaga te neovisno upravljati aktivnim i reaktivnim tokovima snaga u vodu.

UPFC je sinkroni naponski izvor s upravljivom amplitudom napona U_{pq} i kutom ρ koji je postavljen u seriju s vodom što se može vidjeti na slici 4.28. Naponski izvor razmjenjuje aktivnu i reaktivnu snagu s prijenosnim sustavom, a budući da može proizvoditi samo reaktivnu snagu, aktivna snaga mora biti dopremljena putem izvora aktivne snage poput dopremanja snage s jedne od sabirnica ili putem spremnika aktivne snage.

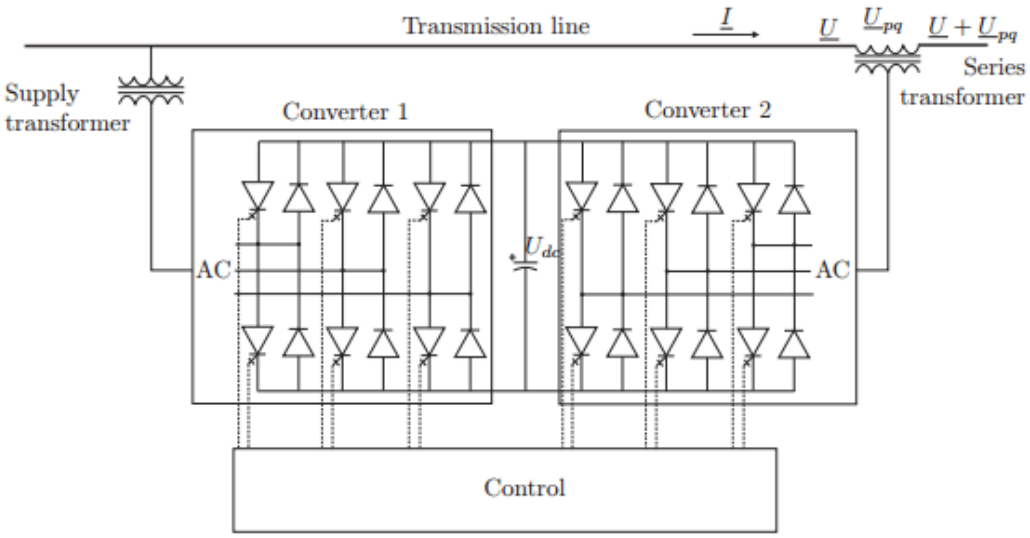
Slika 4.28. Koncept UPFC – a u dvostrojnom sustavu s pripadajućim fazorskim dijagramom



Izvor: G. Glanzmann, FACTS Flexible Alternating Current Systems, EEH – Power System Laboratory, ETH Zurich, 14. January 2015.

UPFC se sastoji od dva naponska pretvarača koja su povezana istosmjernom vezom kao što se može vidjeti na slici 4.29. Aktivna snaga slobodno može protjecati u oba smjera između izmjeničnih priključaka pretvarača te svaki pretvarač može neovisno generirati ili apsorbirati reaktivnu snagu. Pretvarač 2 injektira napon $\underline{U}_{pq,}$ s upravljivom amplitudom i kutom ρ u seriju s vodom te tako djeluje kao naponski izvor što je i prikazano na slici 4.28. Reaktivna snaga se generira unutar pretvarača te se razmjenjuje sa sustavom preko izmjeničnih priključaka pretvarača. Aktivna snaga se uzima iz mreže putem poprečnog elementa te se pomoću pretvarača pretvara u istosmjernu snagu koja se potom ponovno pretvara u izmjeničnu veličinu te se preko transformatora ponovno injektira u mrežu. Poprečna jedinica također može izmjenjivati reaktivnu snagu s vodom te tako osigurati neovisnu poprečnu reaktivnu kompenzaciju voda.

Slika 4.29. Struktura UPFC – a



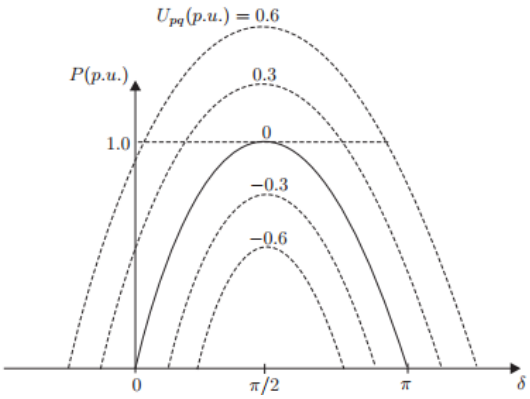
Izvor: G. Glanzmann, FACTS Flexible Alternating Current Systems, EEH – Power System Laboratory, ETH Zurich, 14. January 2015.

Za sustav na slici 4.28 prenesena aktivna snaga iznosi [16]:

$$P \underbrace{\frac{U_1 U_2}{X}}_{P_0} sin\delta + \underbrace{\frac{U_2 U_{pq}}{X}}_{\Delta P} sin\rho \tag{4-21}$$

Iz relacije (4-21) se može vidjeti da napon U_{pq} ima maksimalan utjecaj na mrežu kada je kut tog napona ρ jednak 90°. Na slici 4.30. se može vidjeti prenesena snaga ovisna o kutu prijenosa. Može se vidjeti da se karakteristika pomiče gore ili dolije u ovisnosti o amplitudi napona UPFC –a.

Slika 4.30. Karakteristika prijenosa snage u ovisnosti o kutu prijenosa za $\rho=90°$



Izvor: G. Glanzmann, FACTS Flexible Alternating Current Systems, EEH – Power System Laboratory, ETH Zurich, 14. January 2015.

Ostali kombinirani FACTS uređaji su:

- Regulator toka snage među vodovima (IPFC)
- Tiristorski upravljivi zakretni transformator (TCPST)
- Međufazni regulator snage (IPC)

4.4. Usporedba troškova instalacije

Prilikom faze planiranja kompenzacije jalove snage nužno je držati se sljedećih preporuka [14]:

- Najprije primijeniti mehanički uklopivu poprečnu kompenzaciju s niskim troškovima, a zatim u distribuciji kompenzirati blizu jediničnog faktora snage, na visokom naponu kompenzirati mrežu čiji su vodovi opterećeni iznad prirodne snage, izbjeći transfer jalove snage između različitih naponskih razina, razmotriti lokacije primjene transformatora s promjenjivim prijenosnim omjerom pod opterećenjem te na kraju razmotriti primjenu naprednijih naprava zasnovanih na energetskoj elektronici,
- Razmotriti primjenu serijske kompenzacije na dužim vodovima najprije s mehanički uklopivim serijskim kondenzatorima, a zatim i s TSCS ili SSSC (pogotovo ako postoji mogućnost pojave subsinkrone rezonancije)
- Analizirati karakteristike tereta za potrebe primjene SVC – a i STATCOM – a
- U preliminarnim analizama koristiti V – Q i P – V metode proračuna najvećih opterećenja i radnih točki
- Koristiti simulaciju u vremenskoj domeni za konačnu analizu i koordinaciju upravljanja
- Kod događaja s ekstremnom niskom vjerojatnosti nastanka, razmotriti mjere rasterećenja

Jedan od glavnih razloga gore navedenih preporuka su svakako troškovi. Predvidivi troškovi dobave i instalacije opreme u postojećem postrojenju iznose [14]:

- 500 kV serijski kondenzator, $ 3.0 mil + $ 14.4 / kVAr
- 500 kV poprečni kondenzator, $ 1.4 mil + $ 5.3 / kVAr
- 230 kV poprečni kondenzator, $ 0.3 mil + $ 5.4 / kVAr
- 500 kV poprečna prigušnica, $ 1.7 mil + $ 10.4 / kVAr

Raspon troškova suvremenih naprava predviđa se prema sljedećim poznatim troškovima:

- SVC koji se sastoje od 100 MVAr TSR I 3 x 100 MVAr TSC, $ 31 / kVAr
- SVC snage ±350 MVAr (2 x TCR i 2 x TSC), $ 35 / kVAr
- STATCOM, $ 50 / kVAr
- SSSC, $ 50 / kVAr
- TCSC, $ 40 / kVAr
- Serijska grana UPFC – a, $ 50 / kVAr
- Poprečna grana UPFC – a, $ 50 / kVAr
- Sinkroni kompenzator nazivne snage + 300(360)/-165 MVAr, $ 50 / kVAr

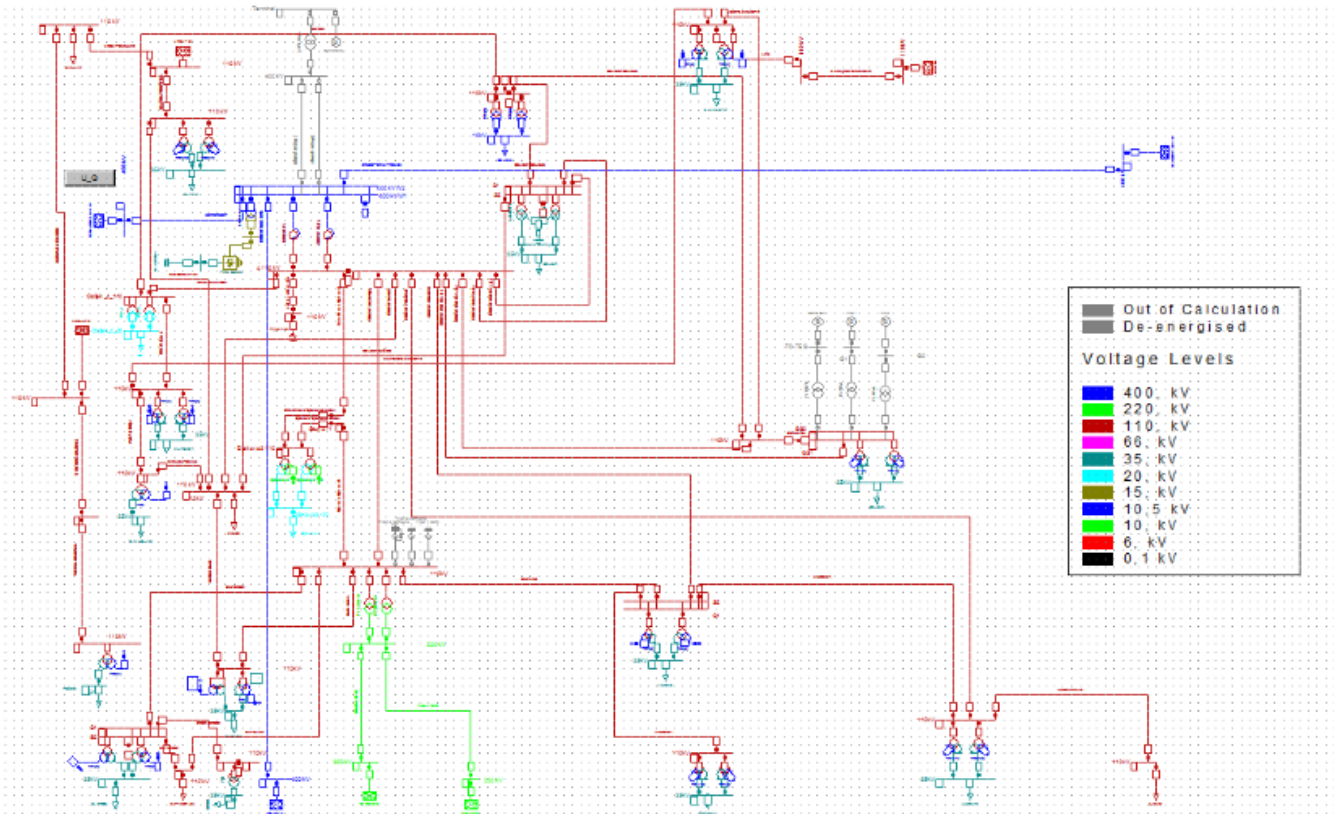
Sve nabrojane troškove različitih kompenzacijskih uređaja moguće je usporediti s troškovima prilikom izgradnje visokonaponskog prijenosnog voda čiji je nazivni napon 400 kV i čija duljina iznosi 100 km. Ako bi se uzela kamatna stopa od 8% i očekivani životni vijek od 30 godina, tada bi predvidivi troškovi koji su ovisni i o izboru trase iznosili:

- Troškovi investicije $ 30 mil + gubici $ 30 / MWh

5. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

U prvom dijelu eksperimentalnog rada provest će se analiza stvarnih naponskih prilika tijekom jedne godine u TS Ernestinovo na 400 kV strani. Analizirat će se iznosi napona na 400 kV sabirnici kao i naponi na vodovima Ernestinovo – Žerjavinec, Ernestinovo – Ugljevik, Ernestinovo – Srijemska Mitrovica, Ernestinovo – Pecs 1 i Ernestinovo – Pecs 2 da bi se mogla napraviti usporedba s dozvoljenima naponima propisanim mrežnim pravilima navedenim u poglavlju 2.2.3. Izvršiti će se provjera uključenosti pojedinog voda kroz godinu te će se na osnovu toga izraditi tablica istovremenog pogona navedenih vodova da bi se za daljnje simulacije odredili kritični vodovi koji će utjecati na odabir optimalnog tipa FACTS uređaja. Nakon priključenja FACTS uređaja na 400 kV sabirnicu u TS Ernestinovo vršiti će se simulacije u slučaju: stacionarnog stanja s vodovima u pogonu izabranim na osnovu obrađenih podataka, prilikom ispada navedenih vodova, prilikom kratkog spoja u TS Ernestinovo, prilikom ispada nadređenih mreža te prilikom kvara u 110 kV mreži. Na osnovu obrađenih podataka dobivenim simulacijama odrediti će se optimalni tip FACTS uređaja koji će se priključiti u TS Ernestinovo na 400 kV sabirnicu.

Slika 5.1 Mreža prijenosnog područja Osijek u DigSilent Power Factory

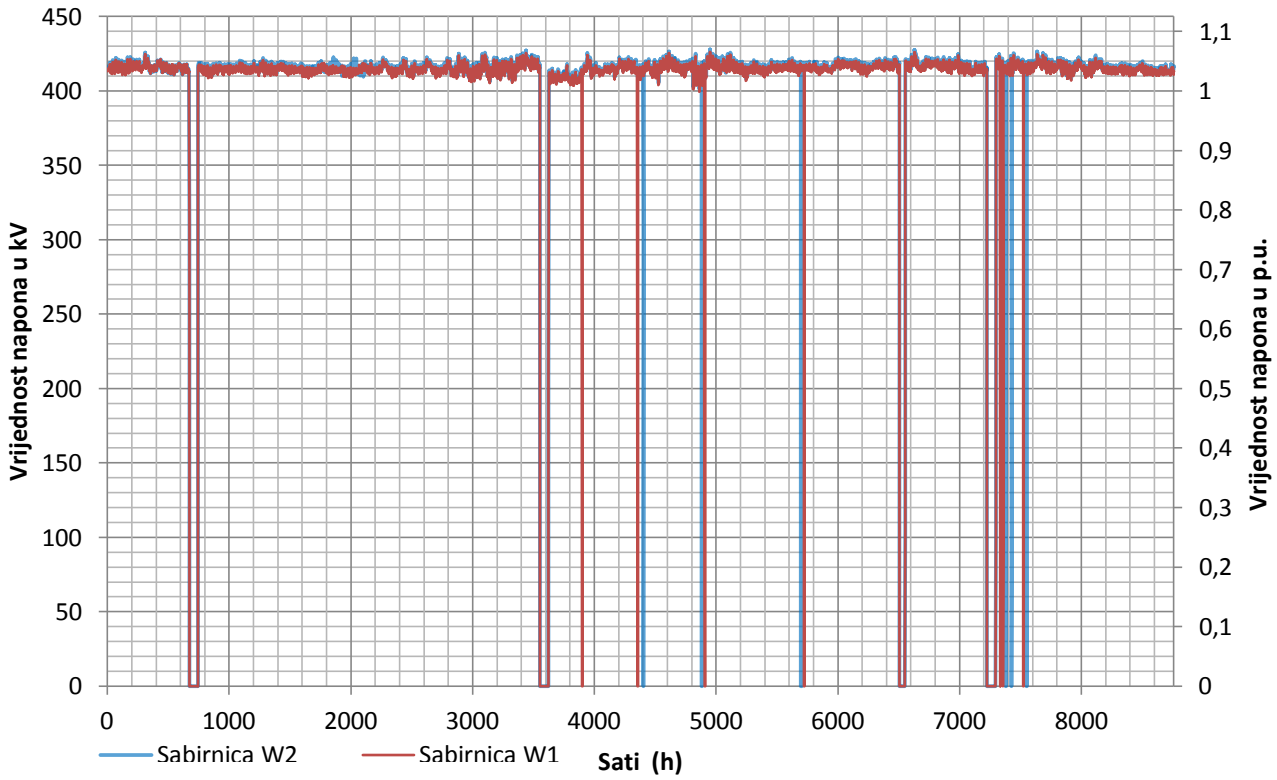


Za navedenu analizu koristiti će se prijenosna mreža Prijenosnog područja Osijek parametrirana prema podacima preuzetim iz Hrvatskog operatora prijenosnog sustava. Za izvršavanje simulacija koristiti će se simulacijski software DIgSilent Power Factory u kojemu se nalazi navedena mreža te je prikazana na slici 5.1

5.1. Analiza postojećih godišnjih naponskih prilika na 400 kV strani u TS Ernestinovo

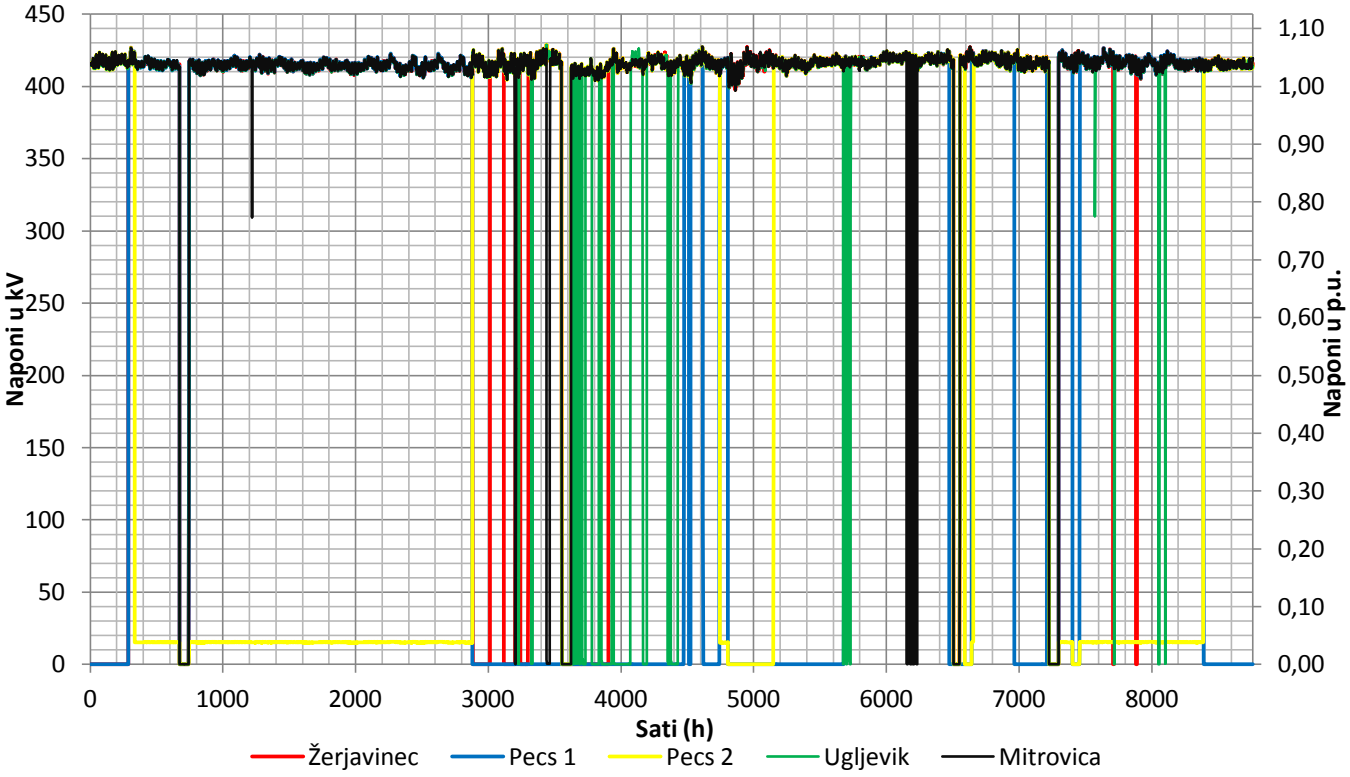
Na osnovu prikupljenih podataka u Hrvatskom operatoru prijenosnog sustava, provedena je analiza naponskog stanja u TS Ernestinovo na 400 kV strani. Na grafikonu 5.1 i 5. 2 mogu se vidjeti naponi na sabirnicama W1 i W2 te naponi na krajevima vodova u TS Ernestinovo na 400 kV strani. Vidljivo je da su naponi veći od nazivnog napona kada se nabrojani elementi nalaze u pogonu. Zbog male preglednosti na grafikonima 5.1 i 5.2 , izrađen je grafikon 5.3 koji prikazuje uključenost promatranih sabirnica i vodova tijekom godine izraženu u postocima.

Grafikon 5.1 Naponi na sabirnicama W1 i W2 u TS Ernestinovo na 400 kV strani



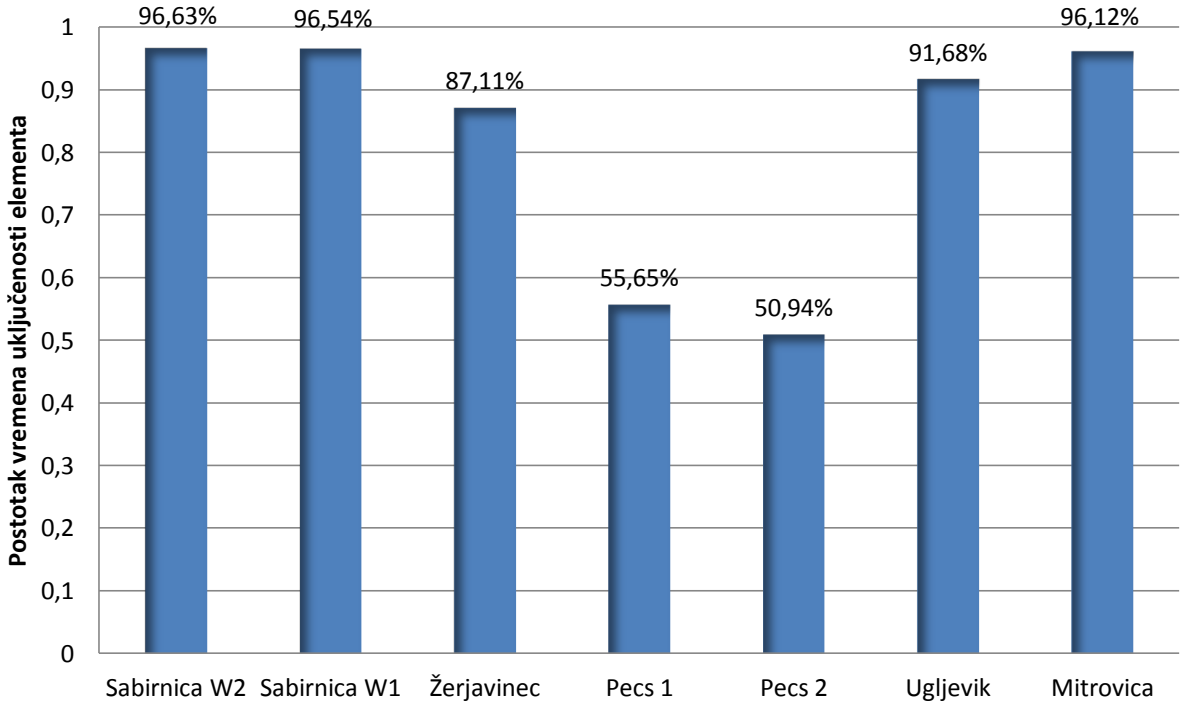
Izvor: podaci iz Hrvatskog operatora prijenosnog sustava

Grafikon 5.2 Naponi na sabirnicama na krajevima vodova u TS Ernestinovo na 400 kV strani



Izvor: podaci iz Hrvatskog operatora prijenosnog sustava

Grafikon 5.3 Uključenost sabirnica i vodova tijekom godine izražena u postotcima

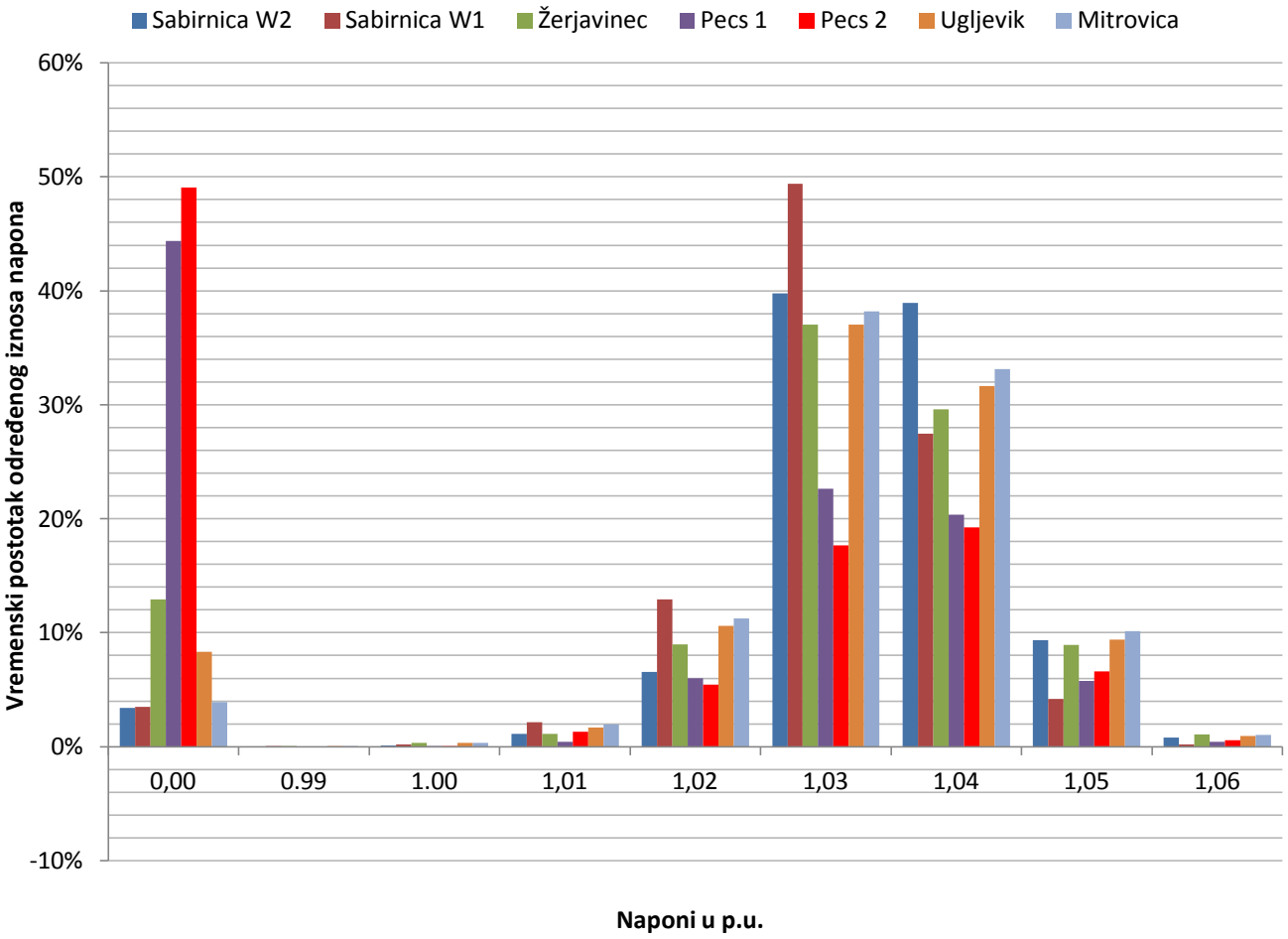


Izvor: podaci iz Hrvatskog operatora prijenosnog sustava

U grafikonu 5.3 vidljivo je da se sabirnice W1 i W2 te vodovi Prema Žerjavincu, Ugljeviku i Sremskoj Mitrovici nalaze oko 90% vremena tijekom godine u pogonu što odgovara uključenosti tijekom cijele godine uz vrijeme potrebno za remont i održavanje. Vodovi Pecs 1 i Pecs 2 nalaze se u pogonu oko 50% godišnjeg vremena što govori da su gotovo pola godine van pogona.

Grafikon 5.4 prikazuje trajanje iznosa napona promatranih elemenata izraženih u postotku vremena tijekom godine dana. Vidljivo je da na svim elementima dominiraju naponi 1.03 p.u. i 1.04. p.u, osim kod već spomenutih Pecs1 i 2 koji su van pogona gotovo pola godine. Uz grafikon ide i pripadajuća tablica 5.1. u kojoj se nalaze točni postoci trajanja vremena određenog iznosa napona.

Grafikon 5.4 Trajanje iznosa napona izraženih u postotku vremena tijekom godinu dana



Izvor: Podaci iz tablice 5.1

Tablica 5.1 Trajanje iznosa napona izraženih u postotku vremena tijekom godinu dana u tabličnom obliku

	0,00	0.99	1.00	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06
Sabirnica W2	3%	0%	0%	1%	7%	40%	39%	9%	1%
Sabirnica W1	3%	0%	0%	2%	13%	49%	27%	4%	0%
Žerjavinec	13%	0%	0%	1%	9%	37%	30%	9%	1%
Pecs 1	44%	0%	0%	0%	6%	23%	20%	6%	0%
Pecs 2	49%	0%	0%	1%	5%	18%	19%	7%	1%
Ugljevik	8%	0%	0%	2%	11%	37%	32%	9%	1%
Mitrovica	4%	0%	0%	2%	11%	38%	33%	10%	1%

Izvor: podaci iz Hrvatskog operatora prijenosnog sustava

Također, iz podataka prikupljenih iz HOPS – a i do sada obrađenih podataka može se izraditi tablica 5.2 koja prikazuje trajanje istovremenog pogona promatranih elemenata mreže. Vrijeme u pogonu promatranih elemenata iskazano je u postotcima u odnosu na jednu godinu.

Tablica 5.2 Trajanje istovremenog pogona izraženu u postotcima tijekom jedne godine

	Sabirnica W2	Sabirnica W1	Žerjavinec	Pecs 1	Pecs 2	Ugljevik	Mitrovica
Sabirnica W2		96%	87%	55%	51%	91%	96%
Sabirnica W1	96%		87%	55%	51%	91%	96%
Žerjavinec	87%	87%		55%	41%	84%	86%
Pecs 1	55%	55%	55%		15%	55%	55%
Pecs 2	51%	51%	41%	15%		46%	50%
Ugljevik	91%	91%	84%	55%	46%		91%
Mitrovica	96%	96%	86%	55%	50%	91%	

Izvor: podaci iz Hrvatskog operatora prijenosnog sustava

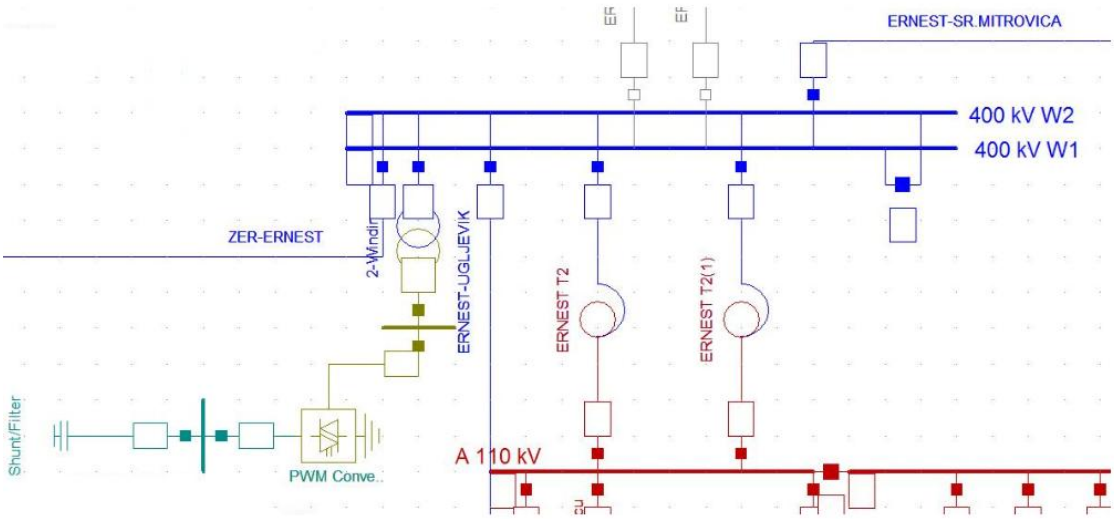
Pecs 1 i Pecs 2 su označeni drugom bojom zbog relativno malog istovremenog pogona u odnosu na druge promatrane elemente te će se ta dva voda u daljnjim simulacijama nalaziti van pogona. Ostali elementi će se nalaziti u pogonu. Uz navedena dva voda van uporabe će biti i generatori PTE 1 , PTE 2 i TO – TE Gen dok je prigušnica od 100 MVAr na 110 kV strani u TS Ernestinovu u pogonu.

5.2. Određivanje optimalnog tipa FACTS uređaja u TS Ernestinovo na 400 kV sabirnici

Vrsta FACTS uređaja koja će se koristiti u simulacijama je STATCOM uređaj koji je opisan u potpoglavlju 4.2.2. U istom potpoglavlju je opisana usporedba između SVC – a i STATCOM – a koja pokazuje mnogo bolje karakteristike STATCOM uređaja naspram SVC – a dok se ekonomska analiza nije uzela u obzir prilikom odabira vrste FACTS uređaja.

Na sabirnicu 400 kV u TS Ernestinovo priključuje se STATCOM uređaj koji se sastoji od istosmjernog kondenzatora, PWM pretvarača i transformatora preko kojega se spaja na sabirnicu što je prikazano na slici 5.2. Istosmjerni napon na istosmjernoj sabirnici iznosi 35 kV dok je napon na izmjeničnoj sabirnici 15 kV. Transformator između PWM pretvarača i 400 kV sabirnice je snage 300 MVA.

Slika 5.2 Model STATCOMA u DIgSILENT PowerFactory 15.2



U svrhu izvođenja RMS simulacije u DIgSILENTU stvoren je 1 kompozitni model pod nazivom STATCOM – FRAME za priključeni STATCOM uređaj. Unutar kompozitnog modela nalazi se 6 slobodnih parametarskih lokacija za odabir PWM pretvarača, regulatora STATCOM – a te uređaja za mjerenje istosmjernog i izmjeničnog napona, radne i jalove snage koju STATCOM izmjenjuje sa sustavom kao i faze na izmjeničnoj strani. Sve lokacije su popunjene. Kompozitni model je prikazan u prilogu P1. Korišteni model regulatora STATCOM – a preuzet je iz DIgSILENT PowerFactory i može se vidjeti na slici 5.3. Izlazne veličine regulatora su i_{d_ref} i i_{q_ref} koje su referentne struje u dq koordinatnom sustavu i koje su nužne za izračunavanje injektirane snage od strane STATCOM – a što se može izračunati pomoću relacija (5-1) i (5-2):

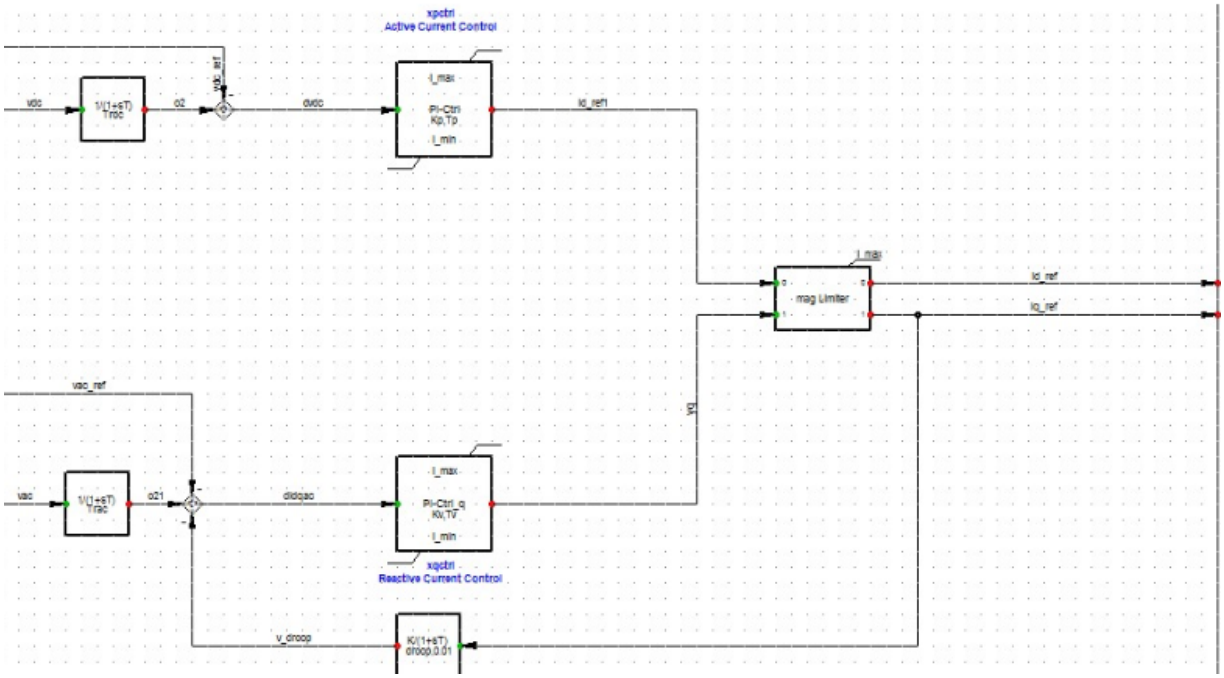
$$P_{inj} = V_i\left(i_d cos\theta_i + i_q sin\theta_i\right) = v_d i_d + v_q i_q \tag{5-1}$$

$$Q_{inj} = V_i\left(i_d sin\theta_i + i_q cos\theta_i\right) = -v_d i_q + v_q i_q \tag{5-2}$$

Iz prethodnih jednadžbi može se vidjeti da se prikladnim upravljanjem struje i_q postiže željena injekcija ili apsorpcija jalove snage. Parametri samog STATCOM – a i regulatora će ovisiti o količini reaktivne energije koja je potrebna sustavu za što bolje podnošenje

negativnih događaja poput kratkog spoja kao i za što brži oporavak nakon takvih događaja u sustavu. Vrste kratkih spojeva također utječu na odabir parametara STATCOM – a te je tako trofazni kratki spoj s veoma malom impedancijom najgori slučaj i kao takav će se koristiti u daljnjim simulacijama. Parametri regulatora biti će kasnije određeni.

Slika 5.3 Blok dijagram regulatora STATCOM – a

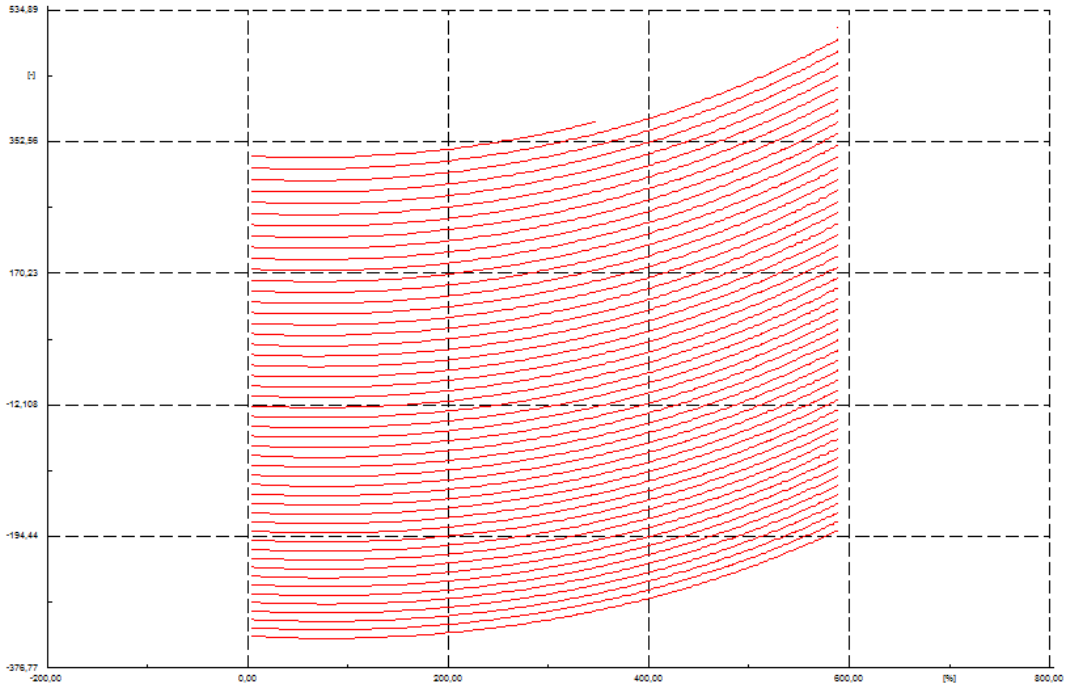


5.2.1. Stacionarno stanje

Računanjem tokova snaga bez STATCOM – a u pogonu dolazi se do iznosa napona na 400 kV sabirnici od 1.029 p.u. što odgovara stanju iz grafikona 5.4 i tablice 5.1. U stacionarnom stanju potrebno je odrediti nazivnu snagu STATCOM – a odnosno opseg regulacije i opseg regulacije napona. Radi lakšeg određivanja tih parametara izrađena je QPU_sweep skripta koja se importira u DIgSILENT. Skripta pokazuje odnos injektirane jalove snage u odnosu na vrijednost snage trošila za određeni iznos napona. Importirana skripta nakon pokretanja počinje od vrijednosti napona od 1.001 p.u. i mijenja opterećenje cijele mreže u rasponu od 1% do 125% opterećenja. Nakon izvršenja postupka iznos napona se povećava za 0.00125 p.u. te se postupak ponavlja. U ovom primjeru taj postupak će se izvršavati 50 koraka tj. do iznosa 1.061 p.u. Nakon izvršenja skripte ispisuje se graf kojemu su na ordinati ispisane vrijednosti injektirane jalove snage u MVAr – ima, dok su na apscisi ispisana vrijednost ukupnog opterećenja mreže u MW – ima, a svaka krivulja predstavlja određeni iznos napona. Graf se nalazi na slici 5.4. U skripti se mogu mijenjati broj konvergencija kao i iznos

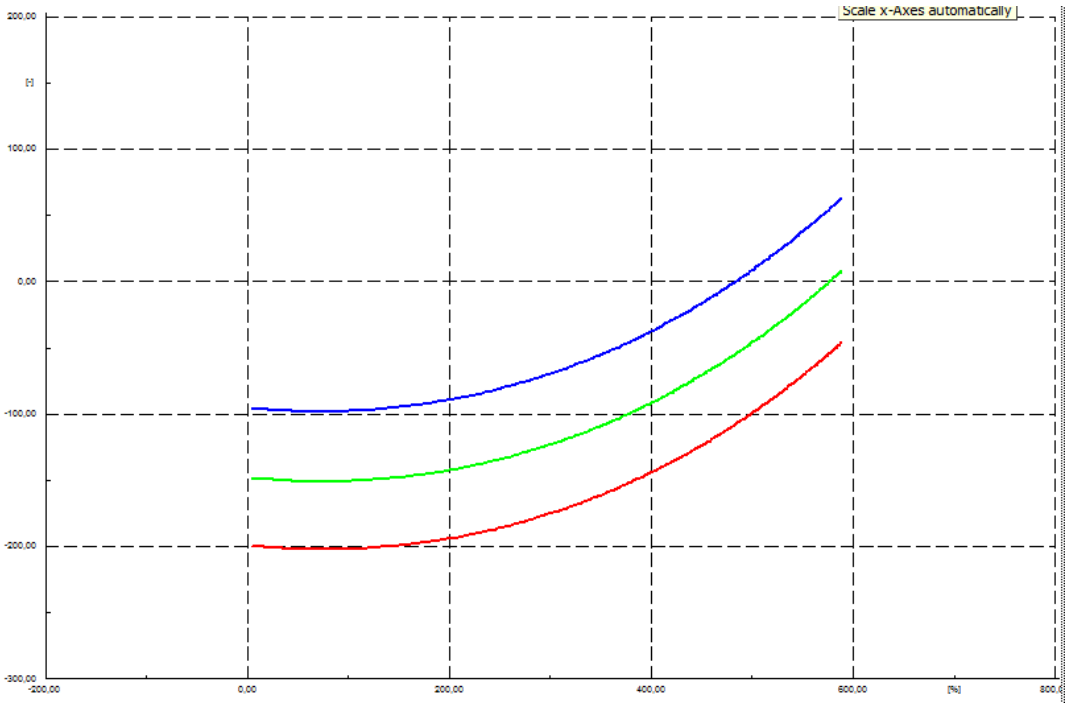
promjene napona i raspon promjene opterećenja sustava. Skripta je napisana u programskom jeziku Python te je implementirana u DIgSILENT PowerFactory.

Slika 5.4 QPU_sweep



Za daljnje određivanje nabrojanih parametara odabrane su tri vrijednosti napona: 1.015 p.u. , 1.020 p.u. i 1.025 p.u. Izdvojeni graf za te tri radne točke se nalazi na slici 5.5. gdje je crvenom bojom označen 1.015 p.u., zelenom bojom 1.020 p.u. i plavom bojom 1.025 p.u.

Slika 5.5. Izdvojene radne točke napona u stacionarnom stanju



U sljedećoj tablici dane su najniža i najviša točka injektirane jalove snage s grafa 5.5 za sve tri radne točke napona u rasponu opterećenja od 1% – 125%. U trećem retku dana je potrebna trofazna jalova snaga STATCOM – a za mogućnost rada u sve tri radne točke napona dok je u zadnjem retku određena snaga STATCOM – a na osnovu navedenih podataka. Negativan predznak znači injekcija induktivne jalove snage u čvorište, a pozitivan kapacitivne jalove snage.

Tablica 5.3 Minimalna i maksimalna injektirana jalova snaga i opseg kompenzacije

	U_{setp} = 1.015 *p.u.*	U_{setp} = 1.020 *p.u.*	U_{setp} = 1.025 *p.u.*
Q_{MIN}	-201.54 MVAr	-150.33 MVAr	-97.62 MVAr
Q_{MAX}	-45.21 MVAr	8.55 MVAr	63.84 MVAr
Q_{uk}	- 201.54 MVAr		
	63.84 MVAr		
Q_{setp}	- 200 MVAr		
	70 MVAr		

Prilikom pokretanja skripte u obzir nisu uzimane preklopke energetskih transformatora. Ako bi se preklopke uzele u obzir bila bi potrebna manja injektirana jalova snaga nego snaga prikazana u tablici 5.3 stoga je u ovom potpoglavlju prikazan nepovoljniji slučaj za promatrani sustav. U daljnjim simulacijama automatski uklop transformatorskih preklopki biti će uzet u obzir.

5.3. Određivanje parametara STATCOM – a s obzirom na dinamiku sustava

Prilikom određivanja parametara STATCOM – a s obzirom na dinamiku sustava potrebno je unijeti parametre regulatora STATCOM – a prikazanom na slici 5.3. Kapacitet izmjeničnog kondenzatora iznosi 100 μF po koraku te se sastoji od 16 koraka čime ukupna reaktivna snaga iznosi 205.2507 MVAr – a. Nazivna snaga PWM pretvarača iznosi 200 MVA dok opseg kompenzacije je određen u tablici 5.3. Naponska radna točka STATCOM – a je postavljena na vrijednost 1.02 p.u. , dok će se napon na DC sabirnici održavati konstantnim u iznosu od 1 p.u. Odziv kompenzacije će se promatrati za slučaj dva različita iznosa konstanti regulatora te se ti parametri nalaze u tablici 5.4.

Tablica 5.4. Parametri regulatora STATCOM – a

	Parametri 1	Parametri 2
Kp Active Power Control Gain [p.u]	10	10
Tp Active Power Control Time Constant [s]	0.002	0.002
Kv Voltage Control Gain [p.u]	5	10
Tv Voltage Power Control Time Constant [s]	0.002	0.001
droop	0.05	0.01
Trdc	0.001	0.001
Trac	0.01	0.001
i_min	1,5	5
i_max	-1,5	5

Odzivi kompenzacije će se promatrati prilikom kratkog spoja u TS Ernestinovo, prilikom ispada nadređene mreže, gubitka kritičnog voda i kvara u 110 kV mreži.

Promatrati će se odzivi napona na 400 kV sabirnici, jalova i radna snaga na AC sabirnici STATCOM – a , jalova i radna snaga na DC sabirnici, i_d i i_q struja STATCOM – a te napon na DC sabirnici STATCOM uređaja i to za slučaj kada regulator ima parametre 1 i parametre 2 te za slučaj kada je STATCOM van pogona. U tablici 5.5. navedene su boje pripadajućih valnih oblika promatranih parametara.

Tablica 5.5. Boje valnih oblika

		Parametri 1	Parametri 2	Bez STATCOM
Napon na 400 kV sabirnici (m:u)		Crvena	Zelena	plava
Snaga na AC sabirnici	Radna (m:Psum:busac)	Ljubičasta	Crna	
	Jalova (m:Qsum:busac)	Crvena	Zelena	
Snaga na DC sabirnici	Radna (s:p)	Ljubičasta	Crna	
	Jalova (s:q)	Crvena	Zelena	
Struja STATCOM - a	id (s:id)	Ljubičasta	Crna	
	Iq (s:iq)	Crvena	Zelena	
Napon na DC sabirnici STATCOM – a (m:u1)		Crvena	Zelena	

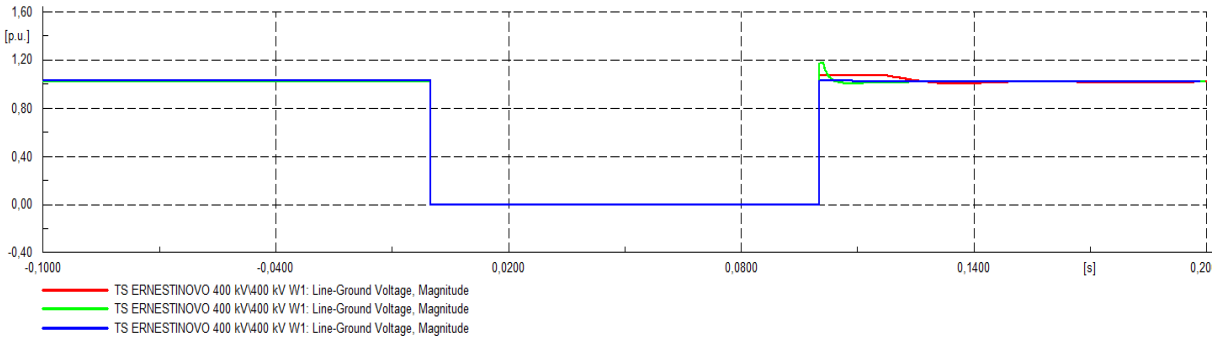
5.2.2. Kratki spoj u TS Ernestinovo

Prvi slučaj promatranja odziva kompenzacije će se provesti prilikom trofaznog kratkog spoja impedancije 0 Ω u TS Ernestinovo na sabirnicama 400 i 110 kV.

- **Trofazni kratki spoj impedancije 0 Ω na 400 kV sabirnici u TS Ernestinovo**

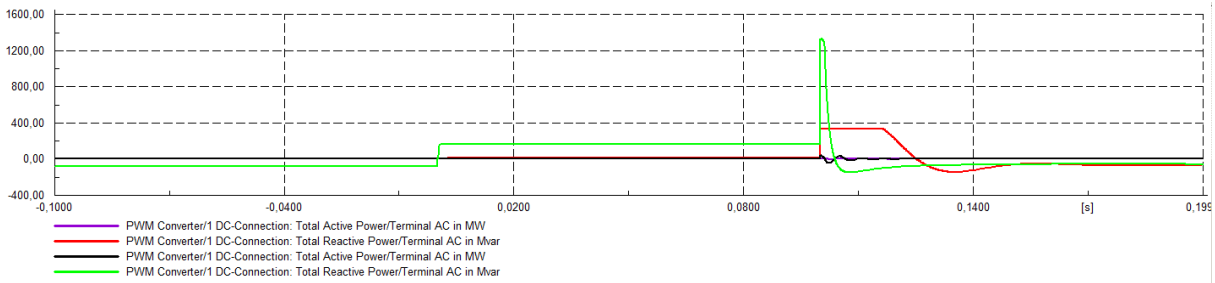
Trofazni kratki spoj je simuliran na 400 kV sabirnici u trenutku 0 s, a otklonjen je u trenutku 0.1 s. Na slici 5.6 prikazan je odziv napona za vrijeme kratkog spoja.

Slika 5.6 Oblici napona za vrijeme 3FKS – a na 400 kV sabirnici

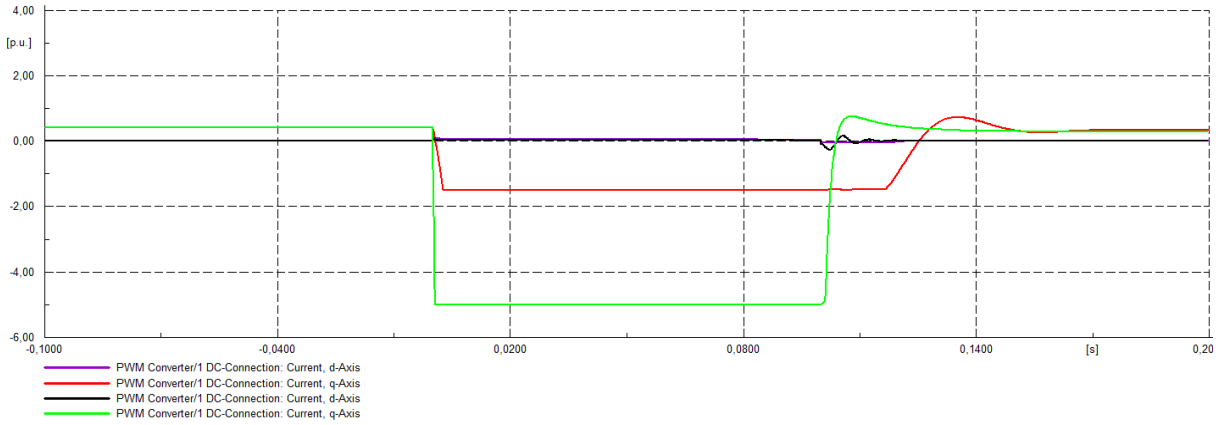


Primjećuje se da je prilikom kratkog spoja napon pao na nulu. Nakon otklanjanja kratkog spoja primjećuje se da kada je STATCOM u pogonu napon raste i dolazi do nadvišenja napona. Nadvišenje je nešto više promatrajući zelenu liniju ali je brža stabilizacija napona. Na slikama 5.7 i 5.8 prikazani su odzivi snage na AC sabirnici STATCOM – a odnosno i_d i i_q struja STATCOM – a .

Slika 5.7 Snaga na AC sabirnici STATCOM – a

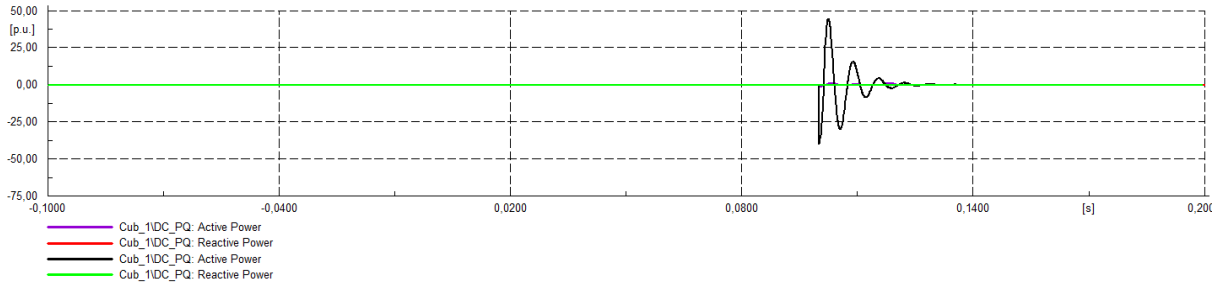


Slika 5.8 Struja STATCOM – a

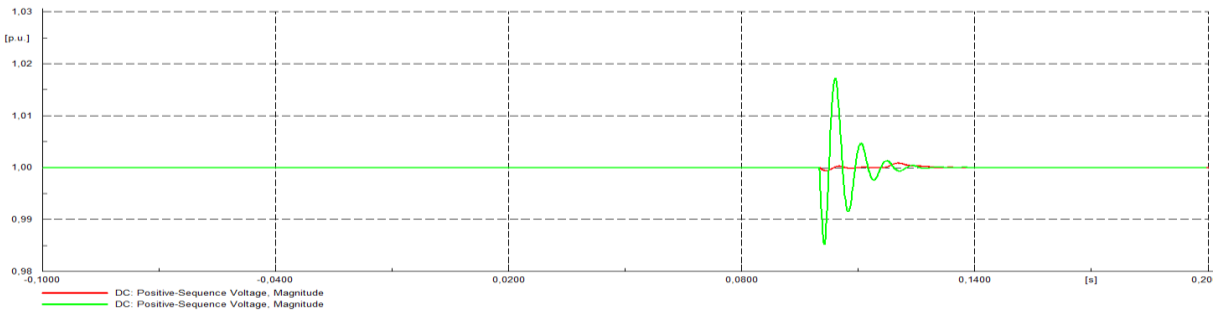


Na slici 5.7, vidljivo je da tijekom kvara STATCOM ne isporučuje svoju nazivnu reaktivnu snagu. Promatrajući zelenu liniju, može se primijetiti da nakon otklanjanja kratkog spoja dolazi do prebačaja nazivne vrijednosti reaktivne snage STATCOMA u svrhu stabilizacije napona. Ta prijelazna pojava se može zanemariti pošto je i_q struja STATCOM – a ostala u svojim granicama što je vidljivo na slici 5.8 i iznosi 5 p.u. Uspoređujući crvenu i zelenu liniju na obije slike zaključuje se da je kod zelene linije odziv STATCOM – a brži nego kod crvene linije, a uzrok tomu su manje vrijednosti vremenskih konstanti regulatora STATCOM - a. Na slikama 5.9 i 5.10 prikazani su snaga na DC sabirnici odnosno napon na DC sabirnici STATCOM – a.

Slika 5.9 Snaga na DC sabirnici STATCOM - a



Slika 5.10 Napon na DC sabirnici STATCOM - a



Veličine prikazane na slikama 5.9 i 5.10 su povezane tako što je napon na DC sabirnici potrebno održavati konstantnim i svaka oscilacija tog napona određuje referentnu vrijednost aktivne snage koja se izmjenjuje sa sustavom putem pretvarača. Tako se na slikama od 5.7 – 5.10 može vidjeti da se pojavljuje izmjena aktivne snage u trenutku otklanjanja kratkog spoja u 0.1 sekundi. Ta izmjena aktivne snage je malog iznosa korištenje regulatora s parametrima 1 dok je većeg iznosa korištenjem parametara 2. Napon na DC sabirnici STATCOM – a može se održavati konstantnim propisnim odabirom iznosa konstanti regulatora K_p i T_p.

U tablici 5.6 dana je usporedba dinamičkih osobina STATCOM – a prilikom korištenja različitih konstanti regulatora za trofazni kratki spoj na 400 kV sabirnici u TS Ernestinovo.

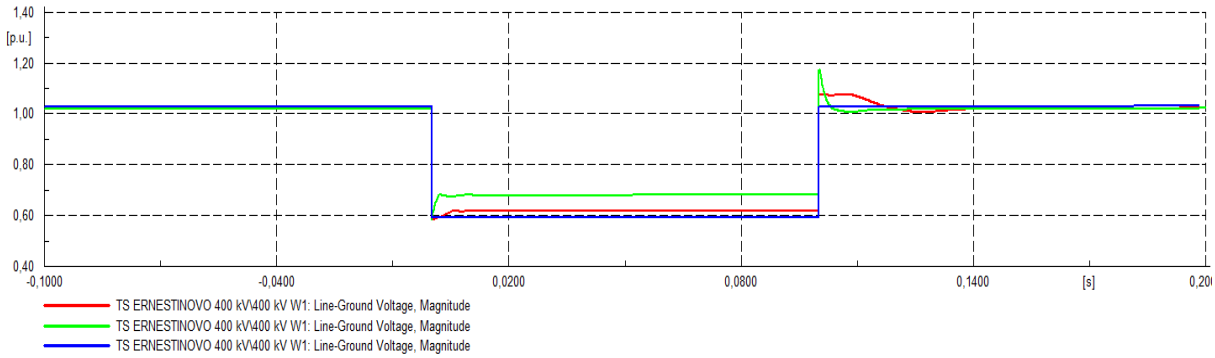
Tablica 5.6 Usporedba dinamičkih osobina STATCOM – a

	Nadvišenje napona	Vrijeme stabilizacije napona	Najniža vrijednost napona prilikom kvara	Napon tijekom kvara
Parametri 1	4.9 %	0.15 s	0 p.u.	0 p.u.
Parametri 2	15.29%	0.017 s	0 p.u.	0 p.u.

- **Trofazni kratki spoj impedancije 0 Ω na 110 kV sabirnici u TS Ernestinovo**

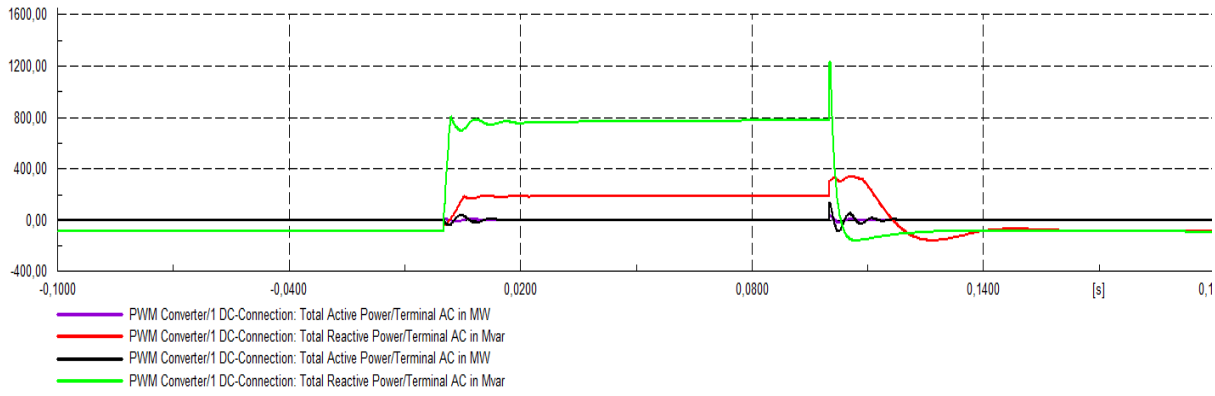
Trofazni kratki spoj je simuliran na 110 kV sabirnici u trenutku 0 s, a otklonjen je u trenutku 0.1 s. Na slici 5.11 prikazan je odziv napona za vrijeme kratkog spoja.

Slika 5.11 Oblici napona za vrijeme 3FKS – a na 110 kV sabirnici

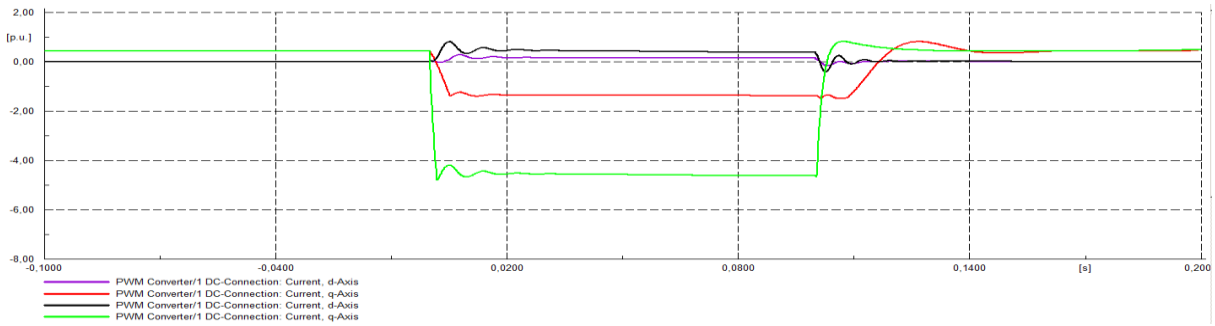


Nakon nastanka kratkog spoja napon pada, ali ne na 0 p.u kao u prethodnom slučaju. Iznos napona za vrijeme trajanja kratkog spoja je drugačiji u ovisnosti izbora parametara regulatora. To je iz razloga jer se injektira veća struja STATCOM – a i_q u čvor koji se regulira, a samim tim i veća reaktivna snaga što se može vidjeti na slikama 5.12 odnosno 5.13. Nakon otklanjanja kratkog spoja kao i u prošlom slučaju dolazi do nadvišenja napona te je promatrajući zelenu liniju brža stabilizacija napona. Na slikama 5.12 i 5.13 prikazani su odzivi snage na AC sabirnici odnosno i_d i i_q struja STATCOM – a .

Slika 5.12 Snaga na AC sabirnici STATCOM – a

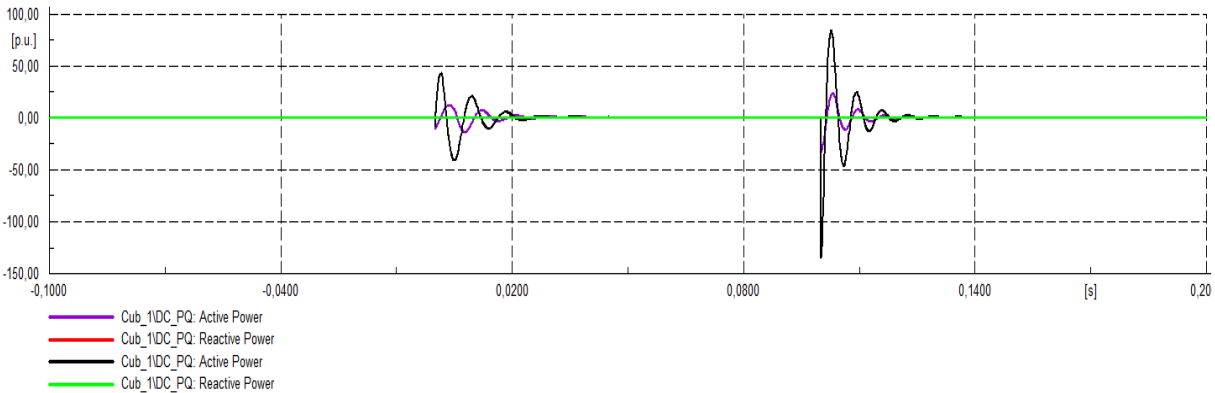


Slika 5.13 Struja STATCOM – a

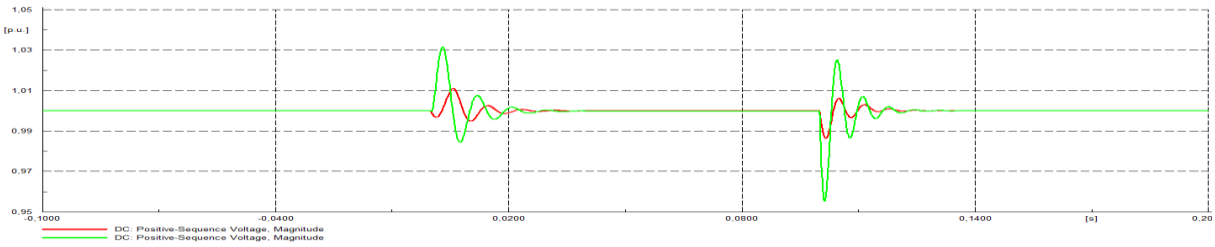


Na slici 5.12, promatrajući crvenu liniju, vidljivo je da STATCOM isporučuje snagu blizu nazivne dok promatrajući zelenu liniju vidljivo je da je snaga veća od nazivne. To znači da STATCOM radi punim kapacitetom, a ostala potrebna jalovu snaga uzima se iz mreže. Razlog tomu je održavanje napona na iznosu od 0.681 p.u. za vrijeme kvara. Iz tog razloga nakon otklanjanja kratkog spoja napon nije 1.02 p.u. je manji za mali iznos. Daljnjim povećavanjem nazivne snage STATCOM – a smanjuje se udio jalove snage preuzete iz mreže, ali napon se za vrijeme kratkog spoja podiže samo za mali iznos. Nadvišenje reaktivne snage i u ovom slučaju zanemariti jer je struja i_q unutar dozvoljenog iznosa. I u ovo slučaju je brži odziv promatrajući zelenu liniju naspram crvene linije. Također na slici 5.13 može se primijetiti i i_d komponenta struje za vrijeme trajanja kratkog spoja. Na slikama 5.14 i 5.15 prikazani su snaga na DC sabirnici odnosno napon na DC sabirnici STATCOM – a.

Slika 5.14 Snaga na DC sabirnici STATCOM - a



Slika 5.15 Napon na DC sabirnici STATCOM - a



Za razliku od kratkog spoja na 400 kV sabirnici, oscilacije aktivne snage odnosno napona na DC sabirnici se javljaju u trenutku kratkog spoja i u trenutku otklanjanja kratkog spoja. Također i amplitude oscilacija su povećane za razliku od prethodnog slučaja što se može povezati s povećanom i_d komponentom struje STATCOM – a. U tablici 5.7 dana je usporedba dinamičkih osobina STATCOM – a prilikom korištenja različitih konstanti regulatora za trofazni kratki spoj na 110 kV sabirnici u TS Ernestinovo.

Tablica 5.7 Usporedba dinamičkih osobina STATCOM – a

	Nadvišenje napona	**Vrijeme stabilizacije napona**	**Najniža vrijednost napona prilikom kvara**	**Napon tijekom kvara**
Parametri 1	5.59 %	0.047 s	0.583 p.u.	0.618 p.u.
Parametri 2	15.29%	0.021 s	0.583 p.u.	0.681 p.u.

Povećavanjem nazivne snage STATCOM - a povećava se iznos injektirane jalove snage u regulirani čvor za vrijeme trajanja kratkog spoja čime se popravlja iznos napona za vrijeme kratkog spoja te se povećava i nadvišenje napona u trenutku otklanjanja kratkog spoja. To razmatranje povlači ekonomsko razmatranje karakteristika STATCOM uređaja.

5.2.3. Ispad kritičnog voda

U ovom slučaju promatrati će se odziv kompenzacije prilikom ispada vodova Ernestinovo – Žerjavinec, Ernestinovo – Mladost i Ernestinovo – Ugljevik. Simulirati će se trofazni kratki spoj impedancije 0 Ω u trenutku 0 s na svakom od vodova na lokaciji od 50 % njihove duljine. Nakon 0.1 s vod se isključuje iz pogona. S obzirom da je svaki vod spojen na pripadnu nadređenu mrežu, ovaj slučaj se može promatrati i kao ispad nadređene mreže u sustavu.

- **Trofazni kratki spoj impedancije 0 Ω na 50 % duljine voda Ernestinovo – Žerjavinec**

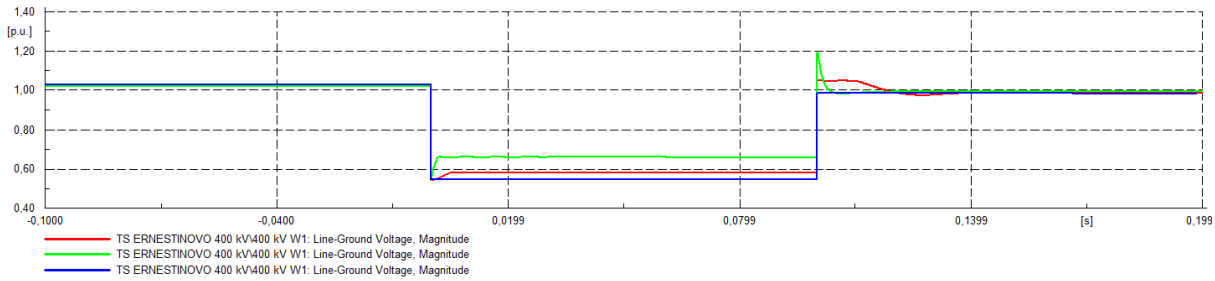
Vod Ernestinovo – Žerjavinec priključen je na nadređenu mrežu Žerjavinec koja radi u SL režimu rada tj. spojena je na referentni čvor. Parametri nadomjesne mreže dani su u tablici 5.8.

Tablica 5.8 Parametri nadređene mreže Žerjavinec 400 kV

V1	1.064 p.u.
δ1	0°
Sk"max	4164.359 MVA
Ik"max	6.010734 kA
X/R (max)	0.05611672
Sk"min	2000 MVA
Ik"min	2.886751 kA
X/R (min)	0.1470588

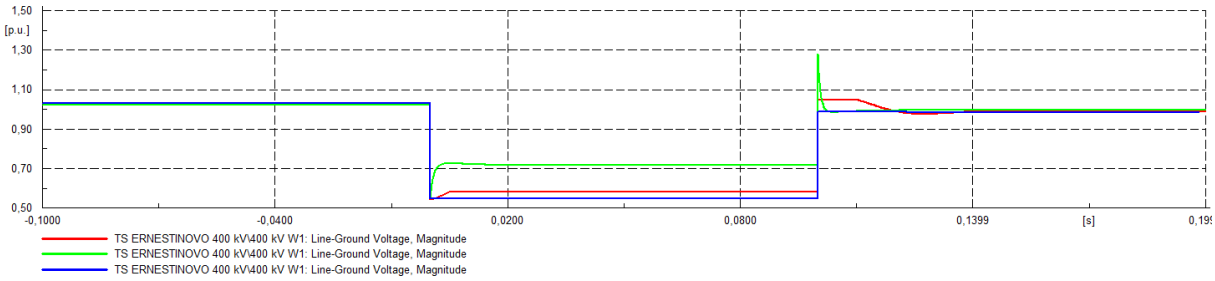
Na slici 5.16 prikazan je odziv napona na 400 kV sabirnici za vrijeme kratkog spoja na vodu .

Slika 5.16 Oblici napona za vrijeme 3FKS – a na 50% voda Ernestinovo – Žerjavinec



Na slici 5.16 primjećuje se da napon opada na vrijednosti koje ovise o izboru parametara regulatora STATCOM – a. Vidljivo je da je povoljniji slučaj prilikom korištenja parametara 2 kada je i odziv regulacije vidljivo brži od regulatora s parametrima 1. Na slici 5.17. prikazat će se odziv napona za slučaj ako se nazivna snaga STATCOM – a poveća na 400 MVA i ako STATCOM radi punim kapacitetom. Regulator STATCOM – a je podešen prema parametrima 2.

Slika 5.17 Oblici napona za vrijeme 3FKS – a na 50% voda Ernestinovo – Žerjavinec sa snagom 400 MVA i regulatorom podešenim prema parametrima 2



Tako se na slici 5.16 i 5.17 promatrajući zelene linije može primijetiti da prilikom povećanja nazivne snage STATCOM – a dolazi do ne pretjeranog poboljšanja naponskih prilika za vrijeme kratkog spoja, ali i povećanja naponskog nadvišenja prilikom ispada voda iz pogona što naravno dovodi i do poskupljenja samog uređaja. Nadvišenje napona se može u ovom

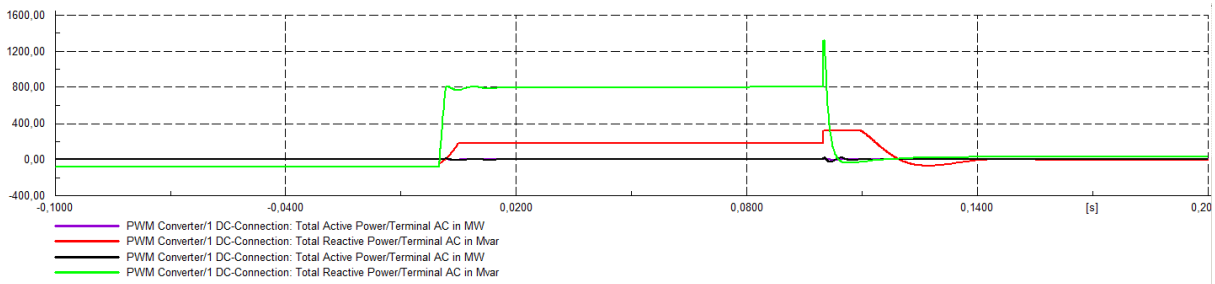
slučaju smanjiti povećavanjem K_v i smanjivanjem T_{rac} parametara regulatora, ali takav odabir parametara neće biti dobar za slučaj ispada ostala dva voda tako da će se ostati pri parametrima prikazanim u tablici 5.4. Također isto vrijedi i za brži odziv kompenzacije. U tablici 5.9 prikazana je usporedba odziva napona na 400 kV sabirnici prilikom mijenjanja nazivne snage STATCOM – a i prilikom podešenja regulatora prema parametrima 2.

Tablica 5.7 Usporedba dinamičkih osobina STATCOM – a prilikom mijenjanja nazivne snage STATCOM - a

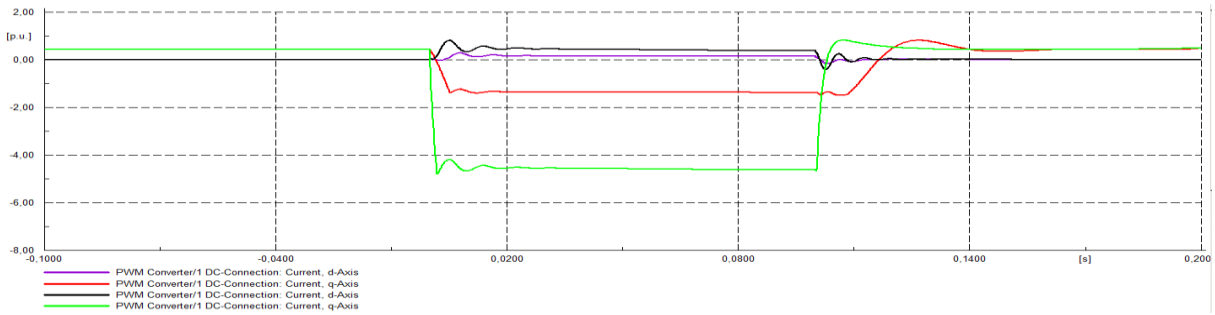
Parametri 2	Nadvišenje napona	Vrijeme stabilizacije napona	Najniža vrijednost napona prilikom kvara	Napon tijekom kvara
205 MVA	16.67 %	0.022 s	0.544 p.u.	0.660 p.u.
400 MVA	25.29%	0.022 s	0.564 p.u.	0.715 p.u.

Nakon povratka nazivne snage STATCOM – a na 200 MVA, promatraju se ostale veličine koje su prethodno navedene te nastavlja vršiti usporedba dinamike odziva u odnosu na različite parametre regulatora STATCOM - a. Na slikama 5.18 i 5.19 prikazani su odzivi snage na AC sabirnici odnosno i_d i i_q struja STATCOM – a .

Slika 5.18 Snaga na AC sabirnici STATCOM – a



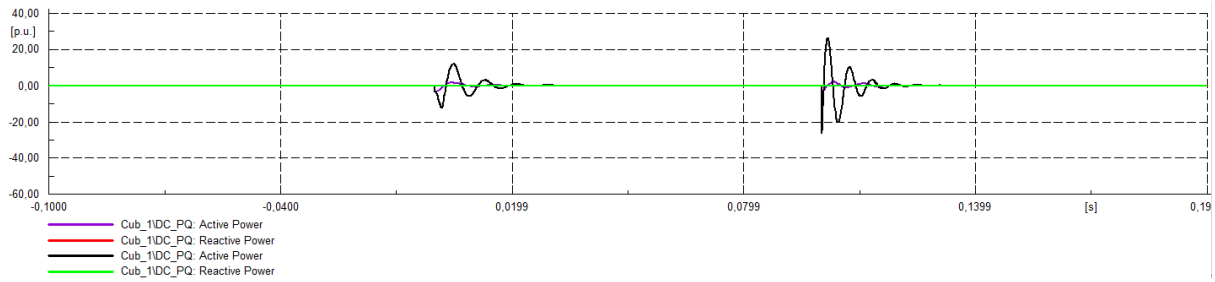
Slika 5.19 Struja STATCOM – a



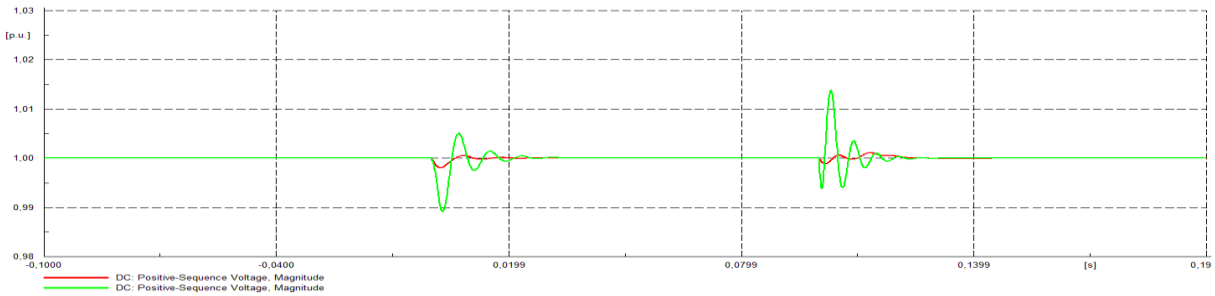
Na slikama 5.18 i 5.19 prilike su veoma slične kao kod trofaznog kratkog spoja na 110 kV sabirnici u TS Ernestinovo. Iznos potrebne jalove snage za održavanje napona prilikom kratkog spoja ovisi o impedanciji kvara kao i o lokaciji kratkog spoja. Vidljivo je da, u ovom konkretnom slučaju, STATACOM radi punim kapacitetom dok preostalu jalovu snagu

nadoknađuje iz mreže promatrajući crvenu liniju. Prilikom povećanja snage na 400 MVA povećan je iznos jalove snage STATCOM – a za vrijeme kratkog spoja koja se injektira putem STATCOM – a u regulirani čvor. Nadvišenje jalove snage u trenutku 0.1 se također može zanemariti. Na slikama 5.20 i 5.21 prikazani su snaga na DC sabirnici odnosno napon na DC sabirnici STATCOM – a.

Slika 5.20 Snaga na DC sabirnici STATCOM - a



Slika 5.21 Napon na DC sabirnici STATCOM - a



N slikama 5.20 i 5.21 vidljivo je da u trenutku nastanka i isključivanja voda dolazi do oscilacija aktivne snage i napona na DC sabirnici. Iznosi tih oscilacija su nešto niži za razliku od prošlih slučajeva. Prilikom povećanja snage STATCOM – a smanjuju se i oscilacije aktivne snage kao i oscilacije napona na DC sabirnici kao i i_d komponenta struje STATCOM – a. U tablici 5.9 dana je usporedba dinamičkih osobina STATCOM – a prilikom korištenja različitih konstanti regulatora za trofazni kratki spoj na vodu Ernestinovo – Žerjavinec na 50 % duljine voda.

Tablica 5.9 Usporedba dinamičkih osobina STATCOM – a

	Nadvišenje napona	**Vrijeme stabilizacije napona**	**Najniža vrijednost napona prilikom kvara**	**Napon tijekom kvara**
Parametri 1	2.75 %	0.044 s	0.585 p.u.	0.618 p.u.
Parametri 2	16.67%	0.022 s	0.660 p.u.	0.681 p.u.

- **Trofazni kratki spoj impedancije 0 Ω na 50 % duljine voda Ernestinovo – S. Mitrovica**

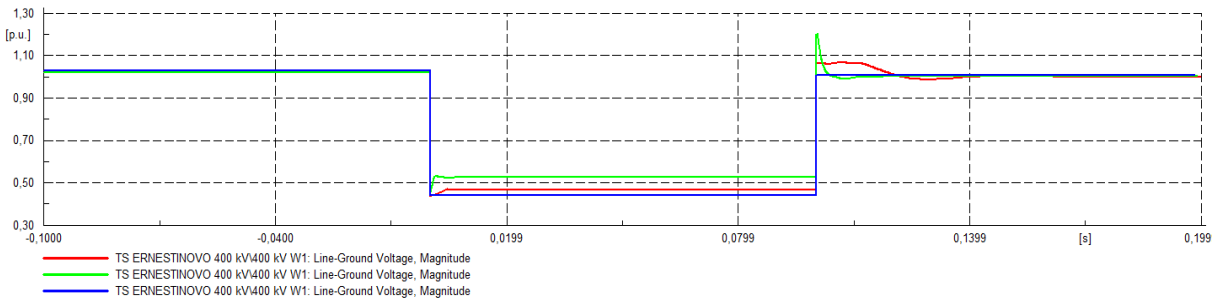
Vod Ernestinovo – S. Mitrovica priključen je na nadređenu mrežu Mladost 400 kV koja radi u PV režimu rada. Parametri nadomjesne mreže dani su u tablici 5.10.

Tablica 5.10 Parametri nadređene mreže S. Mitrovica 400 kV

P1	0 MW
V1	1.04 p.u.
Sk"max	4000 MVA
Ik"max	5.773503 kA
X/R (max)	7
Sk"min	2000 MVA
Ik"min	2.886751 kA
X/R (min)	5

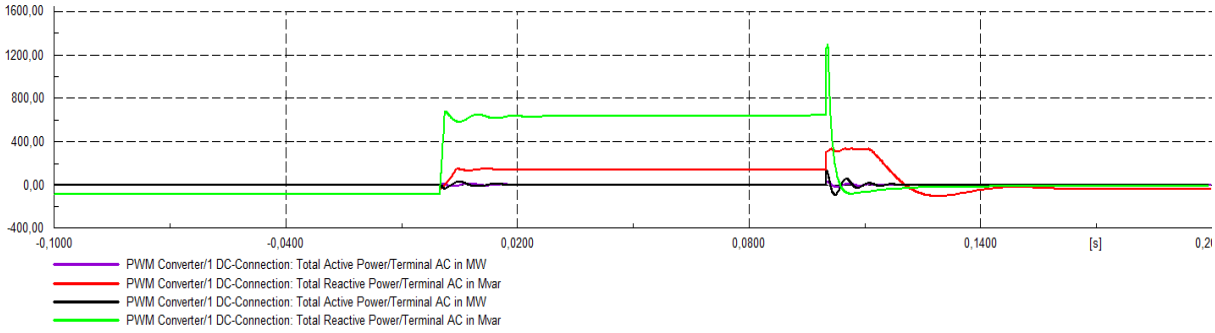
Na slici 5.22 prikazan je odziv napona na 400 kV sabirnici za vrijeme kratkog spoja na vodu.

Slika 5.22 Oblici napona za vrijeme 3FKS – a na 50% voda Ernestinovo – S. Mitrovica

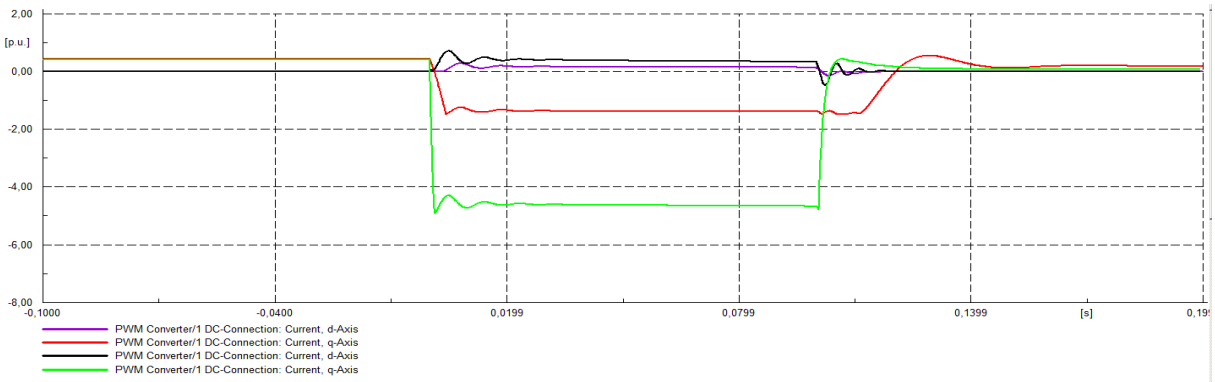


Na slici 5.22 situacija ja veoma slična kao i kod 3FKS na vodu Ernestinovo – Žerjavinec. Razlika je u nižoj vrijednosti napona za vrijeme trajanja kratkog spoja i manje je nadvišenje napona u trenutku isklapanja voda. Povećavanjem nazivne snage STATCOM – a doći će do malog poboljšanja prilika za vrijeme kratkog spoja i porasta nadvišenja napona. Na slikama 5.23 i 5.24 prikazani su odzivi snage na AC sabirnici odnosno i_d i i_q struja STATCOM – a .

Slika 5.23 Snaga na AC sabirnici STATCOM – a

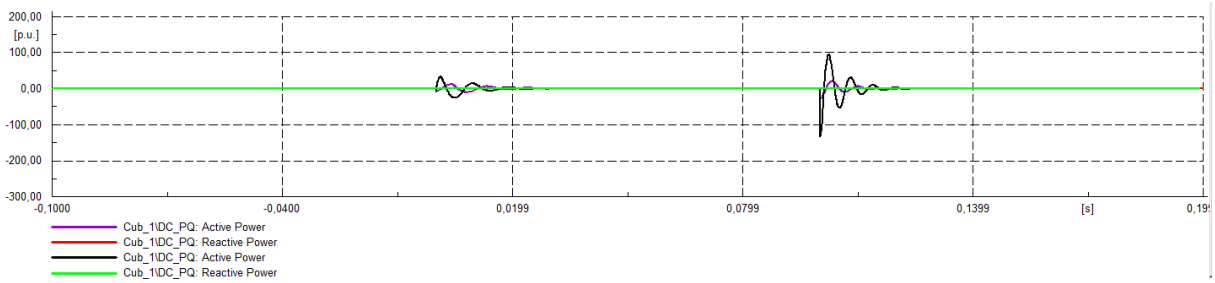


Slika 5.24 Struja STATCOM – a

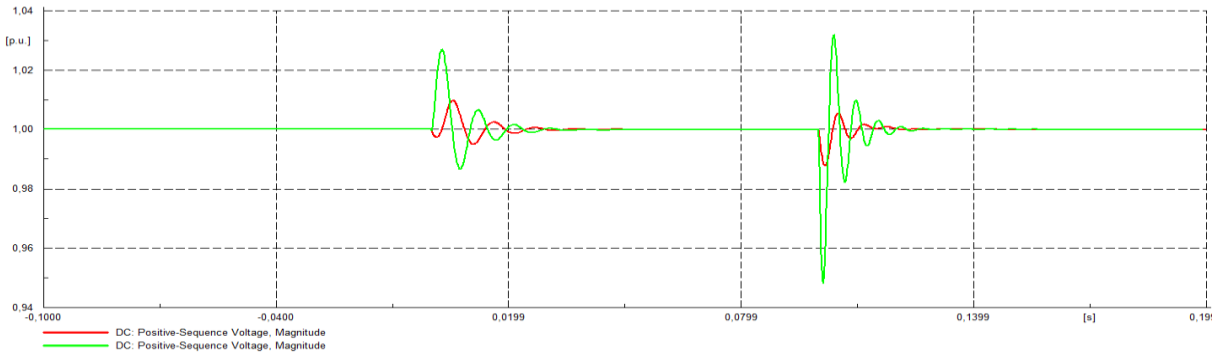


Na slikama 5.23 i 5.24 prilike su slične kao kod ispada voda Ernestinovo – Žerjavinec. Razlika je u tome što je za održavanje napona za vrijeme kratkog spoja potrebna malo manja jalova snaga u čvoru. Na slikama 5.25 i 5.26 prikazani su snaga na DC sabirnici odnosno napon na DC sabirnici STATCOM – a prilikom kratkog spoja na vodu Ernestinovo – S. Mitrovica i ispada istog voda.

Slika 5.25 Snaga na DC sabirnici STATCOM - a



Slika 5.26 Napon na DC sabirnici STATCOM - a



Na slikama 5.25 i 5.26 mogu se primijetiti povećane oscilacije aktivne snage kao i napona na DC sabirnici u trenutku nastanka kratkog spoja i trenutku isklapanja voda. U tablici 5.11 dana je usporedba dinamičkih osobina STATCOM – a prilikom korištenja različitih konstanti regulatora za trofazni kratki spoj na vodu Ernestinovo – S. Mitrovica na 50 % duljine voda.

Tablica 5.11 Usporedba dinamičkih osobina STATCOM – a

	Nadvišenje napona	Vrijeme stabilizacije napona	Najniža vrijednost napona prilikom kvara	Napon tijekom kvara
Parametri 1	4.51 %	0.042 s	0.437 p.u.	0.528 p.u.
Parametri 2	17.75 %	0.017 s	0.439 p.u.	0.468 p.u.

- **Trofazni kratki spoj impedancije 0 Ω na 50 % duljine voda Ernestinovo – Ugljevik**

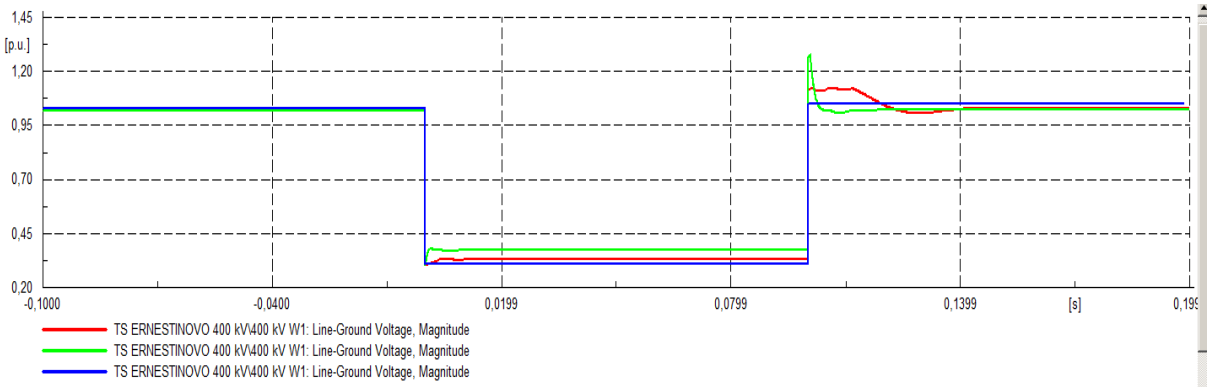
Vod Ernestinovo – Ugljevik priključen je na nadređenu mrežu Ugljevik 400 kV koja radi u SL režimu rada tj. spojena je na referentni čvor. Parametri nadomjesne mreže dani su u tablici 5.12.

Tablica 5.12 Parametri nadređene mreže Žerjavinec 400 kV

V1	0.997 p.u.
P1	4.5 MW
Sk"max	6000 MVA
Ik"max	8.660254 kA
X/R (max)	12
Sk"min	4000 MVA
Ik"min	5.773503 kA
X/R (min)	6

Na slici 5.27 prikazan je odziv napona na 400 kV sabirnici za vrijeme kratkog spoja na vodu .

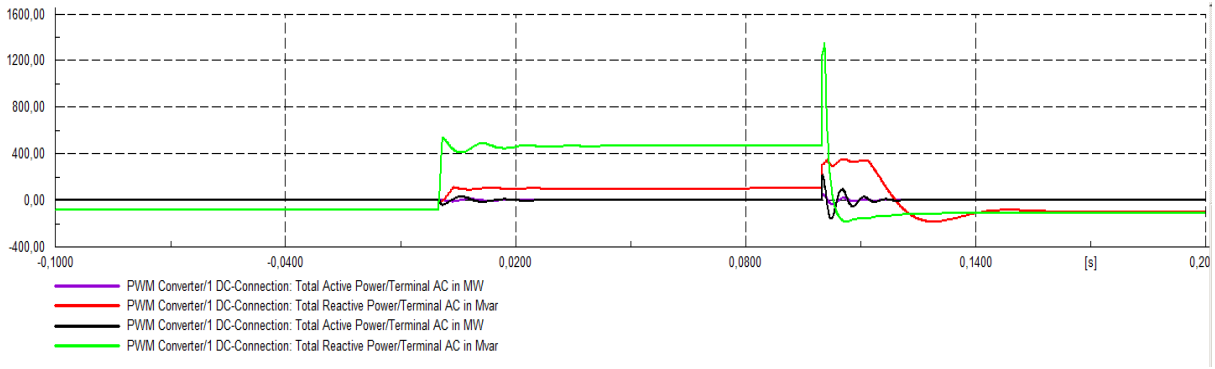
Slika 5.27 Oblici napona za vrijeme 3FKS – a na 50% voda Ernestinovo – Ugljevik



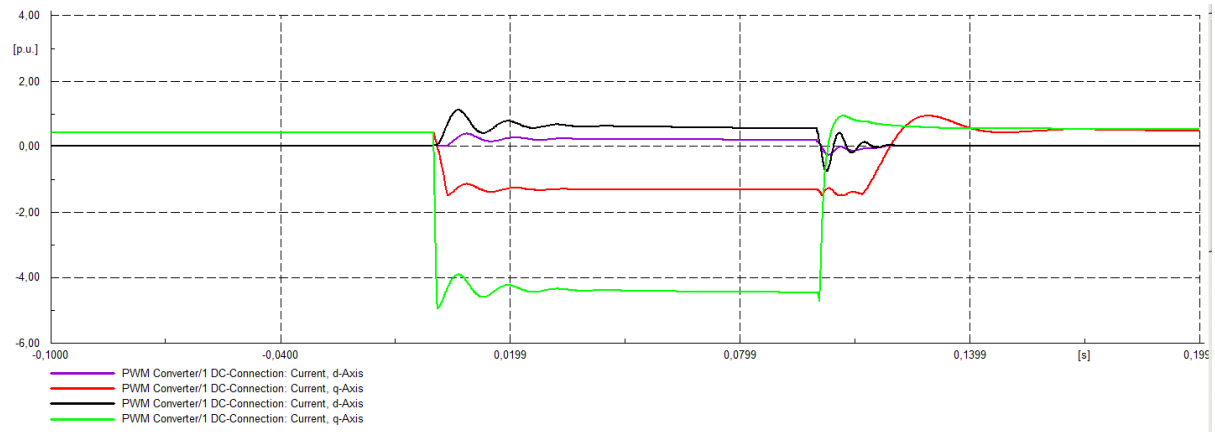
Na slici 5.27 vidljivo je da je prilikom trofaznog kratkog spoja na vodu Ernestinovo - Ugljevik dolazi do najnepovoljnijih prilika prilikom trajanja kratkog spoja. Daljnjim povećavanjem nazivne snage STATCOM – a dolazi do preopterećenja priključnog transformatora koji odlazi u zasićenje te dolazi sloma napona na 400 kV sabirnici. Napon je nešto viši prilikom korištenja parametara 2 regulatora STATCOM – a. Nakon isključenja

voda napon se vraća u dozvoljene granice relativno brzo ovisno o izboru parametara regulatora. Na slikama 5.28 i 5.29 prikazani su odzivi snage na AC sabirnici odnosno i_d i i_q struja STATCOM – a .

Slika 5.28 Snaga na AC sabirnici STATCOM – a

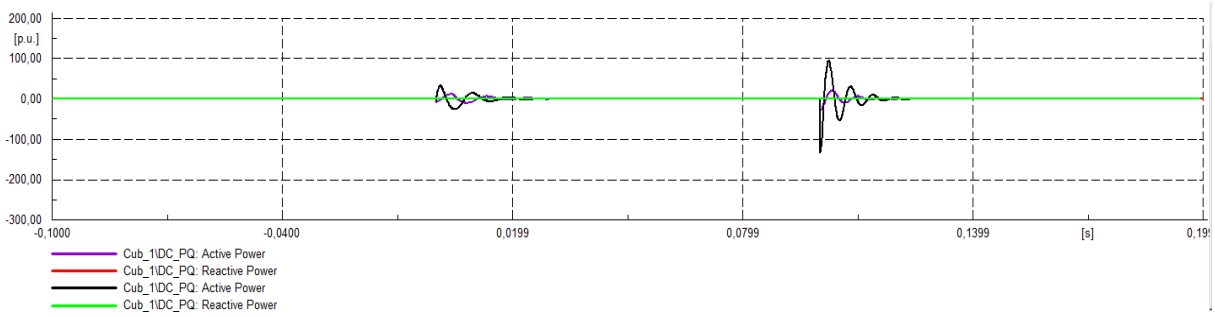


Slika 5.29 Struja STATCOM – a

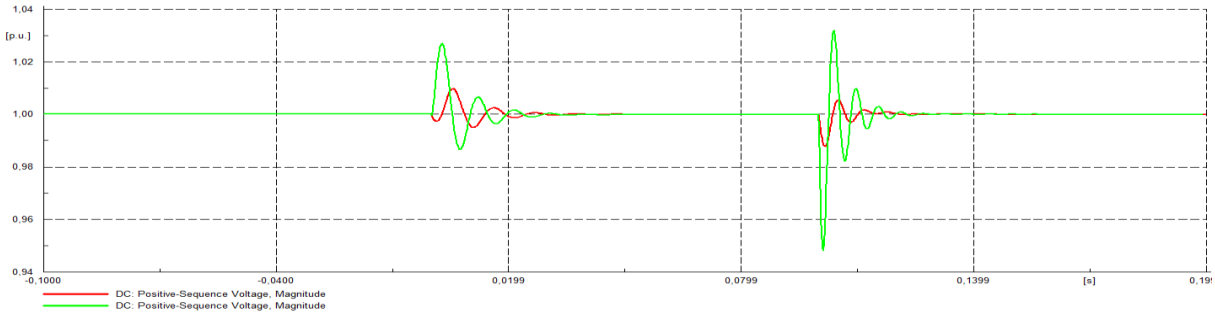


Na slikama 5.28 i 5.29 vidljivo je da STATCOM isporučuje svoju nazivnu snagu promatrajući zelenu liniju dok je iznos snage promatrajući crvenu liniju niži od nazivne snage STATCOM – a, a dok je struja maksimalna u oba slučaja. Na slici 5.29 vidljivo je da se javlja do sada najveći iznos i_d komponente struje za vrijem kratkog spoja. Na slikama 5.30 i 5.31 prikazani su snaga na DC sabirnici odnosno napon na DC sabirnici STATCOM – a prilikom kratkog spoja na vodu Ernestinovo – Ugljevik i ispada istog voda.

Slika 5.30 Snaga na DC sabirnici STATCOM - a



Slika 5.31 Napon na DC sabirnici STATCOM - a



S obzirom da je ovo do sada najnepovoljniji slučaj na slikama 5.30 i 5.31 mogu se primijetiti velike oscilacije aktivne snage i napona na DC sabirnici u trenutku nastanka kratkog spoja kao i za vrijeme isključenja voda iz pogona. U tablici 5.13 dana je usporedba dinamičkih osobina STATCOM – a prilikom korištenja različitih konstanti regulatora za trofazni kratki spoj na vodu Ernestinovo – Ugljevik na 50 % duljine voda.

Tablica 5.13 Usporedba dinamičkih osobina STATCOM – a

	Nadvišenje napona	Vrijeme stabilizacije napona	Najniža vrijednost napona prilikom kvara	Napon tijekom kvara
Parametri 1	9.9 %	0.044 s	0.304 p.u.	0.328 p.u.
Parametri 2	25.2 %	0.024 s	0.306 p.u.	0.373 p.u.

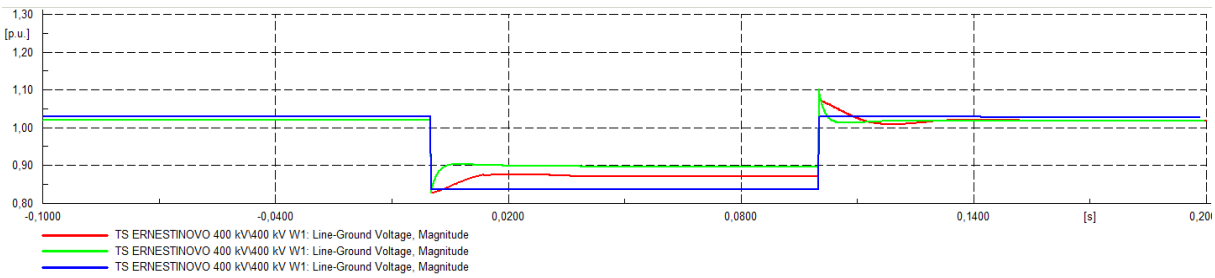
5.2.4. Kvar u 110 kV mreži

U ovom slučaju promatrati će se odziv kompenzacije prilikom ispada vodova Ernestinovo – Vukovar na 110 kV strani kao i voda Osijek – Našice. Simulirati će se trofazni kratki spoj impedancije 0 Ω u trenutku 0 s na svakom od vodova na lokaciji od 50 % njihove duljine. Nakon 0.1 s vod se isključuje iz pogona.

- **Trofazni kratki spoj impedancije 0 Ω na 50 % duljine voda Ernestinovo – Vukovar**

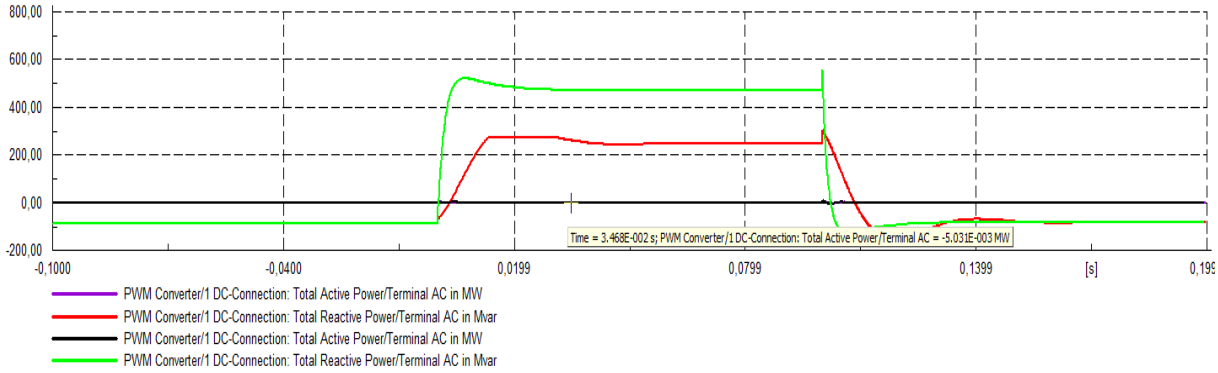
Na slici 5.32 prikazan je odziv napona na 400 kV sabirnici za vrijeme kratkog spoja na vodu.

Slika 5.32 Oblici napona za vrijeme 3FKS – a na 50% voda Ernestinovo – Vukovar

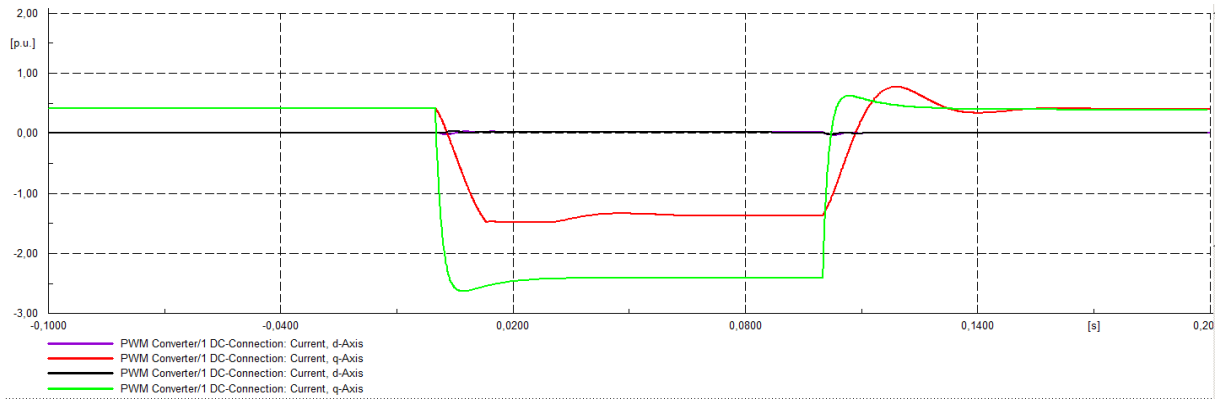


S obzirom da se radi o kratkom spoju na 50 % duljine voda na 100 kV strani mreže primjećuje se da je pad napona manji nego u prethodnim slučajevima. Vidljivo je da je i nadvišenje napona u trenutku isklapanja voda manje nego u prethodnim slučajevima. Promatrajući i zelenu i crvenu liniju vidljivo je da je pad napona za vrijeme kratkog spoja u dozvoljenim granicama koje su propisane mrežnim pravilima za vrijeme poremećenog pogona i koje su vidljive u potpoglavlju 2.2.3. Na slikama 5.33 i 5.34 prikazani su odzivi snage na AC sabirnici odnosno i_d i i_q struja STATCOM – a .

Slika 5.33 Snaga na AC sabirnici STATCOM – a

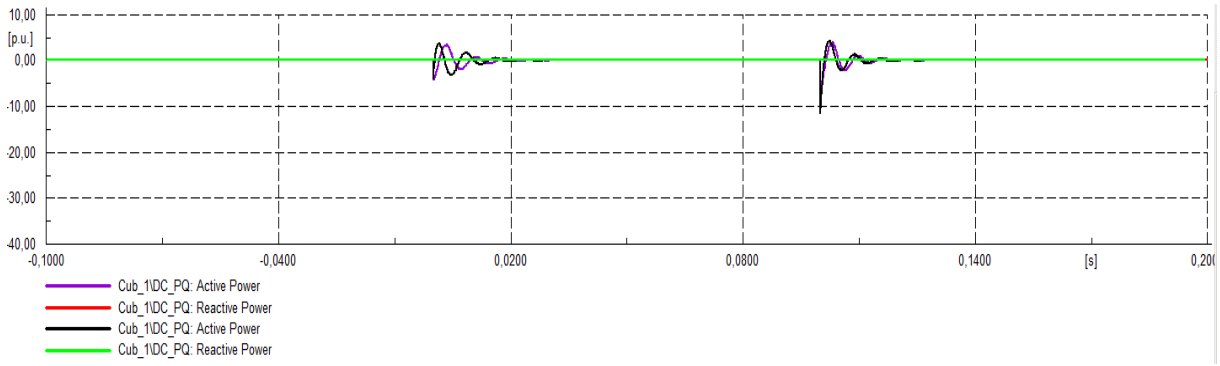


Slika 5.34 Struja STATCOM – a

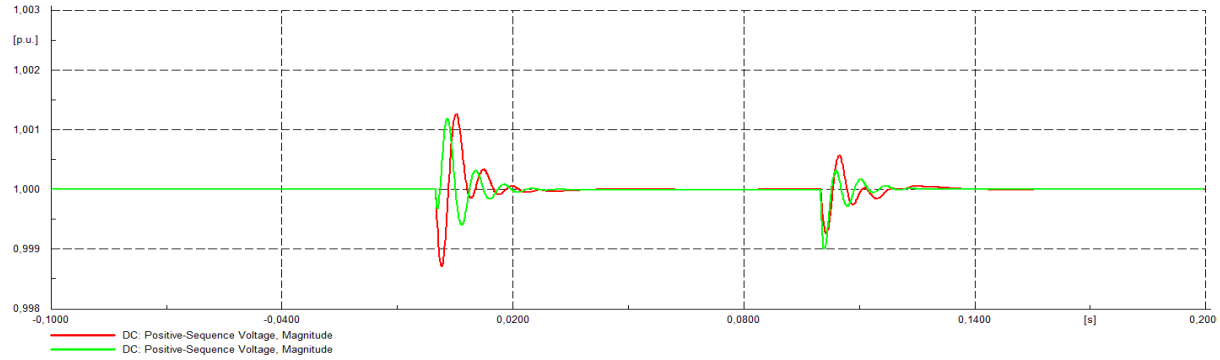


Promatrajući zelenu i crvenu liniju na slikama 5.33 i 5.34, vidljivo je da STATCOM radi punim kapacitetom za vrijeme trajanja kratkog spoja u oba slučaja dok se ostatak jalove snage uzima iz mreže. Komponenta struje i_q u oba slučaja je manjih vrijednosti od maksimalne vrijednosti. Na slikama 5.35 i 5.36 prikazani su snaga na DC sabirnici odnosno napon na DC sabirnici STATCOM – a prilikom kratkog spoja na vodu Ernestinovo – Vukovar i ispada istog voda.

Slika 5.35 Snaga na DC sabirnici STATCOM - a



Slika 5.36 Napon na DC sabirnici STATCOM - a



Vidljivo je da se u trenutku kratkog spoja i u trenutku isklapanja voda iz pogona javljaju oscilacije aktivne snage i napona na DC sabirnici STATCOM – a malih amplituda. U tablici 5.14 dana je usporedba dinamičkih osobina STATCOM – a prilikom korištenja različitih konstanti regulatora za trofazni kratki spoj na vodu Ernestinovo – Vukovar na 50 % duljine voda.

Tablica 5.14 Usporedba dinamičkih osobina STATCOM – a

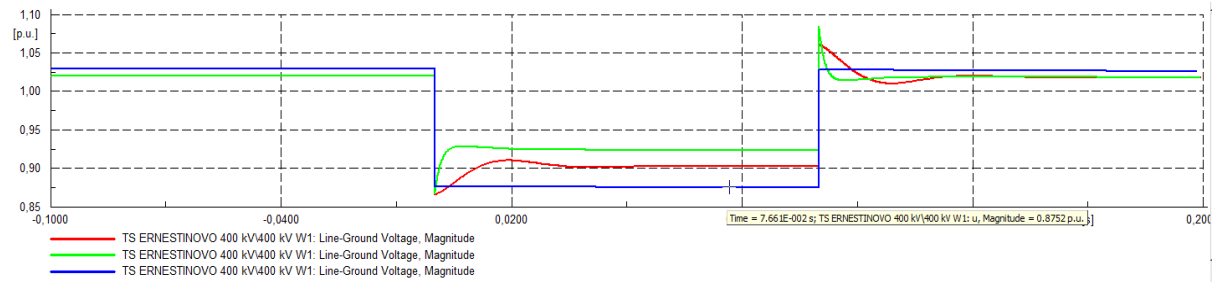
	Nadvišenje napona	**Vrijeme stabilizacije napona**	**Najniža vrijednost napona prilikom kvara**	**Napon tijekom kvara**
Parametri 1	5.1 %	0.049 s	0.827 p.u.	0.871 p.u.
Parametri 2	8.04 %	0.026 s	0.828 p.u.	0.898 p.u.

Simulirajući trofazne kratke spojeve impedancije 0 Ω na ostalim vodovima priključenim na 110 kV sabirnicu u TS Ernestinovo dobiju se veoma slični rezultati ovom slučaju.

- **Trofazni kratki spoj impedancije 0 Ω na 50 % duljine voda Osijek – Našice**

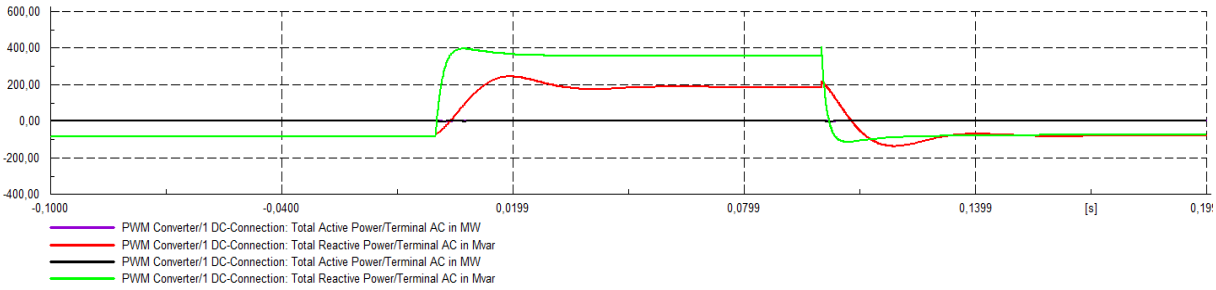
Na slici 5.37 prikazan je odziv napona na 400 kV sabirnici za vrijeme kratkog spoja na vodu.

Slika 5.37 Oblici napona za vrijeme 3FKS – a na 50% voda Osijek - Našice

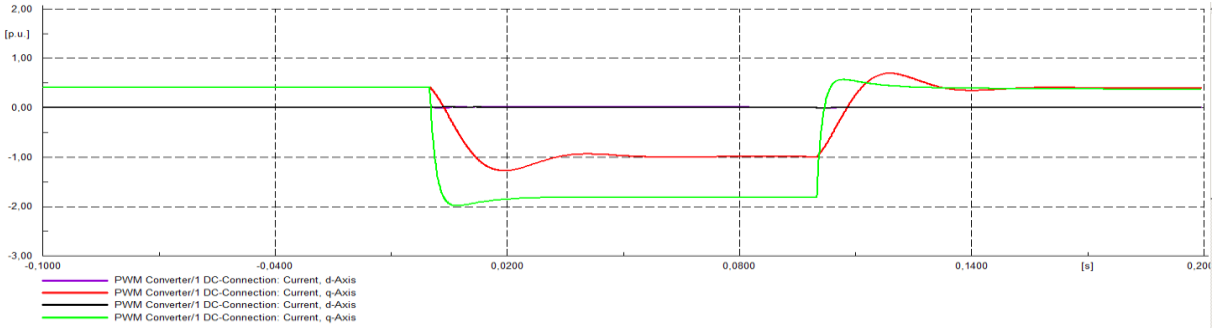


S obzirom da je vod Osijek – Našice na 110 kV naponskoj razini mreže i da je udaljen od TS Ernestinovo tako je i napon za vrijeme kratkog spoja u zadovoljavajućim granicama. Također i u ovom slučaju je napon za vrijeme kratkog spoja u dozvoljenim granicama koje su propisane mrežnim pravilima. Primjećuje se pad napona u trenutku kratkog spoja na otprilike 0.86 p.u, ali nakon toga STATCOM diže napon na zadovoljavajuću razinu prilikom korištenja obje vrste parametara regulatora STATCOM – a. Na slikama 5.38 i 5.39 prikazani su odzivi snage na AC sabirnici odnosno i_d i i_q struja STATCOM – a za vrijeme trofaznog kratkog spoja na 50 % duljine voda Osijek – Našice..

Slika 5.38 Snaga na AC sabirnici STATCOM – a

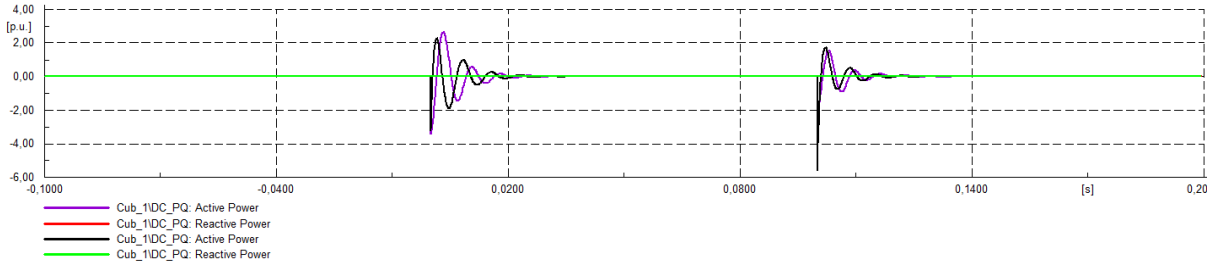


Slika 5.39 Struja STATCOM – a

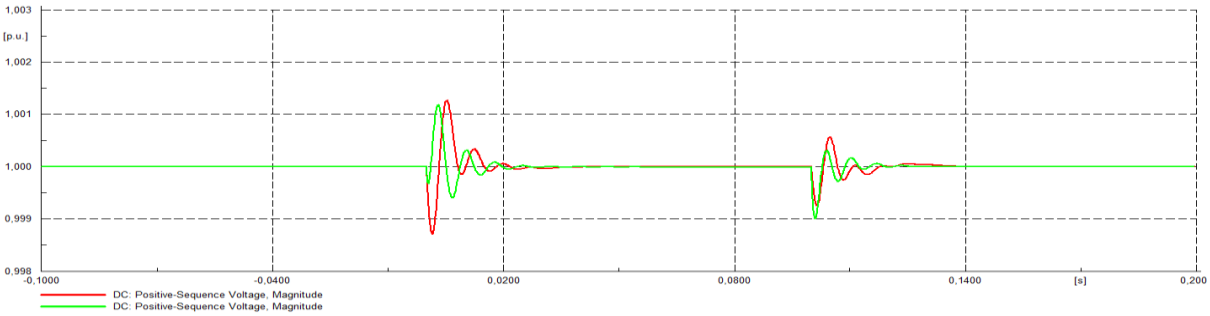


Prilike injektirane snage u regulirani čvor kao i iq komponente struje su slične kao u proteklom slučaju, ali manjih vrijednosti, a razlog tomu je udaljenost pogođenog voda od reguliranog čvora. Aktivna snaga na AC sabirnici kao i i_d komponenta struje su zanemarive veličine. Na slikama 5.40 i 5.41 prikazani su snaga na DC sabirnici odnosno napon na DC sabirnici STATCOM – a prilikom kratkog spoja na vodu Osijek - Našice i ispada istog voda.

Slika 5.40 Snaga na DC sabirnici STATCOM - a



Slika 5.41 Napon na DC sabirnici STATCOM - a



Kao i prethodne promatrane veličine i amplitude oscilacija aktivne snage i napona na DC sabirnici u veoma malog iznosa. U tablici 5.15 dana je usporedba dinamičkih osobina STATCOM – a prilikom korištenja različitih konstanti regulatora za trofazni kratki spoj na vodu Osijek - Našice na 50 % duljine voda.

Tablica 5.14 Usporedba dinamičkih osobina STATCOM – a

	Nadvišenje napona	**Vrijeme stabilizacije napona**	**Najniža vrijednost napona prilikom kvara**	**Napon tijekom kvara**
Parametri 1	4.02 %	0.044 s	0.865 p.u.	0.924 p.u.
Parametri 2	6.27 %	0.037 s	0.866 p.u.	0.902 p.u.

Prilikom ispada ostalih udaljenih vodova u 110 kV mreži kao i ostalih nadomjesnih mreža koje se nalaze na istoj naponskoj razini, poput Apatina ili Tuzle koja se nalazi na 220 kV naponskoj razini, stvaraju se veoma slične naponske prilike poput ovog slučaja, na 400 kV sabirnici u TS Ernestinovo.

Promatrajući sve do sadašnje slučajeve vidljivo je da odziv napona na 400 kV sabirnici u TS Ernestinovo prvenstveno ovisi o udaljenosti kratkog spoja od sabirnice. Na naponske prilike za vrijeme kratkog spoja kao i u trenutku otklanjanja kratkog spoja ili isklapanja pogođenog voda može se utjecati promjenom snage STATCOM – a kao i različitim izborom parametara, međutim daljnjim povećavanjem snage utječe se na cijenu samog uređaja, ali i povećavanje snage može negativno utjecati na naponske prilike na 400 kV sabirnici te na kraju dovesti do

naponskog sloma kao u primjeru trofaznog kratkog spoja na 50% duljine voda Ernestinovo – Ugljevik kada se isklapanjem voda dovodi do ispada nadređene mreže Ugljevik 400 kV. Različitim zborom parametara regulatora STATCOM - a utječe se na veličine kao što su brzina odziva (Tv, Trac) i nadvišenje napona (Kv), ali i na iznos injektirane jalove snage u promatrani čvor (i_min, i_max) što je vidljivo u dosadašnjim razmatranjima.

6. ZAKLJUČAK

Zadatak rada je bio određivanje optimalnog tipa FACTS uređaja za ugradnju u TS 400/110 kV Ernestinovo uvažavajući dio prijenosne mreže Prijenosnog područja Osijek s aspekta dinamike odnosno odziva u različitim prijelaznim pojavama. U teoretskom dijelu u drugom poglavlju rada detaljno je opisana teorija prijenosa električne energije kao i regulacija napona te su iz mrežnih pravila preuzeti nazivni naponi i njihova dozvoljena odstupanja. Treće poglavlje se odnosi na klasifikaciju stabilnosti sustava i detaljnu razradu naponske stabilnosti sustava gdje je osvrt bio podjednako i na statička i dinamička razmatranja naponske stabilnosti sustava. Četvrto poglavlje opisuje različite vrste FACTS uređaja u kojem se detaljno razrađuje način rada i prednosti i nedostatci svakog od uređaja. Usporedbom poprečnih FACTS uređaja SVC – a i STATCOM – a i dolazi se do zaključka da je STATCOM najbolja opcija koja osigurava učinkovitu regulaciju napona i poboljšanje dinamičke stabilnosti u elektroenergetskom sustavu te se upravo odabire STATCOM kao FACTS uređaj za ugradnju u TS Ernestinovo na 400 kV sabirnicu. Glavna prednost STATCOM – a je ta da može kontrolirati izlaznu vrijednost struje povećanjem opsega kapaciteta i induktiviteta, neovisno o izmjeničnom naponu sustava, kao i vremenski odzivi kompenzacije kao i širina naponske regulacije koja je mnogo bolja nego kod SVC - a. U petom poglavlju napravljena je analiza naponskih stanja u TS Ernestinovo na 400 kV sabirnici kao i svim vodovima koji su priključeni na tu sabirnicu tijekom jedne godine. Provedenom analizom dolazi se do izbora elemenata koji će biti uzeti u obzir prilikom vršenja simulacija dinamičke stabilnosti. Koristeći software DIgSILENT PowerFactory, modeliran je STATCOM i njegov regulator koji kontrolira injekciju i_d i i_q komponente struje u promatrani čvor. Implementacijom QPU_sweep skripte u software i njezinom provedbom odabiru se tri naponske radne točke i određuju se za svaku opseg kompenzacije i ukupna snaga STATCOM uređaja. Pri provedbi dinamičke analize napravljene su dvije strukture regulatora STATATCOM – a s različitim parametrima, kojima se može utjecati na veličine kao što su brzina odziva i iznos injektirane struje u regulirano čvorište, da i se utvrdo utjecaj parametara na regulaciju napona u promatranom čvorištu. Iz napravljenih analiza može se zaključiti da je odziv kompenzacije nešto bolji prilikom korištenja regulatora parametriranim prema parametrima 2 iz tablice 5.4 gdje se vidi da je iznos napona za vrijeme kratkog spoja najvećeg iznosa i da je odziv kompenzacije najbrži. Povećavanje nazivne snage STATCOM – a u nekim slučajevima donosi blago povećanje napona za vrijeme kratkog spoja, međutim prilikom kratkog spoja na vodu Ernestinovo – Ugljevik dolazi do negativnog utjecaja

povećanja snage STATCOM – a kada dolazi do kolapsa napona na 400 kV sabirnici. Također daljnje poboljšanje parametara regulatora STATCOM – a u nekim slučajevima donosi iste negativne posljedice.

LITERATURA

[1] T. Plavšić, I. Kuzle, Regulacija napona i jalove snage kao pomoćna usluga sustava, Energija, Vol. 54 (2005) No. 5, str. 385 – 397

[2] L. Jozsa, Predavanja iz kolegija Elektroenergetske mreže, 2012./2013.

[3] I. Uglešić, Tehnika visokog napona, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2002.

[4] B. Udovičić, Elektroenergetski sustav, Kigen, Zagreb, 2005.

[5] G. Majstorović, M. Džamarija, D Bajs, Regulacija napona i kompenzacija jalove snage u elektorenergetskom sustavu, EIHP, Zagreb, srpanj, 2009.

[6] L. Jozsa, Vođenje pogona elektroenergetskog sustava, Sveučilišete Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Osijek, 2015.

[7] M. Kalea, Prijenos električne energije, što je to?, Kigen, Zagreb, 2006.

[8] Mrežna pravila elektroenergetskog sustava, Narodne novine, (br. 36/06), (http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/126651.html), pristup ostvaren 24.03.2016.

[9] S. Ćurlin, Naponska stabilnost elektroenergetskog sustava, HEP – OPS d.o.o., Zagreb, Hrvatska, 2003.

[10] L. Jozsa, Predavanja iz kolegija Analiza elektroenergetskog sustava, 2013./2014.

[11] J. Machowski, J. W. Bialek, J. R. Bumby, Power system dynamics: stability and control, John Wiley & Sons, Chippenham, Wiltshire, 2008.

[12] M. Lovrić, R. Goić, Problemi i mogući načini riješavanja naponskih prilika u prijenosnoj mreži dalmacije, Energija, Vol 49 (2000), No 3, str 171 – 176.

[13] S. Smaka, Predavanja iz kolegija Elektroenergetski sistemi 2, Predavanje IV, 2014/2015.

[14] N. Dizdarević, Mogućnost povećanja prijenosne moći EES –a korištenjem konvencionalnih i FACTS naprava, Energija, Vol 50 (2001), No 5, str. 323-348

[15] M. Blasina, V. Komen, R. Ćućić, Regulacija napona i kompenzacija jalove snage pomoću SVC uređaja, Engineering review, Vol 30 (2010), No. 2, str. 47 – 58.

[16] G. Glanzmann, FACTS Flexible Alternating Current Systems, EEH – Power System Laboratory, ETH Zurich, 14. January 2015.

SAŽETAK

Ključne riječi: Prijenos električne energije, kompenzacija jalove snage, stabilnost sustava, FACTS, STATCOM

Zadatak diplomskog rada je bio određivanje optimalnog FACTS uređaja za ugradnju u TS 400/110 kV Ernstinovo pri tome uvažavajući dio prijenosne mreže Prijenosnog područja Osijek s aspekta dinamike odnosno odziva kompenzacije u slučaju raznih prijelaznih pojava poput kratkog spoja u trafostanici, ispada nadređene mreže i kritičnog voda te kvara u 110 kV mreži. Pobliže je opisan prijenos električne energije i odnos napona i jalove snage kao i naponska stabilnost sustava i različiti tipovi FACTS uređaja. Na 400 kV sabirnicu u TS Ernestinovo priključen je STATCOM koji je parametriran u softwareu DIgSILENT PowerFactory. Implementiranjem QPU_ sweep skripte u navedeni software određeni su parametri STATCOM – a poput nazivne snage i opsega kompenzacije za određene naponske radne točke. Na kraju rada je provedena je usporedba dvije strukture regulatora STATCOMA te njihov utjecaj na napon prilikom nabrojanih prijelaznih pojava, snagu kompenzacije kao i brzinu odziva kompenzacije.

ABSTRACT

Key words: Electrical energy transfer, reactive power compensation, system stability, FACTS, STATCOM

The task of this thesis was identifying optimal FACTS device to be installed at the 400/100kV power sub-station in Ernestinovo, at the same time having in mind part of the transport network of Transmission area of Osijek, from the aspect of dynamics, i.e. the response compensation in case of various transient phenomena, such as the short-circuit in power sub-station, major network and critical line outage, and failure in 110kV network. The electrical energy transfer and the relation between voltage and reactive power, as well as voltage system stability and various types of FACTS devices have also been described.The STATCOM which was modified into DIgSILENT PowerFactory software has been connected to 400kV busbar in power sub-station in Ernestinovo. By the implementation of the QPU_ sweep script into the previously mentioned software, the parameters of STATCOM, such as rated output and compensation range for specific voltage study points have been defined. Finally, the comparison between the two structures of STATCOM controllers has been made, and their impact on voltage during the previously mentioned transient phenomena, the compensation power, as well as response compensation rate.

ŽIVOTOPIS

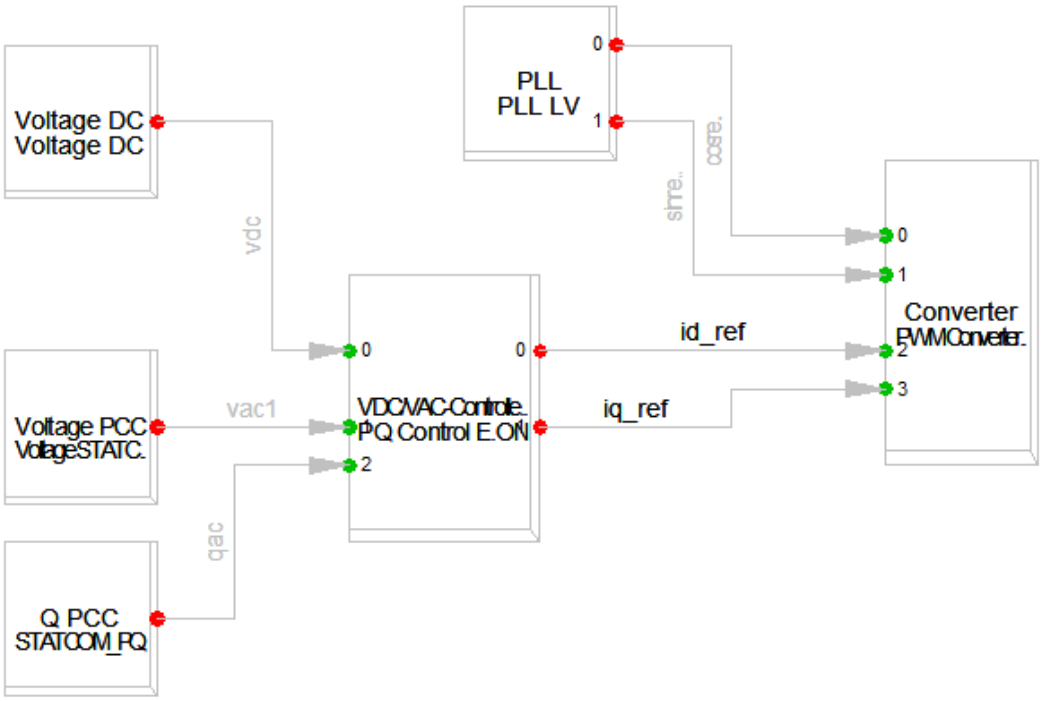
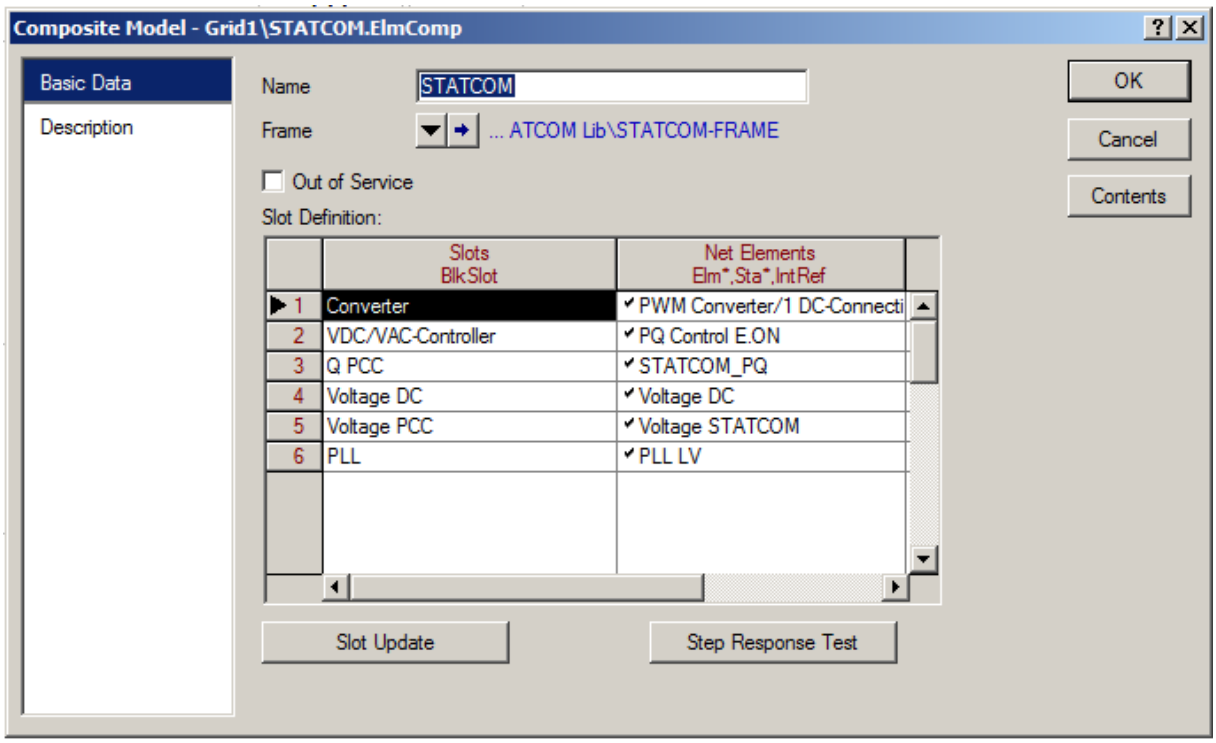
Davor Junušić rođen je u Novom Sadu u Republici Srbiji 01.03.1992. godine. Završio Osnovnu školu „Ernestinovo“ u Ernestinovu, te zatim upisao srednju Elektrotehničku i prometnu školu Osijek 2006. godine, smjer elektrotehnika. Nakon završene srednje škole upisuje preddiplomski studij na elektrotehničkom fakultetu u Osijeku. Na drugoj godini preddiplomskog studija odabire smjer elektroenergetika. Godine 2013. Završava preddiplomski studij i iste godine upisuje diplomski studij smjera elektroenergetika na elektrotehničkom fakultetu u Osijeku.

_____

(VLASTORUČNI POTPIS)

Prilog P1: Kompozitni model STATCOM – a

Slika P1.1. Blok dijagram kompozitnog modela STATCOM – a



Slika P1.2. Parametarske lokacije kompozitnog modela sinkronog generatora