

MODEL STATIČKOG VAR KOMPENZATORA PRI REGULACIJI NAPONA STATIC VAR COMPENSATOR MODEL FOR VOLTAGE CONTROL

Mihajlo Govorčin, Marko Vekić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj- *Ovaj rad analizira neke od osnovnih FACTS uređaja sa naglaskom na SVC-u. Opisane su prednosti i uloge FACTS uređaja. Dati su rezultati simulacije dinamičkog odziva SVC-a pri regulaciji napona u sabirnici priključenja.*

Ključne reči: *FACTS uređaji, kompenzacija reaktivne snage, nadzor napona, SVC*

Abstract- *This paper deals with FACTS devices and their applications. The advantages of FACTS devices with emphasis on SVC, are described. The results of dynamic SVC simulation are presented.*

Keywords: *FACTS devices, reactive power compensation, voltage control, SVC*

1. UVOD

Tehnologija FACTS uređaja (Flexible AC Transmission Systems) otvara nove mogućnosti [1] za upravljanje tokom snage i povećanje iskoristivosti postojećih, kao i novih i nadograđenih prenosnih vodova. Mogućnost nadzora struje, a time i snage, u prenosnom vodu omogućava povećanja kapaciteta postojećih vodova. Te mogućnosti proizlaze iz sposobnosti FACTS uređaja da nadziru međusobno povezane parametre koji regulišu rad prenosnih sistema, uključujući rednu impedansu, otočnu impedansu, struju, napon, fazni stav i prigušenje oscilacija.

U FACTS uređaje spadaju: otočni Var kompenzator (SVC), tiristorski upravljana prigušnica (TCR), tiristorski prekidana prigušnica (TSR), tiristorski uključivan kompenzator (TSC), statički sinhroni kompenzator (STATCOM), tiristorski uključivan redni kompenzator (TSSC), statički redni sinhroni kompenzator (SSSC) itd. U ovom radu će naglasak biti stavljen na otočno povezane FACTS uređaje, u prvom redu SVC.

2. Otočni statički kompenzator

Kompenzacija se koristi da bi se uticalo na prirodne električne karakteristike voda, da bi se povećala nazivna prenosna snaga i da bi se nadzirao profil napona duž voda. Najpoznatiji otočni kompenzatori su SVC i STATCOM.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Marko Vekić, docent.

Statički Var kompenzator (SVC) je može da deluje kao izvor ili ponor reaktivne snage [2] koji je podešen za razmenu kapacitivne ili induktivne struje kako bi se održali ili nadzirali specifični parametri elektroenergetskog sistema. Dejstvo SVC-a je zasnovani na induktivnim i kapacitivnim elementima u kombinaciji sa prekidačima energetske elektronike. Na taj način odziv i dinamika SVC-a je značajno brža od sinhronih kompenzatora koji su u suštini sinhronne mašine. U SVC spada nekoliko klasa FACTS uređaja kao što su: TCR, TSR i TSC.

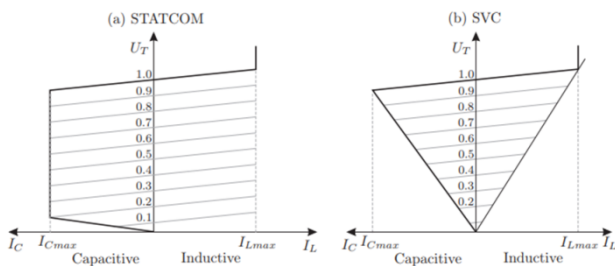
STATCOM radi kao otočno spojeni statički var kompenzator čija se kapacitivna ili induktivna struja može kontrolisati nezavisno od napona. STATCOM je kontrolisani izvor reaktivne snage. On obezbeđuje naponsku podršku generisanjem ili prigušenjem reaktivne snage u sabirnici priključenja bez potrebe za velikim spoljnim prigušnicama ili kondenzatorskim baterijama.

3. Poređenje otočnih kompenzatora

SVC i STATCOM su slični po svojim sposobnostima kompenzacije, ali osnovna načela rada su različita. STATCOM deluje kao otočno povezani izvor napona, dok SVC deluje kao upravljiva reaktivna admitansa koja je otočno povezana. Ova razlika se ogleda u funkcionalnim karakteristikama STATCOM-a. STATCOM, kao nezavisan naponski izvor ima veću moć kompenzacije i veći opseg primena od onih koje se mogu postići sa SVC-om, ali SVC je jednostavniji i jeftiniji za primenu.

U linearnom radnom opsegu U-I karakteristike (Slika 1) i sposobnosti kompenzacije STATCOM-a i SVC-a su slične [3]. Što se tiče nelinearnog radnog opsega, STATCOM može da kontroliše svoju izlaznu struju nezavisno od napona mreže, dok maksimalna kompenzujuća struja SVC-a linalno opada sa AC naponom, pošto je SVC u suštini kontrolisana susceptansa. Tako je STATCOM delotvorniji od SVC-a u obezbeđivanju naponske podrške pri velikim sistemskim smetnjama tokom kojih bi naponska odstupanja bila daleko izvan linearnog radnog opsega kompenzatora. Sposobnost STATCOM-a da održava punu kapacitivnu izlaznu struju pri niskim naponima sistema čini ga efikasnijim od SVC-a u poboljšanju stabilnosti.

Vreme odziva i propusni opseg regulacione petlje napona STATCOM-a su takođe značajno bolji od onih kod SVC-a. U situacijama kada je neophodno obezbediti dotok aktivne snage, STATCOM je u mogućnosti da poveže odgovarajuće skladište energije (veliki kompenzator, baterija) odakle može povući aktivnu snagu i isporučiti ju putem pretvarača kao AC snagu sistemu, dok SVC nema tu sposobnost.



Slika 1: U-I karakteristike STATCOM-a (a) i SVC-a (b)

Glavna prednost SVC-a je u kompenzaciji na visokom naponu gde bi pogon STATCOM-a bio znatno skuplji, kao i načelno jednostavnija i jeftinija izvedba SVC-a koji je sposoban vrlo uspešno vršiti kompenzaciju sve do značajnog pada napona.

4. Statički redni kompenzatori

Promenljiva redna kompenzacija je veoma delotvorna kako u nadzoru protoka snage tako i u poboljšanju stabilnosti. Sa rednom kompenzacijom, ukupna impedansa voda može se proizvodno smanjiti, što utiče na tok snage ($P = U^2/X \cdot \sin\delta$). Ova sposobnost kontrole protoka snage može se efikasno koristiti za povećanje granice stabilnosti i za prigušenje oscilacija snage. Neke od vrsta statičkih rednih kompenzatora su: Tiristorski uključivan redni kompenzator (TSSC), Tiristorski upravljana redna kapacitivnost (TCSC), GTO Tiristorski upravljani redni kondenzator (GCSC) i Statički redni sinhroni kompenzator (SSSC).

5. Način i mesto postavljanja SVC-a

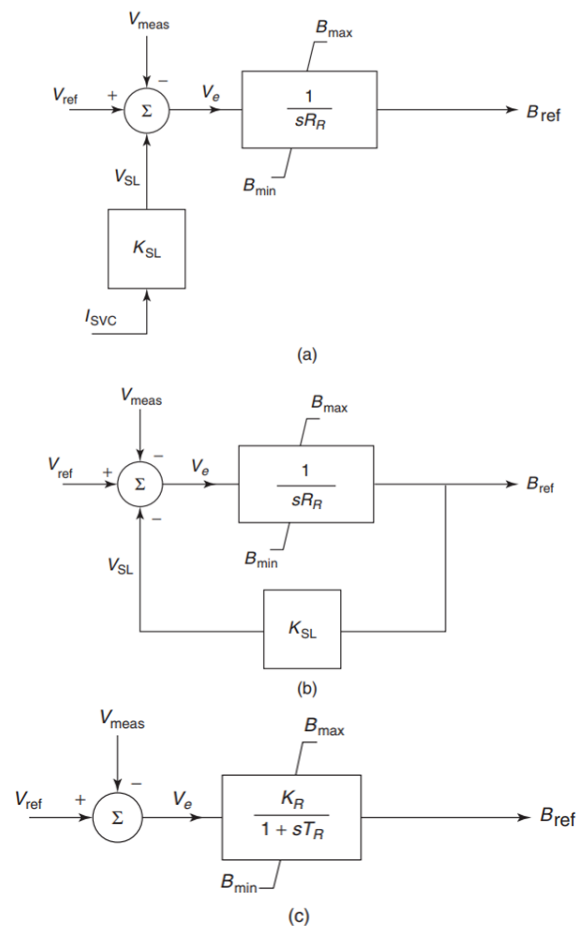
Kompenzator može da se postavi na različitim mestima voda. Postavljanjem SVC-a na sredini voda i time razdvajanje voda na dva dela, napon u ovoj tački može se kontrolisati tako da ima istu vrednost kao i naponi na kraju voda. Time se povećava maksimalni prenos snage. Ako je kompenzator postavljen na kraju voda otopno sa opterećenjem, moguće je regulisati napon na tom kraju i time sprečiti nestabilnost napona uzrokovanu promenama opterećenja. Pošto je otočna kompenzacija u stanju da moduliše tok struje, može se povećati granica prelazne stabilnosti i obezbediti prigušenje oscilacija snage (tzv. aktivno prigušenje).

6. Regulacija napona pomoću SVC-a

Regulator napona SVC obrađuje izmerene veličine merenog sistema i proizvodi izlazni signal koji je srazmeran željenoj kompenzaciji reaktivne snage. Izmerene upravljačke promenljive porede se sa referentnim signalom, obično V_{ref} , a signal greške je ulaz funkcije prenosa regulatora. Izlaz regulatora je željena vrednost susceptanse B_{ref} kojom se postiže zadata referentna vrednost napona u sabirnici priključenja. Obično se ugrađuje mali nagib [4] ili pad (3-5%) u karakteristiku SVC-a kako bi se postigle određene prednosti. Moguće primene ovog nagiba u modelu regulatora napona prikazane su na slici 2; na slici 2a prikazan je slučaj sa povratnom spregom po struji SVC-a. Izmerena vrednost struje je pomnožena sa faktorom K_{SL} koji predstavlja nagib (droop) struje pre nego što se sabere sa naponom V_{SL} . V_{SL} je takav da odgovara povećanju referentnog napona za induktivne SVC struje i smanjenje

referentnog napona za kapacitivne SVC struje. Jednostavno integralno dejstvo se najčešće koristi u naponskim regulatorima. Primitimo da u kombinaciji sa padom (droop-om) čini zapravo PI regulator. Brzina odziva η_R ukazuje na vreme koje je potrebno SVC-u da se kreće kroz čitav opseg reaktivne snage, tj. od potpuno kapacitivnog do potpuno induktivnog stanja kao u cilju regulacije napona.

U određenim slučajevima, može biti teško da se dobije veran strujni signal. Ovo se dešava kada SVC radi blizu svog nestacionarnog stanja, tj. pri nultoj reaktivnoj snazi. Strujni signal tada sadrži harmonijske komponente i osnovnu komponentu koja odgovara stvarnim gubicima u SVC-u. Da bi se prevazišao ovaj problem, u nekim SVC regulatorima se koristi procenjena reaktivna snaga u regulaciji umesto signala struje. Signal reaktivne snage izračunava se množenjem faznih struja SVC-a sa osnovnim harmonikom napona koji zaostaje za stvarnim naponom za 90° .



Slika 2: Moguće primene strujnog nagiba (droop-a) u regulatoru napona: a) integrator sa povratnom spregom struje; b) integrator sa povratnom spregom pri padu susceptanse; c) pojačanje vremenske konstante

Druga mogućnost koja se može lako postići je povratna sprega sa droop-om po susceptansi koja je prikazana na slici 2b. Podrazumeva se da napon SVC sabirnice ostaje blizu 1 r.j.p a je struja SVC-a strogo jednaka B_{ref} . V_{SVC} se jednostavno može izraziti kao B_{ref} u r.j. Upravljački sistem zatvorene petlje na slici 2b može se pojednostaviti kao na slici 2c. Pojačanje K_R se naziva statičko pojačanje, koje je definisano kao inverzna vrednost droop-a struje.

$$K_R = \frac{1}{K_{SL}}$$

Takođe

$$T_R = \frac{\eta_R}{K_{SL}}$$

Pojačanje K_T , predstavlja dinamičku prirodu regulatora napona i definiše se kao:

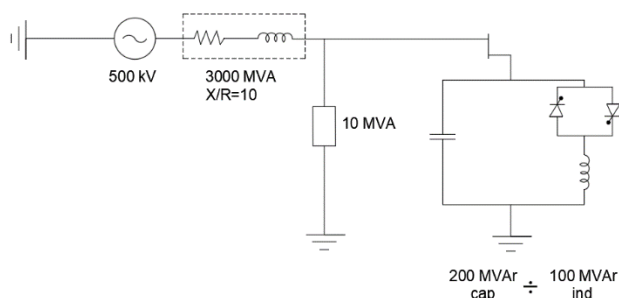
$$K_T = \frac{K_R}{T_R}$$

Droop struje regulatora napona osigurava linearnost između napona SVC-a i struje SVC-a u upravljačkom opsegu. Povratna sprega po padu susceptanse obezbeđuje linearnost između susceptanse SVC-a i napona koja se odražava u neznatno nelinearnom odnosu napona i struje u slučaju varijacije napona. Međutim, neusaglašenost između ove dve predstave nije značajna, jer je droop obično veoma mali, a varijacije napona SVC-a generalno nisu velike. Dinamičko delovanje SVC-a može biti predstavljeno od strane bilo kog od ova dva pristupa.

Prednost modela droop-a struje je da karakteristika ustaljenog stanja (opisana uz pomoć K_R) i dinamička karakteristika (uvažena preko R_p) mogu biti nezavisno određene. U modelu pojačanja vremenske konstante, karakteristike prelaznog i ustaljenog stanja su međusobno povezane kroz parametra K_R i T_R . Model pojačanja vremenske konstante je naširoko korišćen u SVC modelovanju za SVC ispitivanja, iako integrator sa padom struje predstavlja fizičku realizaciju većine postavljenih SVC-ova.

7. Simulacija dinamičkog odziva SVC-a

Simuliraćemo sistem sa slike 3 predstavljen pofaznom šemom. Pretpostavljamo da je dati sistem uravnotežen.



Slika 3: Simulirani sistem predstavljen pofaznom šemom

Usvojili smo bazne vrednosti:

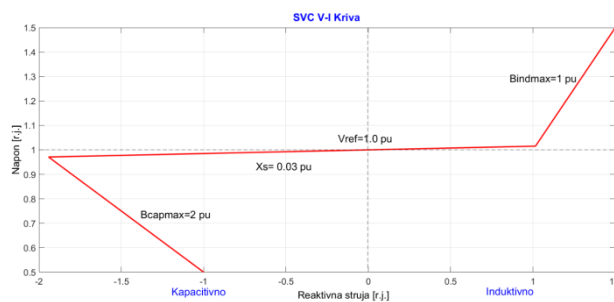
$$S^b = 100\text{MVA} \quad , \quad V^b = 500\text{kV}$$

Pošto je:

$$S^b = \sqrt{3} \cdot V^b \cdot I^b = \sqrt{3} \cdot V^b \cdot B^b \cdot V^b$$

$$\Rightarrow B^b = \frac{S^b}{\sqrt{3}(V^b)^2}$$

Za vrednost kondenzatorske baterije SVC-a usvojeno je $B_{cap}^{max} = 2 \cdot B^b$, dok je za prigušnicu SVC-a usvojeno $B_{ind}^{max} = 1 \cdot B^b$. Za nagib karakteristike SVC-a je usvojen pad (droop) od 0.03. Karakteristika SVC-a je prikazana na slici 4.



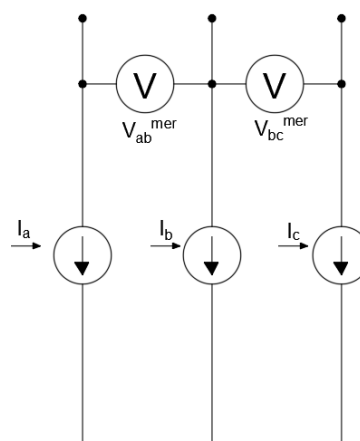
Slika 4: Karakteristika SVC-a

Nagib X_S jasno ukazuje da će postojati izvesno malo odstupanje stvarne vrednosti napona koja se postiže dejstvom SVC-a u odnosu na željenu.

Zbog ovog malog odstupanja u naponu postiže se značajno smanjenje neophodnih struja, odnosno reaktivne snage SVC-a da bi se postigao napon blizak željenom.

Model SVC-a koji smo primenili je pojednostavljen u smislu da je dejstvo SVC-a modelovano upravljanim strujnim izvorima (slika 5).

Odgovarajuće fazne struje su dobijene na osnovu regulisane promenljive susceptanse (koja se dobije kao izlaz regulatora napona) i odgovarajućih faznih napona mreže.

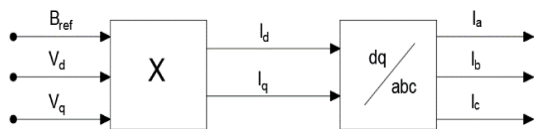
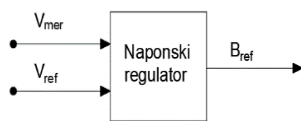
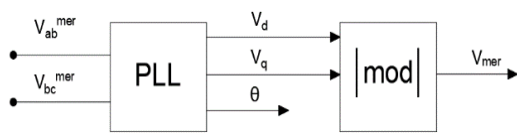


Slika 5: Pojednostavljen model SVC-a prikazan preko nadziranih strujnih izvora

Na osnovu merenih napona se iz bloka PLL-a [5] dobije modul fazora napona i njegov ugao (slika 6).

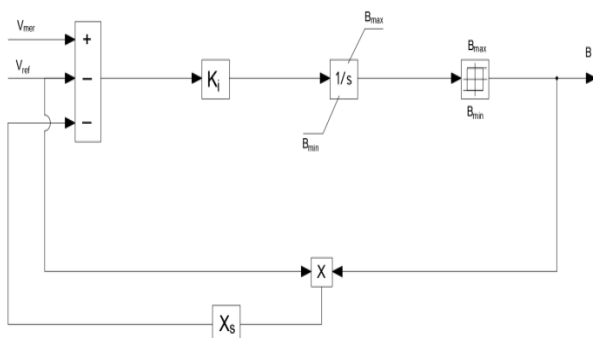
Naponski regulator daje neophodnu vrednost susceptanse da bi se tako dobijeni izmereni fazor regulisao na referentnu vrednost.

Množenjem susceptanse sa komponentama napona po d i q osi dobijemo odgovarajuće komponente struja, pa inverznom Park-ovom transformacijom dobijemo fazne struje i time je model zatvoren.



Slika 6: Postupak dobijanja faznih struja

Sklop naponskog regulatora dat je na slici 7.



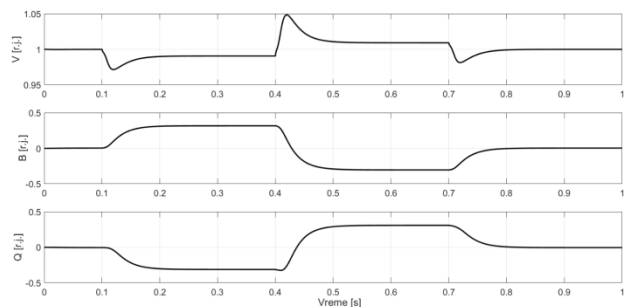
Slika 7: Šema naponskog regulatora

Integralno pojačanje dato je kao $K_i = \frac{1}{\eta_R}$, pri čemu je η_R definisano kao vreme odziva SVC-a s jednog kraja radnog opsega (kapacitivnog) do drugog kraja (induktivnog) i obično iznosi nekoliko ms. Usvojicemo da je $\eta_R = 3\text{ms}$, pa je $K_i = 333$, ali ćemo usvojiti $K_i = 300$. X_s kao što smo već napomenuli iznosi 0.03 [r.j.]. Za referentnu vrednost napona V^{ref} usvojena je vrednost, $V^{\text{ref}} = 1$ [r.j.].

Posmatracemo odziv SVC-a u slučaju kada napon mreže u trenutku 0.1s padne sa 1 [r.j.] na 0.97, zatim u trenutku 0.4s poraste na 1.03 [r.j.] i na kraju u trenutku 0.7s se vrati na 1 [r.j.]. Prikazaćemo odziv napona SVC-a, njegove susceptanse i reaktivne snage.

Sa slike 9 možemo videti da napon SVC-a ne dostiže referentnu vrednost 1 [r.j.] nakon što mrežni napon padne na 0.97 [r.j.] već se ustali na 0.99 [r.j.].

Ovo je posledica pomenutog nagiba SVC karakteristike X_s . Isto važi i za preskoke napona u induktivnoj oblasti.



Slika 9: Odzivi napona SVC-a, njegove susceptanse i reaktivne snage

8. Zaključak

Ovaj rad je dao pregled uloga i primena FACTS uređaja sa naglaskom na statički VAR kompenzator (SVC). Ukazane su prednosti i mane SVC-a u odnosu na još jedan otačno povezan kompenzator - STATCOM. Na osnovu rezultata simulacije, jasno je da SVC može uspešno vršiti regulaciju napona u sabirnici priključenja sa zadovoljavajućom dinamikom. Referentna vrednost napona se ipak ne dostiže u potpunosti zbog namerno umetnute droop karakteristike koja omogućava postizanje gotovo referentnih vrednosti napona, ali sa mnogo manjim utroškom reaktivne snage, odnosno manjim reaktivnim strujama.

9. Literatura

- [1] E. Acha, V.G. Agelidis, "Power Electronic Control in Electrical Systems", Newnes 2002, ISBN 0750651261
- [2] Oscar Skoglund, "Dynamic voltage regulation using SVCs", Stockholm, 2013
- [3] Gabriela Glanzmann, "FACTS Flexible Alternating Current Transmission Systems
- [4] R. Mohan Mathur, Rajiv K. Varma, "Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems, 2002, ISBN 0471206431
- [5] M. Vekic et al., "Multi-Resonant Observer PLL with Real-Time Estimation of Grid Unbalances", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Elsevier June 2019, ISSN 01420615

Kratka biografija:



Mihajlo Govorčin rođen je u Novom Sadu 1995. godine. Diplomski rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Energetska elektronika i električne mašine odbranio je 2018.god.



Marko Vekić je docent na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, na Katedri za Energetsku elektroniku i pretvarače. Oblast interesovanja su energetska elektronika u prenosnim i distributivnim mrežama i kvalitet električne energije.