

Modeliranje statičnega sinhronskega serijskega kompenzatorja

Jerneja Bogovič, Rafael Mihalič

*Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: jerneja.bogovic@fe.uni-lj.si, rafael.mihalic@fe.uni-lj.si*

Povzetek. Elektroenergetski sistem se širi tako na ravni prenosnega omrežja kakor tudi na ravni distribucijskega omrežja. A širitev ima tako dobre kakor tudi nezaželene posledice. Ena teh je lahko njen vpliv na napetostne razmere. V primeru vključitve novega vira le-ta med obratovanjem praviloma izboljša napetostne razmere, kadar pa ne obratuje, je treba z drugimi ukrepi zagotoviti ustrezne napetostne razmere. Ena t. i. aktivnih rešitev je vključevanje elektronskih regulabilnih naprav v sistem, za kar pa potrebujemo ustrezne modela za ponazoritev novih naprav pri različnih analizah. Zato smo se odločili razviti model naprave, katere obravnava je glede na dosedanje študije relativno problematična, tj. statični sinhronski serijski kompenzator (SSSC).

Ključne besede: distribucijsko omrežje, matematični model, statični sinhronski serijski kompenzator (SSSC), metoda U-I

Modeling of Static Synchronous Series Compensators

The power flows and voltage states in a power system are constantly changing due to variations in the power consumption, as well as production and network configuration. The consequences can be either advantageous or disadvantageous. One of the disadvantages is the change in the voltage profile. To improve it, several solutions can be used. The one enabling a dynamic voltage control uses the flexible alternating current transmission system (FACTS) devices. To realize this solution, appropriate FACTS device models are needed. The paper presents a new three phase SSSC model for a forward-sweep algorithm. Its application is demonstrated on an IEEE 34 bus test feeder.

Keywords: distribution network, mathematical model, SSSC, U-I method

1 UVOD

V distribucijsko omrežje je vključenih čedalje več manjših obnovljivih virov, zato je za zagotavljanje ustreznih napetostnih razmer čedalje bolj zanimiva uporaba aktivnih rešitev. Obnovljivi viri električne energije obratujejo z močjo, ki jo narekujejo vremenske razmere.

Ena od možnosti za aktivno regulacijo napetosti je vključitev statičnega sinhronskega serijskega kompenzatorja (SSSC) v sistem. Prednost SSSC je, da regulacijsko območje naprave (injicirana napetost) ni odvisno od velikosti toka, ki teče skozi SSSC. To z drugimi besedami pomeni, da nima določene oz. omejene nadomestne impedanace, ampak se le-ta spreminja glede na potrebe sistema oz. se impedanca prilagaja, da se doseže zelena regulirana veličina.

Ker pa je prvi korak pri študiju možnosti za vključitev nove naprave v elektroenergetski sistem (EES) izvedba izračunov za različna obratovalna stanja, za to potrebujemo ustrezne modele naprav, vključenih v sistem, kar seveda velja tudi za SSSC. V preteklosti se je izkazalo, da je SSSC s stališča konvergence problematičen in da metode in modeli, razviti za to napravo, praviloma ob določenih prilagoditvah zelo dobro delujejo tudi pri drugih napravah. Zato bomo v članku predstavili nov model SSSC, primeren za uporabo v radialnih omrežjih z metodo U-I.

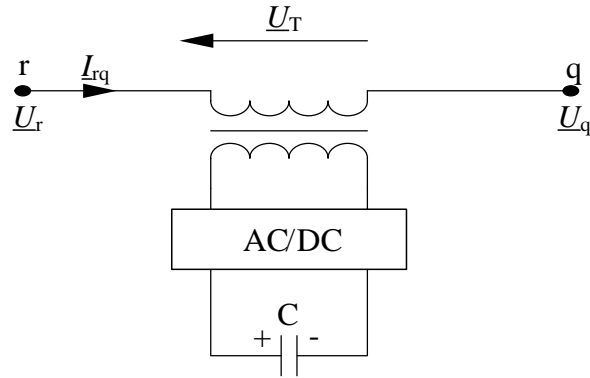
2 METODA U-I

Metoda U-I je najpreprostejša in tudi najpogosteje uporabljena metoda za izračun pretokov moči v radialnem omrežju. V nasprotju z Newton-Raphsonovo metodo, ki za takšen sistem ne konvergira [1], je primerna za uporabo v omrežjih z visokim razmerjem R/X .

Metoda temelji na izračunih injiciranih tokov in padcev napetosti, ki jih povzročajo injicirani tokovi [2]. Pri modeliranju bremen upoštevamo bodisi breme s konstantno močjo, konstantnim tokom ali konstantno impedanco. Pri trifaznem modeliranju upoštevamo vezavo bremena, ki je lahko zvezda ali trikot. Upoštevamo tudi tokove, ki jih povzročajo dozemne admitanace. Naslednji korak je izračun tokov med vozlišči in padcev napetosti, ki jih povzročajo tokovi. Postopek izračunavanja tokov in padcev napetosti ponavljamo tolikokrat, da dosežemo dovolj majhno razliko med dvema iteracijama.

3 STATIČNI SINHRONSKI SERIJSKI KOMPENZATOR (SSSC)

SSSC je ena od elektronskih regulabilnih naprav ali FACTS naprav (flexible alternating current transmission system). Kakor večina naprav FACTS tudi SSSC omogoča regulacijo napetosti, tokov ali moči v okviru svojih obratovalnih območij. Sestavljen je iz transformatorja, AC/DC pretvornika in kondenzatorja (slika 1) [3], [4].



Slika 1: Model SSSC

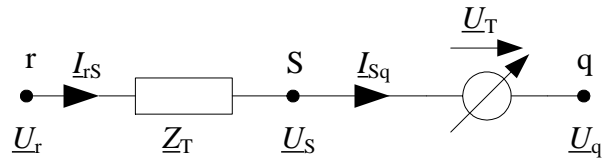
Gre za generično konfiguracijo, delovanje pa si lahko predstavljamo v smislu injiciranja napetosti, ki je pravokotna na tok, in tako ga omrežje zazna kot navidezni induktivni ali kapacitivni element, kar je odvisno od predznaka injicirane napetosti. Pri enopolnem modelu vezava transformatorja ni tako pomembna in je zato ni treba upoštevati. Pri trifaznem modelu pa vezava transformatorja igra pomembno vlogo, saj močno vpliva na možnosti regulacije.

Čeprav SSSC omogoča poleg regulacije vsiljene napetosti ter vozliščne napetosti še regulacijo delovne ali jalove moči, pa regulacija moči v radialnih omrežjih ni smiselna. Prav tako se v nekaterih primerih vprašanje regulacije vsiljene napetosti.

Pri modeliranju SSSC za metodo U-I smo se osredinili na trifazni model in izhajali iz tokovnega modela SSSC za Newton-Raphsonovo metodo, ki se od napetostnega modela razlikuje po dodatnem vozlišču, ki omogoča, da izgube SSSC upoštevamo ločeno od regulirane veličine. Enačbe, ki opisujejo SSSC v [4], smo prilagodili tako, da so primerne za uporabo z metodo U-I.

4 MODELIRANJE SSSC

Kakor smo že omenili, smo pri modeliranju SSSC izhajali iz tokovnega modela SSSC, primerne za Newton-Raphsonovo metodo, prikazanega na Slika 2 [5].



Slika 2: Tokovni model SSSC

Iz tega modela izhajamo, da s tem ločimo izgube naprave od regulacije, ki jih ponazorimo z impedanco \underline{Z}_T in upoštevamo kot padeč napetosti (1).

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_S^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_r^p \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \underline{Z}_T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_{rS}^p \end{bmatrix} \quad (1)$$

Ker SSSC ne vsiljuje toka, ampak napetost, se tok \underline{I}_{Sq}^p skozi napravo ne spreminja in ostane enak za vse tri faze, ki so označene s p .

Pri regulaciji napetosti pa so stvari nekoliko bolj kompleksne, še zlasti če je SSSC povezan s sistemom prek enega trifaznega transformatorja, vezanega v trikot. Pri tej obliki vezave je namreč treba upoštevati, da je vsota vsiljenih napetosti vseh treh faz skupaj enaka nič. To zahtevo smo rešili z upoštevanjem sinusnega izreka.

4.1 Regulacija vsiljene napetosti

4.1.1 Trije enofazni transformatorji

Pri regulaciji vsiljene napetosti, kjer je SSSC s sistemom povezan prek treh enofaznih transformatorjev, ki so med sabo neodvisni, je le-ta relativno preprosta in je podana z (2), kjer je vozliščna napetost \underline{U}_q^p povečana za vsiljeno napetost \underline{U}_T^p , ki je pravokotna na tok \underline{I}_{Sq}^p v posamezni fazi p .

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_q^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_S^p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{U}_T^p \cdot e^{j\left(\delta_{I_{Sq}}^p + \frac{\pi}{2}\right)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

4.1.2 Trifazni transformator

Pri regulaciji vsiljene napetosti z enim trifaznim transformatorjem pa smo omejeni na regulacijo le na eno fazo, vsiljena napetost v preostalih dveh fazah pa se izračuna po sinusnem izreku. Tako najprej izračunamo kote vsiljenih napetosti iz kotov tokov po (3), sledi izračun amplitud vsiljenih napetosti po sinusnem izreku (4) in nazadnje izračun vozliščnih napetosti po (2), kakor pri treh enofaznih transformatorjih.

$$\begin{aligned} \delta_T^a &= \left| \pi - \left| \delta_{I_{Sq}}^c - \delta_{I_{Sq}}^b \right| \right| \\ \delta_T^b &= \left| \pi - \left| \delta_{I_{Sq}}^a - \delta_{I_{Sq}}^c \right| \right| \\ \delta_T^c &= \left| \pi - \left| \delta_{I_{Sq}}^b - \delta_{I_{Sq}}^a \right| \right| \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{U_T^a}{\sin \delta_T^a} = \frac{U_T^b}{\sin \delta_T^b} = \frac{U_T^c}{\sin \delta_T^c} \quad (4)$$

4.2 Regulacija vozliščne napetosti

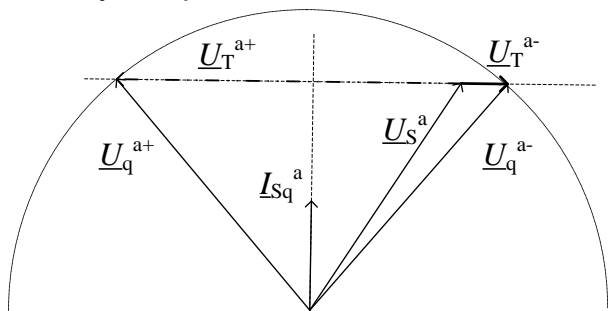
4.2.1 Trije enofazni transformatorji

Pri regulaciji vozliščne napetosti s SSSC, ki je s sistemom povezana prek treh enofaznih transformatorjev, je regulacija fazno neodvisna. Na tem mestu pa bi opozorili še na dejstvo, da sta pri regulaciji vozliščne napetosti tako s tremi enofaznimi transformatorji, kakor tudi z enim trifaznim transformatorjem, mogoči dve rešitvi, kakor prikazuje Slika 3, vendar se kot boljša rešitev izkaže tista, za katero velja, da je nadomestna virtualna impedanca SSSC manjša (5).

$$Z_{SSSC}^p = \left| \frac{\underline{U}_{-q}^p - \underline{U}_{-s}^p}{\underline{I}_{Sq}^p} \right| \quad (5)$$

Vozliščno napetost definiramo s (6)

$$\underline{U}_{-q}^p = U_{def}^p \cdot e^{j \left(\delta_{Isq}^p \pm \arccos \left(\frac{U_s^p}{U_{def}^p} \cdot \cos(\delta_{Us}^p - \delta_{Isq}^p) \right) \right)} \quad (6)$$



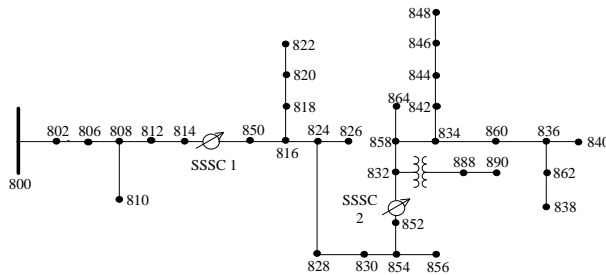
Slika 3: Dve rešitvi za regulacijo vozliščne napetosti

4.2.2 Trifazni transformator

Pri regulaciji vozliščne napetosti s SSSC, ki je s sistemom povezan prek enega trifaznega transformatorja, je treba upoštevati tako pogoj, da je vsota vsiljenih napetosti po vseh treh fazah enaka nič ter da je vsota delovne moči, ki jo v sistem vsili SSSC, nič. Tako najprej izračunamo vozliščno napetost za eno izmed faz po (5) in (6). Sledi izračun vsiljene napetosti in na podlagi (3) in (4) izračunamo vsiljeni napetosti za preostali dve fazi, nakar sledi izračun vozliščne napetosti po (2).

5 REZULTATI

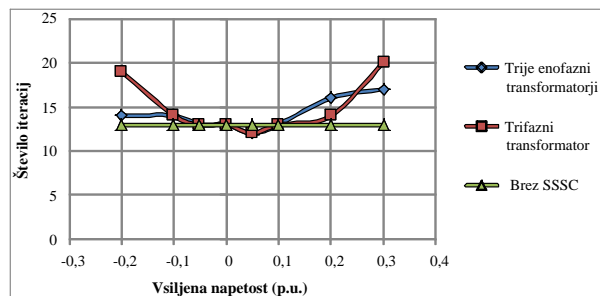
Modele SSSC smo preizkusili na testnem vozliščnem sistemu IEEE 34 (Slika 4), ki je nahaja v Arizoni (ZDA). V sistem sta vključena dva SSSC, prvi med vozliščema 814 in 850 ter drugi med vozliščema 852 in 832. Oba SSSC sta enaka in v istem primeru oba regulirata enako vozliščno napetost. Impedanca SSSC, ki ponazarja izgube, je $j 2.07 \Omega$. Zahtevana maksimalna razlika med dvema iteracijama (mismatch) je 10^{-8} p.u.



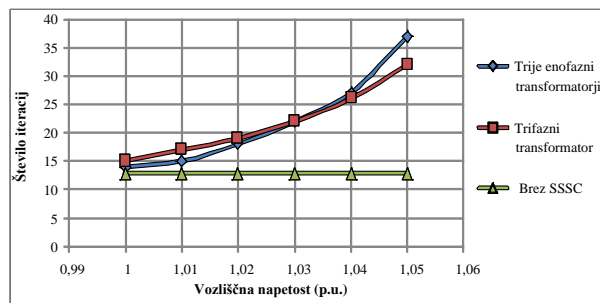
Slika 4: Vozliščni testni sistem IEEE 34

V prvem koraku smo preizkusili trifazni model SSSC za regulacijo vsiljene napetosti in opazovali število iteracij, potrebnih za zelen mismatch, kar prikazuje tudi Slika 5. Število iteracij se povečuje z absolutno vrednostjo vsiljene napetosti in je približno enako kakor tedaj, ko v sistem ni vključen noben SSSC. Hkrati pa se število iteracij ne razlikuje bistveno, če imamo vključena SSSC, povezana s sistemom prek treh enofaznih transformatorjev ali prek enega trifaznega transformatorja.

Podoben trend je opaziti tudi pri regulaciji vozliščne napetosti, kar prikazuje Slika 6, kjer se število iteracij povečuje z večjo absolutno vrednostjo vozliščne napetosti. Na število iteracij oblika vezave ne vpliva bistveno. Je pa tedaj, ko sta v sistem vključena SSSC, število iteracij bistveno večje kot če v sistemu ni vključen noben SSSC.



Slika 5: Število iteracij pri regulaciji vsiljene napetosti



Slika 6: Število iteracij pri regulaciji vozliščne napetosti

Dodatno bi radi pojasnili, da so podatki prikazani le za regulacijo napetosti za fazo L_1 , medtem, ko so za preostali dve fazi pri treh enofaznih transformatorjih napetosti enaki. Pri enem trifaznem transformatorju pa se napetosti razlikujejo od tiste v fazi L_1 .

6 SKLEP

Za radialna omrežja Newton-Raphsonova metoda ne konvergira vedno, zato je za izračun napetostnih razmer in pretokov moči primerna metoda U-I. Ker pa zanjo še niso bili izdelani modeli nekaterih naprav FACTS, smo za najbolj problematično s stališča konvergence, t. i. SSSC, izdelali modele za enopolno analizo, enako tudi za trifazno. Pri izdelavi trifaznega modela, kjer se upošteva tudi vezava SSSC z omrežjem, je ta lahko povezan prek treh enofaznih transformatorjev ali prek enega trifaznega transformatorja z vezavo trikot/zvezda. Vse trifazne modele SSSC smo preizkusili tudi na testnem vozliščnem sistemu IEEE 34 in pri tem pokazali, da model konvergira v vseh primerih, vendar je iteracij še vedno kar veliko in bo v prihodnje treba nekaj truda vložiti v razvoj modela, ki konvergira hitreje.

LITERATURA

- [1] K. Balamurugan and D. Srinivasan, "Review of power flow studies on distribution network with distributed generation," in *2011 IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, 2011, pp. 411–417.
- [2] J. B. V. Subrahmanyam, "Load Flow Solution of Unbalanced Radial Distribution Systems," *J. Theor. Appl. Inf. Technol.*, vol. 6, no. 1, pp. 040–051, Jul. 2009.
- [3] C. R. Xiao-Ping Zhang, "Flexible AC transmission systems: Modelling and control," 2006.
- [4] A. Vinkovic and R. Mihalic, "A current-based model of the static synchronous series compensator (SSSC) for Newton–Raphson power flow," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 78, no. 10, pp. 1806–1813, Oktober 2008.
- [5] A. Vinkovic, M. Suhadolc, and R. Mihalic, "Current-based models of FACTS devices for three-phase load-flow calculations using the Newton–Raphson method," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 45, no. 1, pp. 117–128, Feb. 2013.

Jerneja Bogovič je diplomirala v letu 2011 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Kot mlada raziskovalka je bila zaposlena v Laboratoriju za preskrbo z električno energijo. V okviru raziskovalnega dela je bila v letu 2012 na nekajmesečnem strokovnem gostovanju pri Siemensu AG v Nemčiji. Področje raziskovalnega dela vključuje predvsem analizo elektroenergetskih omrežij in sistemov ter naprave FACTS.

Rafael Mihalič je diplomiral, magistriral in doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani v letih 1986, 1989 in 1993. Po diplomi se je zaposlil kot asistent na Katedri za elektroenergetske sisteme in naprave. V letih med 1988 in 1991 je bil zaposlen pri SIEMENS AG Erlangen v Nemčiji, na inštitutu za razdeljevanje električne energije in načrtovanje omrežij. Po vrnitvi v domovino je nadaljeval delo na Fakulteti za elektrotehniko; najprej kot asistent, od leta 2005 pa kot predavatelj. V okviru svojega raziskovalnega dela je bil na nekajmesečnih strokovnih izpopolnjevanjih oz. gostovanjih pri Siemens AG, Erlangen v Nemčiji, na ETH Zürich v Švici, na University of Durham v Veliki Britaniji in na Tehničnem izobraževalnem inštitutu Fakultete za inženirstvo v Grčiji. Je član CIGRE, član IEEE in predsednik ŠK B4 SLOKO CIGRE. Področje delovanja vključuje predvsem analizo in načrtovanje elektroenergetskih omrežij in sistemov, naprave FACTS ter koordinacijo zaščite v industrijskih omrežjih.