

Vpliv elektronskih naprav na napetostno stabilnost v elektroenergetskem sistemu

Samo Gašperič, Rafael Mihalič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: samo.gasperic@fe.uni-lj.si

Povzetek. Vpliv serijskih in paralelnih elektronskih naprav na napetostno stabilnost se praviloma določi z izračunom pretokov moči, pri čemer je težko, če ne celo nemogoče, kvalitativno pojasniti nekatere rezultate. Zato je smiselno najprej analizirati tovrstne naprave s stališča napetostne stabilnosti na sistemu, ki ga je mogoče opisati v obliki obvladljivega sistema enačb in po možnosti rešitve izraziti na analitičen način. Članek podaja analitične rešitve za analizo napetostne stabilnosti na standardnem dvozbiralčnem sistemu SLIB, pri čemer se posamezna naprava nahaja na poljubni lokaciji med bilančnim in bremenskim vozliščem dvozbiralčnega sistema, ki upošteva upornost, reaktanco in prečni susceptanci voda. Modele regulabilnega serijskega kompenzatorja (CSC), statičnega sinhronskega serijskega kompenzatorja (SSSC), statičnega VAR kompenzatorja (SVC) in statičnega sinhronskega kompenzatorja (STATCOM) uporabimo za izračun *PU* krivulj, ki ilustrirajo napetostno stabilnost sistema. V članku primerjamo vpliv naprav CSC, SSSC, SVC in STATCOM na napetostno stabilnost in pojasnimo njihovo primernost za reševanje problema napetostne nestabilnosti.

Ključne besede: elektroenergetski sistem, napetostna stabilnost, *PU* krivulje, FACTS

The Impacts of SVC, STATCOM, CSC and SSSC on the Electric Power System Voltage Stability

The impact of the serial and parallel power electronic devices on the electric power system voltage stability is normally calculated by applying power-flow procedures though it is difficult, if not impossible, to have some of the qualitative results explained in this way. These devices need to be analyzed in terms of the electric power system voltage stability that can be described with a solvable system of equations and its solutions expressed in an analytical way. The paper provides analytical equations of the serial and parallel FACTS devices installed in the electric power system at any location between the slack and load bus for voltage-stability analysis, taking into account resistance, reactance and susceptance of the line. Models of the Controllable Serial Compensator (CSC), Static Synchronous Serial Compensator (SSSC), Static VAR Compensator (SVC) and Static Synchronous Compensator (STATCOM) are used to calculate the *PV* curves illustrating the electric power system voltage stability. The impact of CSC, SSSC, SVC and STATCOM on electric power system voltage stability is compared and its suitability to solve the problem of electric power system voltage instability is explained.

1 UVOD

Z naraščanjem porabe električne energije, deregulacijo elektroenergetskih sistemov (EES) in trendom po njeni neodvisni preskrbi, ki temeljijo na pridobivanju iz energije sonca in vetra ter zmanjševanju proizvodnje električne energije iz jedrskih in

termoelektrarn [1], postajajo elektronske naprave, ki jih imenujemo tudi naprave FACTS, čedalje resnejša alternativa. Tehnologija FACTS je razvita [2], vendar je na začetku zaradi cene dajala predvsem teoretične odgovore na probleme v EES. Te naprave odlikujejo: hitrost delovanja (perioda obratovalne frekvence ali celo manj), možnost vplivanja na admitance omrežja in fazorje napetosti, kar posledično vpliva na pretoke moči.

Njihova osnovna naloga je omogočanje fleksibilnosti in izrabe prenosnih EES [2, 3] v smislu povečanja prenosa moči, regulacije pretokov moči in izboljšanja dinamičnih lastnosti EES. Glede na posledice odmevnih razpadov EES zaradi napetostne nestabilnosti [4-8] in zrelost tehnologije menimo, da je raziskovanje vpliva naprav FACTS na zagotavljanje napetostne stabilnosti aktualno, kar pokažemo v pričujočem prispevku z analizo vplivov štirih osnovnih tipov naprav, od teh sta dve paralelni: statični VAR kompenzator (ang. *Static Var Compensator* – SVC) in njegova izpeljanka statični sinhronski kompenzator (ang. *Static Synchronous Compensator* – STATCOM), dve pa serijski: regulabilna serijska kompenzacija (ang. *Controllable Series Compensation* – CSC) in statični sinhronski serijski kompenzator (ang. *Static Synchronous Series Compensator* – SSSC). Na podlagi referenc [9-12] ugotavljamo, da so vpliv serijskih naprav na napetostno stabilnost praviloma analizirali z neprekinjenim izračunom pretokov moči (ang. *Continuation Power*

Flow - CPF), pri čemer pogrešamo izhodiščne analitične enačbe za modele serijskih naprav v dvozbiralnem sistemu s togo mrežo in bremenskim vozliščem (ang. *Single Load Infinite Bus* – SLIB), ki bi omogočili poglobljeno razumevanje napetostne stabilnosti tako, kot je predstavljeno v [13] za dvozbiralni model z generatorjem in togo mrežo (ang. *Single Machine Infinite Bus* – SMIB). Analitične rešitve dajo v primerjavi z numeričnimi jasno sliko problema in z njimi, tudi če rešitve ni, lahko ugotovimo vzrok, medtem ko numerični izračun (če konvergira) da v določenih primerih rešitve, ki jih težko enoumno razložimo. Zato v pričujočem članku predstavljamo analitične enačbe naprav CSC, SSSC, SVC in STATCOM za analizo napetostne stabilnosti na poljubni lokaciji med bilančnim in bremenskim vozliščem sistema SLIB, ki upošteva upornost, reaktanco in prečni susceptanci voda. S *PU* krivuljami, t. i. nosne krivulje [14], pokažemo zmožnost posamezne naprave FACTS za regulacijo napetosti bremenskega vozlišča oziroma za ohranjanje napetostne stabilnosti.

2 NAČINI OBRATOVANJA ELEKTRONSKIH NAPRAV

Glede na konstrukcijo, način delovanja in modele naprav ločimo [3]:

- serijske (CSC, SSSC),
- paralelne (SVC, STATCOM) in
- serijsko-paralelne, ki jih članek ne obravnava.

Serijske naprave v EES obratujejo z namenom, da kompenzirajo vzdolžne induktivne reaktance vodov in s tem omogočijo večje pretoke moči, dušijo oscilacije, blažijo odstopanja napetosti in kota na prenosnem vodju, zmanjšajo odstopanja napetosti, ki jih povzročajo spremembe pretokov moči, in omejijo kratkostične tokove v EEO in razdelilnih postajah, preprečijo ali zmanjšajo krožne tokove znotraj dovoljenih vrednosti [3]. Obratovanje CSC je v grobem preprosto razložiti. S stališča obratovanja EES se obnaša kot zvezno regulirana reaktanca X_{CSC} .

Čeprav je na prvi pogled vpliv SSSC na EES podobno kot CSC, pa v določenih primerih pride do bistvenih razlik. Osnovna lastnost SSSC je, da regulira fazor injicirane napetosti \underline{U}_{SSSC} , ki je pravokoten na fazor toka \underline{I}_{SSSC} . Ob tem je višina injicirane napetosti U_{SSSC} mogoče regulirati neodvisno od toka I_{SSSC} . Napravo SSSC si največkrat predstavljamo kot napetostni vir jalove moči.

Paralelne elektronske naprave lahko zagotovijo hitro in zvezno uravnavanje potreb po jalovi moči. To omogoča nadzor napetosti in tudi poveča stabilnost prenosnega in distribucijskega EES. Rezultat sta večja prenosna zmogljivost EES in ustrezen napetostni profil, kar posledično lahko vpliva na manjše prenosne izgube. Z ustrežno modulacijo amplitude napetosti lahko tudi povečamo dušenje EES in tako dušimo slabo dušena nihanja delovne moči [3]. S stališča obratovanja EES se

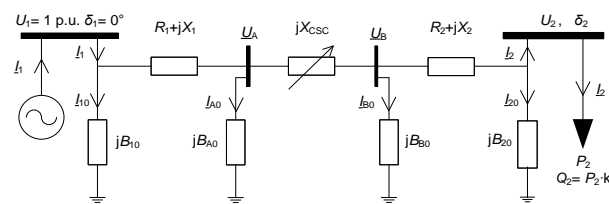
v članku obravnavani paralelni napravi obnašata takole: SVC kot hitro in zvezno regulirana susceptanca B_{SVC} in STATCOM kot hitro in zvezno injiciran tok I_q , ki je pravokoten na fazor napetosti \underline{U}_s , pri čemer je regulacija I_q neodvisna od U_s .

3 MATEMATIČNI MODELI ELEKTRONSKIH NAPRAV ZA ANALIZO NAPETOSTNE STABILNOSTI

Matematične modele naprav CSC, SSSC, SVC in STATCOM za analizo napetostne stabilnosti smo predstavili na dvozbiralnem sistemu z bilančnim in bremenskim vozliščem, ki ju povezuje π model voda s parametri R , X , in B_0 . Bilančno vozlišče označimo z indeksom 1, bremensko z indeksom 2. Da bi ugotovili vpliv naprav na napetost bremenskega vozlišča U_2 , smo jih umestili na poljubno oddaljenost med vozliščem 1 in 2, kar pomeni, da se dvozbiralni model razširi v štirizbiralnega, dodatni vozlišči označimo z A in B. Tak model je primeren za proučevanje odvisnosti napetosti bremena od razmer v omrežju (pretoki moči) in od karakteristike bremena. Modele vseh naprav FACTS kažejo slike 1–4. Bilančno vozlišče ima konstantno napetost U_1 in kot $\angle \delta_1 = 0^\circ$. Medsebojna odvisnost delovne P_2 in jalove Q_2 moči bremenskega vozlišča naj bo linearna $Q_2 = k \cdot P_2$, navidezno moč bremena lahko zapišemo $\underline{S}_2 = P_2(1 + j \cdot k)$.

3.1 Izpeljava analitične enačbe $U_2(P_2)$ za CSC

Napravo CSC modeliramo kot zvezno regulirano serijsko reaktanco X_{CSC} s hitrim odzivom [3]. Negativne vrednosti $X_{CSC} < 0$ označujejo delovanje naprave v kapacitivnem območju, vrednosti $X_{CSC} > 0$ pomenijo induktivno delovanje naprave CSC. Izpeljava analitične enačbe za napetost bremenskega vozlišča U_2 modela SLIB z napravo CSC temelji na sliki 1.



Slika 1: Model naprave CSC v SLIB sistemu za analizo napetostne stabilnosti

Izhajamo iz Kirchoffovega tokovnega (1) in napetostnega (2) zakona:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{10} + \underline{I}_{A0} + \underline{I}_{B0} + \underline{I}_{20} + \underline{I}_2 \quad (1)$$

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 - (R_1 + jX_1) \cdot (\underline{I}_{A0} + \underline{I}_{B0} + \underline{I}_{20} + \underline{I}_2) - jX_{CSC} \cdot (\underline{I}_{B0} + \underline{I}_{20} + \underline{I}_2) - (R_2 + jX_2) \cdot (\underline{I}_{20} + \underline{I}_2) \quad (2)$$

Toke v (1-2) zapišemo z znanimi spremenljivkami: P_2 , Q_2 , U_1 , parametri omrežja: R_1 , R_2 , X_1 , X_2 , B_{10} , B_{20} , B_{A0} ,

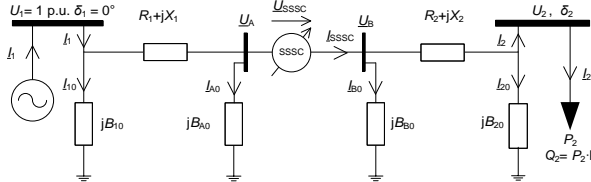
B_{B0} in z neznanu spremenljivko U_2 . Po matematični izpeljavi, v kateri vpeljemo zaradi lažjega zapisa dodatne oznake A_1 - A_4 , pridemo do analitične rešitve (3).

$$U_2 = \pm \sqrt{\frac{U_1^2 - A_4 \pm \sqrt{(A_4 - U_1^2)^2 - 2 \cdot (A_1^2 + A_2^2) \cdot A_3}}{A_3}} \quad (3)$$

Od štirih rešitev (3) sta zanimivi tisti z vrednostjo $U_2 > 0$, ki tvorita tako imenovano nosno krivuljo $U_2(P_2)$.

3.2 Izpeljava analitične enačbe $U_2(P_2)$ za SSSC

Napravo SSSC modeliramo kot napetostni vir z možnostjo zvezne regulacije napetosti U_{SSSC} [3]. Predznak parametra injicirane napetosti $U_{SSSC} > 0$ pomeni možnost prehitevanja toka I_{SSSC} za 90° , kar pomeni, da naprava SSSC obratuje kot porabnik jalove moči (induktivni način obratovanja) in $U_{SSSC} < 0$ daje možnost zaostajanja toka I_{SSSC} za 90° , kar pomeni, da naprava SSSC obratuje kot proizvajalec jalove moči (kapacitivni način).



Slika 2: Model naprave SSSC v SLIB sistemu za analizo napetostne stabilnosti

Izpeljava analitične enačbe $U_2(P_2)$ z napravo SSSC temelji na sliki 2, za katero zapišemo tokovni (1) in napetostni (4) Kirchoffov zakon, pri čemer upoštevamo karakteristične lastnosti SSSC [13].

$$\begin{aligned} \underline{U}_2 = \underline{U}_1 - (R_1 + jX_1) \cdot (I_{A0} + I_{B0} + I_{20} + I_2) \\ - jU_{SSSC} \cdot \frac{I_{B0} + I_{20} + I_2}{I_{B0} + I_{20} + I_2} - (R_2 + jX_2) \cdot (I_{20} + I_2) \end{aligned} \quad (4)$$

Po vpeljavi dodatnih oznak K_1 - K_{12} za skrajšanje izrazov, ki vsebujejo parametre sistema, analitično izpeljemo enačbo (5).

$$\begin{aligned} U_2^4 \cdot K_3 + \frac{U_2^5 \cdot K_9 + U_2^3 \cdot K_8 + K_7 U_2}{\sqrt{U_2^4 \cdot K_{12} + U_2^2 \cdot K_{10} + K_{11}}} + U_2^2 \cdot K_2 + \\ + \frac{U_2^6 \cdot K_6 + U_2^4 \cdot K_5 + U_2^2 \cdot K_4}{U_2^4 \cdot K_{12} + U_2^2 \cdot K_{10} + K_{11}} + K_1 = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

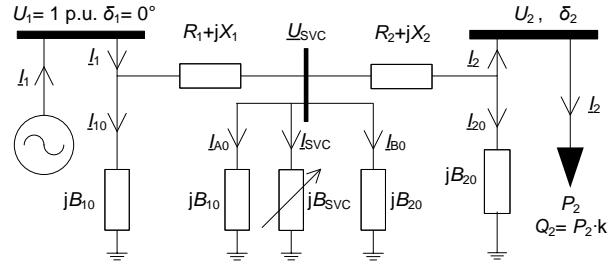
Rešitve enačbe (5) ni mogoče izraziti eksplicitno, ampak v obliki kvadratnega korena polinoma osme stopnje (6).

$$\pm \sqrt{\frac{U_2^8 \cdot KK_8 + U_2^7 \cdot KK_7 + U_2^6 \cdot KK_6 + U_2^5 \cdot KK_5 +}{U_2^4 \cdot KK_4 + U_2^3 \cdot KK_3 + U_2^2 \cdot KK_2 + U_2 \cdot KK_1 + KK_0}} = 0 \quad (6)$$

Pri tem so KK_0 - KK_8 oznake, odvisne od oznak K_1 - K_{12} . Ker pomeni U_2 absolutno vrednost fazorja napetosti \underline{U}_2 , so fizikalno smiselne le pozitivne rešitve (6).

3.3 Izpeljava analitične enačbe $U_2(P_2)$ za SVC

Napravo SVC modeliramo kot zvezno regulirano paralelno susceptanco B_{SVC} s hitrim odzivom [3]. Vrednost paralelne susceptance $B_{SVC} > 0$ označuje delovanje naprave v kapacitivnem območju, vrednost $B_{SVC} < 0$ pomeni induktivno delovanje SVC. Izpeljava analitične enačbe $U_2(P_2)$ z napravo SVC temelji na sliki 3.



Slika 3: Model naprave SVC v sistemu SLIB za analizo napetostne stabilnosti

Izhajamo iz Kirchoffovega napetostnega (7) zakona:

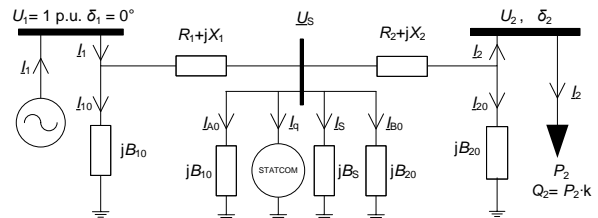
$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 - (R_1 + jX_1) \cdot (I_2 + I_{20} + I_{B0} + I_{SVC} + I_{A0}) - (R_2 + jX_2) \cdot (I_{20} + I_2) \quad (7)$$

Z vpeljavo dodatnih oznake D_1 - D_4 pridemo do analitične rešitve (7).

$$U_2 = \pm \sqrt{\frac{U_1^2 - D_1 \pm \sqrt{(D_1 - U_1^2)^2 - 2 \cdot D_4 \cdot (D_2^2 + D_3^2)}}{D_4}} \quad (8)$$

3.4 Izpeljava analitične enačbe $U_2(P_2)$ za STATCOM

Napravo STATCOM modeliramo kot tokovni vir z možnostjo zvezne regulacije injiciranega toka I_q v vozlišče med zbiralkama ena in dve [3]. Predznak parametra injiciranega toka $I_q > 0$ pomeni možnost prehitevanja napetosti $U_{STATCOM}$ za 90° , kar pomeni, da naprava STATCOM obratuje kot proizvajalec jalove moči (kapacitivni način) in $I_q < 0$ daje možnost zaostajanja toka za napetostjo $U_{STATCOM}$ za 90° , kar pomeni, da STATCOM obratuje kot porabnik jalove moči (induktivni način). Izpeljava analitične rešitve $U_2(P_2)$ z napravo STATCOM temelji na sliki 4.



Slika 4: Model naprave STATCOM v sistemu SLIB za analizo napetostne stabilnosti.

Tudi v tem primeru izhajamo iz Kirchoffovega tokovnega (9) in napetostnega (10) zakona, pri čemer upoštevamo karakteristične lastnosti STATCOM [15].

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{10} + \underline{I}_{A0} + \underline{I}_q + \underline{I}_S + \underline{I}_{B0} + \underline{I}_{20} + \underline{I}_2 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_2 = & \underline{U}_1 - (R_2 + jX_2) \cdot (\underline{I}_{20} + \underline{I}_2) - \\ & -(R_1 + jX_1) \cdot (\underline{I}_{A0} + jI_q \cdot \frac{U_S}{U_S} + \underline{I}_S + \underline{I}_{B0} + \underline{I}_{20} + \underline{I}_2) \end{aligned} \quad (10)$$

V izpeljavi zaradi preglednosti zopet vpeljemo dodatne oznake M_1 - M_{12} , s katerimi pridemo do enačbe (11).

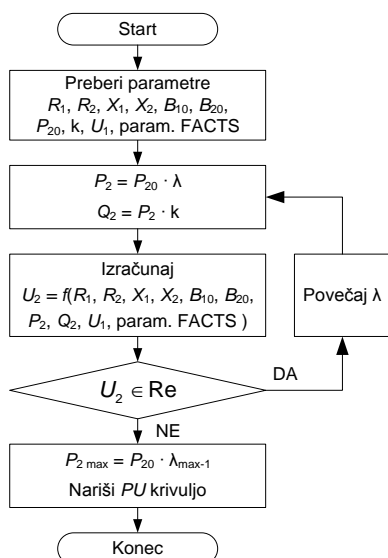
$$\begin{aligned} 0 = & M_1 - U_2^2 \cdot M_2 + U_2^4 \cdot M_3 + \frac{U_2^2 \cdot M_4 + U_2^4 \cdot M_5 + U_2^6 \cdot M_6}{M_{10} + U_2^2 \cdot M_{11} + U_2^4 \cdot M_{12}} + \\ & + \frac{U_2 \cdot M_7 + U_2^3 \cdot M_8 + U_2^5 \cdot M_9}{\sqrt{M_{10} + U_2^2 \cdot M_{11} + U_2^4 \cdot M_{12}}} \end{aligned} \quad (11)$$

Rešitev te enačbe je zopet mogoče izraziti v obliki kvadratnega korena polinoma osme stopnje (12). Oznake MM_0 - MM_8 pomenijo izraze, odvisne od M_i .

$$\pm \sqrt{\left(U_2^8 \cdot MM_8 + U_2^7 \cdot MM_7 + U_2^6 \cdot MM_6 + U_2^5 \cdot MM_5 + U_2^4 \cdot MM_4 + U_2^3 \cdot MM_3 + U_2^2 \cdot MM_2 + U_2 \cdot MM_1 + MM_0 \right)} = 0 \quad (12)$$

4 ANALIZA NAPETOSTNE STABILNOSTI ZA MODEL SLIB Z ELEKTRONSKIMI NAPRAVAMI

Analične rešitve (3, 6, 8, 12) omogočijo izračun PU krivulj, ki so osnova za analizo napetostne stabilnosti EES [14]. Postopek izračuna nakazuje diagram poteka na sliki 5, kjer se vidi, da ne računamo pretokov moči (ang. *load flow*), temveč U_2 izračunamo po enačbah (3, 6, 8, 12), pri čemer za vsako napravo FACTS upoštevamo njen karakteristični parameter.



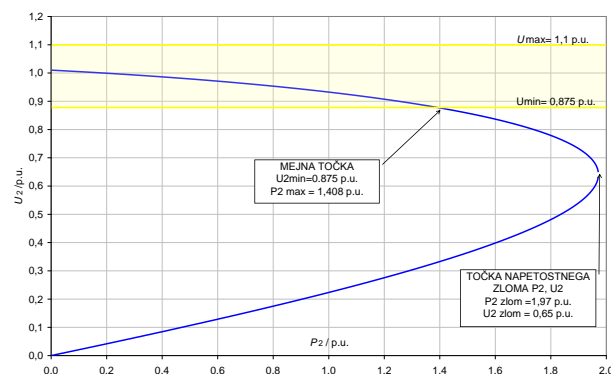
Slika 5: Diagram izračuna U_2 v sistemu SLIB z napravo FACTS

Izračun zgornjih in spodnjih PU krivulj poteka tako, da po vsakem povečanju moči $P_2 = P_{20} \cdot \lambda$ bremenskega vozlišča izračunamo $U_2(P_2)$. Postopek ponavljamo,

dokler velja $U_2(P_2) \in \text{Re}$, prvič ko pogoj ni izpolnjen, smo v območju napetostne nestabilnosti, ko obratovanje EES tudi teoretično ni mogoče. V nadaljevanju podajamo ilustracijo vpliva elektronskih naprav na PU krivulje z naslednjimi podatki. Vrednost $k=0,25$ ustreza faktorju delavnosti bremena $\cos\varphi=0,97$. Vrednosti parametrov sistema naj bodo:

- $X_1 = X_2 = 0,1$ p.u.
- $R_1 = R_2 = 0$
- $B_{10} = B_{20} = B_S = B_{A0} = B_{B0} = 0,05$ p.u.
- $U_1 = 1$ p.u.

Za lažje nadaljnje razumevanje PU krivulj na sliki 6 predstavimo točko napetostnega zloma in mejno dopustno točko obratovanja EES. Točka napetostnega zloma ($P_{2_zлом}$, $U_{2_zлом}$) nastopi pri teoretično največji moči bremenskega vozlišča $P_{2_zлом}$, kar je na sliki 6 vrh PU krivulje (1,97; 0,65) p.u. Točka napetostnega zloma je po navadi oddaljena od mejnega obratovalnega stanja pri najnižji napetosti U_{2_min} , pri kateri na sliki 6 označimo moč bremenskega vozlišča s P_{2_max} . Na sliki 6 sta označeni tudi zgornja $U_{2_max}=1,1$ p.u. in spodnja $U_{2_min}=0,875$ p.u. dopustna napetost obratovanja EES [16], ki razločujeta dopustna obratovalna stanja $U_{2_min} < U_2 < U_{2_max}$ od teoretične obravnave PU krivulj.



Slika 6: Karakteristične točke PU krivulje za ugotavljanje napetostne stabilnosti

Glede na to, da želimo s PU krivuljami pokazati vpliv CSC, SSSC, SVC in STATCOM na napetostno stabilnost in ima vsaka naprava svoj regulabilni parameter (X_{CSC} , U_{SSSC} , B_{SVC} in I_q), smo vrednosti parametrov posamezne naprave določili na podlagi enotne nazivne moči naprave FACTS S_N , ki je tudi ključni podatek za njihovo ceno. V opisanih primerih $S_N=2,5$ p.u. izračunamo pri (maksimalnem) prenosnem kotu $\delta_{12}=30^\circ$ med fazorjem napetosti \underline{U}_1 in \underline{U}_2 in vrednostih $X_1=X_2=0,1$ in $R_1=R_2=0$ p.u. Vrednosti parametrov vseh obravnavanih naprav FACTS, ki jih izračunamo po (12), so podane v tabeli 1. Rezultate poteka $U_2(P_2)$ za obravnavane naprave FACTS kažejo slike 7–10. Vsaka PU krivulja na slikah 7–10 ustreza določeni vrednosti parametra naprave oziroma stopnji kompenzacije, ki jih podaja tabela 1. Črna krivulja

označuje $U_2(P_2)$, ko je vrednost parametra naprave FACTS enaka nič, tretji stolpec v tabeli 1.

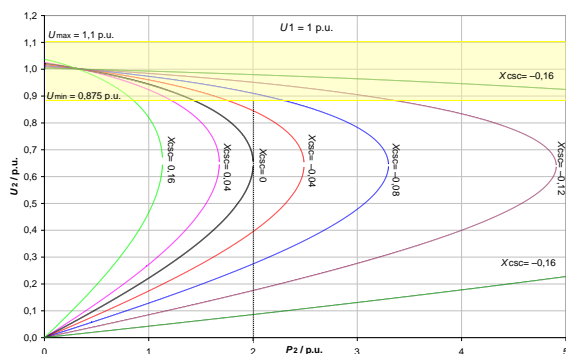
$$\begin{aligned} \text{SSSC: } S_N &= I_N \cdot U_{\text{SSSC}} \\ \text{CSC: } S_N &= -I_N^2 \cdot X_{\text{CSC}} \Rightarrow X_{\text{CSC}} = -\frac{U_{\text{SSSC}}}{I_N} = -0,4 \cdot U_{\text{SSSC}} \quad (12) \\ \text{SVC: } S_N &= U_N^2 \cdot B_{\text{SVC}} \Rightarrow B_{\text{SVC}} = \frac{I_N \cdot U_{\text{SSSC}}}{U_N^2} = 2,5 \cdot U_{\text{SSSC}} \\ \text{STATCOM: } S_N &= U_N \cdot I_q \Rightarrow I_q = \frac{I_N \cdot U_{\text{SSSC}}}{U_N} = 2,5 \cdot U_{\text{SSSC}} \end{aligned}$$

Tabela 1: Vrednosti parametrov naprav FACTS pri isti nazivni moči S_N

S_N [p.u.]	2,5						
Stopnja kompen.	80% ind.	20% ind.	0	20% kap.	40% kap.	60% kap.	80% kap.
X_{CSC} [p.u.]	0,16	0,04	0	-0,04	-0,08	-0,12	-0,16
U_{SSSC} [p.u.]	-0,4	-0,1	0	0,1	0,2	0,3	0,4
B_{SVC} [p.u.]	-1	-0,25	0	0,25	0,5	0,75	1
I_q [p.u.]	-1	-0,25	0	0,25	0,5	0,75	1

4.1 PU krivulje za CSC

Naprava CSC obratuje v kapacitivnem območju, ko je njen parameter $X_{\text{CSC}} < 0$, ta način obratovanja v omrežju z induktivnim karakterjem ugodno vpliva na napetost U_2 . Kapacitivno delovanje CSC na sliki 7 kažejo PU krivulje za vrednosti $X_{\text{CSC}} = [-0,04; -0,08; -0,12; -0,16]$. Če CSC obratuje v induktivnem območju, je parameter $X_{\text{CSC}} > 0$, kar v omrežju z induktivnim karakterjem povzroči dodaten upad napetosti U_2 in s tem hitreje približevanje napetostnemu zlomu. Induktivno delovanje CSC na sliki 7 kažejo PU krivulje pri vrednostih $X_{\text{CSC}} = [0,04; -0,16]$.



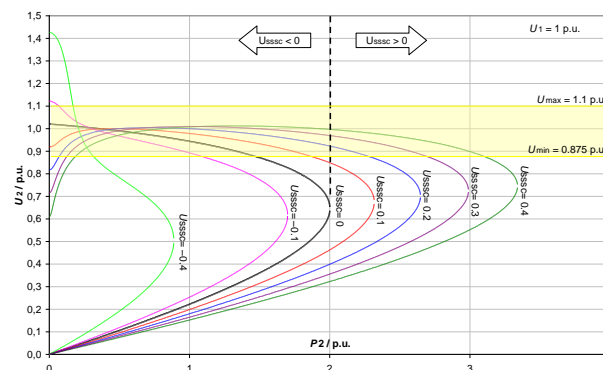
Slika 7: PU krivulje za različne vrednosti parametra X_{CSC} v SLIB sistemu s CSC pri $U_1 = 1$ p.u.

Ugotovimo lahko, da naprav CSC znatno vpliva na napetost U_2 , saj sprememba X_{CSC} zmanjša ali poveča skupno reaktanco med bilančnim in bremenskim vozliščem modela SLIB.

4.2 PU krivulje za SSSC

Rezultate poteka $U_2(P_2)$ v modelu SLIB z napravo SSSC kaže slika 8. Vrednosti $U_{\text{SSSC}} < 0$ pomenijo, da SSSC obratuje v induktivnem območju, kar označujejo PU krivulje pri $U_{\text{SSSC}} = [-0,4; -0,1]$. Na sliki 2 vidimo, da

se negativna napetost $U_{\text{SSSC}} < 0$ odšteje od napetosti U_A , ki je bližje viru, kar vpliva na zmanjšanje napetosti U_2 v omrežju z induktivnim karakterjem. Zanimiv je učinek naprave SSSC pri obremenitvah $P_2 < 0,5$ p.u. Če se moč P_2 približuje 0, postaja imaginarna komponenta toka I_{SSSC} čedalje večja, kot med fazorjema \underline{U}_1 in I_{SSSC} je blizu 90° , $\underline{U}_{\text{SSSC}}$ je pravokoten na I_{SSSC} , kar pomeni da sta \underline{U}_1 in $\underline{U}_{\text{SSSC}}$ v fazi in se skalarno seštejeta, kar kažejo PU krivulje na sliki 8 za $U_{\text{SSSC}} < 0$ ali v protifazi (napetosti se skalarno odštejeta), kar kažejo PU krivulje za $U_{\text{SSSC}} > 0$.



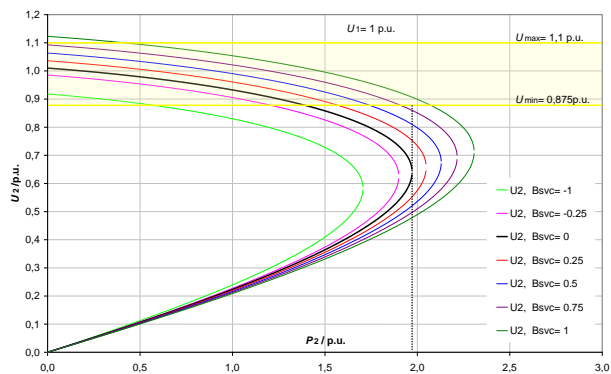
Slika 8: PU krivulje za različne vrednosti parametra U_{SSSC} v SLIB sistemu s SSSC pri $U_1 = 1$ p.u.

Zanimivo in pri površnem razmisleku povsem nepričakovano je, da U_2 pri obratovanju $U_{\text{SSSC}} < 0$ preseže vrednost 1 p.u., pri najnižjih vrednostih P_2 celo preseže najvišjo dopustno obratovalno napetost $U_{2,\text{max}} = 1,1$ p.u. Razlog za vrednosti $U_2 > 1,1$ p.u. je nezvezna odvisnost ekvivalentne reaktance SSSC pri majhnih vrednostih prenosnega kota δ_{12} , kar je prvič pojasnjeno v članku [13]. Glede na zmožnost naprave SSSC, da lahko hitro spreminja U_{SSSC} in s tem regulira vrednost napetosti U_2 , ta fenomen ne zmanjšuje uporabnosti SSSC za regulacijo napetosti. Iz slike 8 sklepamo, da SSSC ugodno vpliva na napetostno stabilnost, vendar ne tako kot CSC. Omeniti velja, da je rob med točko nestabilnosti in območjem dopustne napetosti zelo ozek in s tega stališča pomeni tveganje.

4.3 PU krivulje za SVC

Rezultate poteka $U_2(P_2)$ z napravo SVC kaže slika 9. Pri negativnih vrednostih susceptance $B_{\text{SVC}} < 0$ naprava SVC obratuje v induktivnem območju in s tem v omrežju z induktivnim karakterjem dodatno zniža napetost U_2 . Če je $B_{\text{SVC}} > 0$, naprava SVC obratuje v kapacitivnem območju, kar povzroči dvig napetosti U_2 .

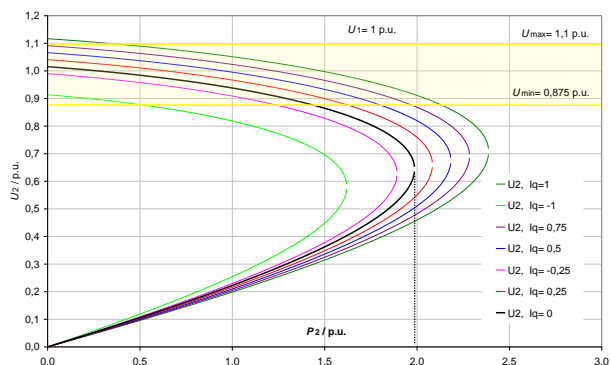
Rezultati na sliki 9 kažejo, da vpliv SVC na napetostno stabilnost ni tako izrazit kot pri obravnavanih serijskih napravah.



Slika 9: PU krivulje za različne vrednosti parametra U_{SVC} v SLIB sistemu s SVC pri $U_1 = 1$ p.u.

4.4 PU krivulje za STATCOM

Rezultate simulacije z napravo STATCOM kaže slika 10. STATCOM obratuje v induktivnem območju, če je $I_q > 0$. V enačbi (9) vidimo, da pozitivna vrednost I_q zmanjša napetost U_2 . Če je parameter $I_q < 0$, STATCOM obratuje v kapacitivnem območju, kar povzroči dvig U_2 in s tem ugoden vpliv na napetostno stabilnost.



Slika 10: PU krivulje za različne vrednosti parametra I_q v sistemu SLIB s STATCOM pri $U_1 = 1$ p.u.

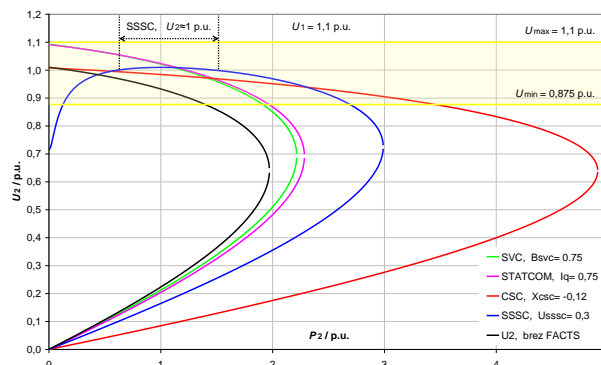
PU krivulje na sliki 10 kažejo, da je vpliv STATCOM na napetostno stabilnost za malenkost izrazitejši kot pri SVC in manjši kot pri serijskih napravah FACTS.

4.5 Primerjava PU krivulj serijskih in paralelnih naprav FACTS

Primerjavo vpliva CSC, SSSC, SVC in STATCOM na napetostno stabilnost podaja tabela 2, ki številsko povzema slike 7–10. Pri stopnji kompenzacije $\pm 80\%$ ima največji razpon ($0,875 < U_2 < 1,1$) p.u. za spreminjanje U_2 naprava CSC ($P_{2\max} = 6,75$ p.u.), kar je dvakrat več kot SSSC ($P_{2\max} = 3,11$ p.u.) in trikrat več kot SVC oziroma STATCOM ($P_{2\max} = 2,1$ p.u.).

Z napravo CSC lahko teoretično mejo napetostne stabilnosti vzdržujemo do $P_{2\text{zlom}} = 9,65$ p.u., kar je 2,8-krat več kot s SSSC in 4-krat več kot s STATCOM. PU krivulje na sliki 11 kažejo vpliv CSC, SSSC, SVC in

STATCOM na napetostno stabilnost pri stopnji kompenzacije 60 % kapacitivno in napetost $U_1 = 1$ p.u.



Slika 11: PU krivulje za obravnavane FACTS pri stopnji kompenzacije 60 % kapacitivno in $U_1 = 1$ p.u.

Na sliki 11 vidimo, da na napetostno stabilnost najugodnejše vpliva CSC, saj točka napetostnega zloma nastopi pri $P_{2\text{zlom}} = 4,9$ p.u., kar je znatno več kot pri drugih napravah. Če na sliki 11 primerjamo sposobnost naprav za ohranjanje napetosti $U_2 = 1$ p.u., opazimo, da je za to najprimernejša naprava SSSC.

Tabela 2: Razpon ohranjanja U_2 na intervalu $[0,875 \div 1,1]$ p.u. z napravami FACTS pri $U_1 = 1$ p.u.

S_N [p.u.]	2,5			
U_1 [p.u.]	1			
Stopnja kompenzacije	80 % ind. ÷ 80 % kap.			
FACTS	Maksimalna moč P_2 pri minimalni dopustni napetosti $U_{2\min} = 0,875$ p.u.		Točka napetostnega zloma	
	$P_{2\max}$ [p.u.]	Parameter FACTS v [p.u.] pri kompenzaciji 80 % kap.	P_2 [p.u.]	U_2 [p.u.]
CSC	6,75	$X_{CSC} = -0,16$	9,65	0,64
SSSC	3,11	$U_{SSSC} = 0,4$	3,34	0,75
SVC	2,08	$B_{SVC} = 1$	2,31	0,72
STATCOM	2,14	$I_q = 1$	2,39	0,72

5 SKLEP

V članku smo predstavili vpliv CSC, SSSC, SVC in STATCOM na napetostno stabilnost, pri čemer smo upoštevali možnosti spreminjanja njihovih regulabilnih parametrov: reaktanco naprave X_{CSC} pri napravi CSC, injicirano jalovo napetost U_{SSSC} pri napravi SSSC, susceptanco B_{SVC} pri napravi SVC in injiciran jalov tok I_q pri napravi STATCOM med obratovanjem v EES.

Na podlagi dvozbiralčnega modela z vključenimi napravami smo pokazali postopek izpeljave analitičnih enačb, ki opisujejo odvisnost napetosti bremenskega vozlišča od moči bremena $U_2(P_2)$. Eksplicitne enačbe $U_2(P_2)$ omogočajo vpogled v dejanski odziv elektronskih naprav na spremembo P_2 , kar s klasičnimi programi za izračun pretokov moči ni mogoče. Na podlagi analize PU krivulj pri različnih vrednostih

parametrov elektronskih naprav smo omogočili vpogled v njihovo zmožnost regulacije napetosti.

Pojasnili smo nenavadno obnašanje naprave SSSC v neobremenjenem stanju, ki je bilo v preteklosti opaženo pri rezultatih simulacije dinamike EES.

LITERATURA

- [1] R. Mihalič, "»Zelena« energija – bližnjica k energetski neodvisnosti ali slepa ulica? ", *Elektrotehniški vestnik* 78(5): 245–256, 2011.
- [2] I. Papič, R. Mihalič, P. Žunko, "Naprave fleksibilnega prenosnega sistema", *Elektrotehniški vestnik* 65(4): 185–196, 1998.
- [3] N. G. Hingorani, L. Gyugyi, "Understanding FACTS", The Institution of Electrical and Electronic Engineers, Inc., New York, 2000.
- [4] U. S.-Canada Power System Outage Task Force, "Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations", Apr. 2004.
- [5] Elkraft System, "Power failure in Eastern Denmark and Southern Sweden on 23 September 2003. Final report on the course of events", Nov. 2003.
- [6] M. W. Younas, S. A. Qureshi, "Analysis of Blackout of National Grid System of Pakistan in 2006 and the Application of PSS and FACTS Controllers as Remedial Measures", *Proceedings of ICEE '07, Int. Conf. on Electrical Engineering*, Lahore, Pakistan, 11–12 Apr. 2007.
- [7] D. L. Vargas, V. H. Quintana, R. D. Miranda, "Voltage collapse scenario in the Chilean interconnected system", *IEEE TPS*, Vol. 14, No. 4, Nov. 1999.
- [8] Vournas C. D., Nikolaidis V. C., Tassoulis A. A., "Postmortem Analysis and Data Validation in the Wake of the 2004 Athens Blackout", *IEEE TPS*, Vol. 21, No. 3, Aug. 2006.
- [9] M. A. Kamarposhti, H. Lesani, "Effects of STATCOM, TCSC, SSSC and UPFC on static voltage stability", *Electrical Engineering*, Vol. 93, Issue 1, pp 33–42, March 2011.
- [10] C. A. Cañizares, Z. T. Faur, "Analysis of SVC and TCSC Controllers in Voltage Collapse", *IEEE TPS*, Vol. 14, No. 1, Feb. 1999.
- [11] R. Natesan, G. Radman, "Effects of STATCOM, SSSC and UPFC on Voltage Stability", *Proceedings of the Thirty-Sixth Southeastern Symposium on System Theory*, 2004.
- [12] A. Sode-Yome, M. Nadarajah, Y. L. Kwang, "Static Voltage Stability Margin Enhancement Using STATCOM, TCSC and SSSC", *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific*, Dalian, China, 2005.
- [13] R. Mihalič, "Power flow control with controllable reactive series elements", *IEE Gener. transm. distrib.*, vol. 145, no. 5, 1998.
- [14] T. Van. Cutsem, C. Vournas, *Voltage Stability of Electric Power Systems*, Springer Science+Business Media, New York, 2008.
- [15] X.-P. Zhang, C. Rehtanz, B. Pal, "Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006.
- [16] ELES, "Sistemska obratovalna navodila za prenosno omrežje električne energije", ELES, Februar 2007.

Samo Gašperič je diplomiral in magistriral na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Po diplomi (1997) se je zaposlil v distribucijskem podjetju Elektro Ljubljana. Od leta 1998 je na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani zaposlen kot asistent na Katedri za elektroenergetske sisteme in naprave. Njegovo raziskovalno področje obsega predvsem izračune obratovalnih stanj elektroenergetskih sistemov.

Rafael Mihalič je diplomiral, magistriral in doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko in računalništvo v Ljubljani. Po diplomi je postal asistent na omenjeni fakulteti. Med letoma 1988 in 1991 je bil zaposlen pri Siemensu AG v Erlangnu. Trenutno je redni profesor na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani in predstojnik Katedre za elektroenergetske sisteme in naprave. Je član CIGRE, član IEEE in predsednik ŠK B4 SLOKO CIGRE. Področje delovanja vključuje predvsem analizo elektroenergetskih sistemov in naprav FACTS.