

Model hitre regulabilne naprave za distribucijska omrežja

JERNEJA BOGOVIČ & RAFAEL MIHALIČ

Povzetek Ena izmed možnih rešitev za izboljšanje napetostnih razmer v elektroenergetskem sistemu (EES) je vključevanje hitrih regulabilnih naprav. V samem procesu načrtovanja vključitve pa se pojavi potreba po izračunu napetostnih razmer in pretokov energije, za kar potrebujemo ustrezne modele hitrih regulabilnih naprav.

V preteklosti so že bili izdelani modeli hitrih regulabilnih naprav, ki so primerni za Newton-Raphsonovo metodo. Vendar pa Newton-Raphsonova metoda ni primerna za uporabo v distribucijskih oziroma radialnih omrežjih zaradi težav s konvergenco. Zaradi naštetih vzrokov bomo v članku opisali nov model hitre regulabilne naprave, ki bo primeren za U-I metodo. Nov model hitre regulabilne naprave bo testiran na dveh testnih omrežjih, IEEE 34-vozliščnem testnem sistemu in IEEE 123-vozliščnem testnem sistemu, pri čemer bo v sistem vključeni tudi razpršeni viri električne energije.

Ključne besede: • model • regulabilna naprava • distribucijsko omrežje • napetostne razmere • pretoki energije • FACTS •

NASLOV AVTORJEV: Jerneja Bogovič, mlada raziskovalka, Univerza v Ljubljani, Fakulteta, za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija, e-pošta: jerneja.bogovic@fe.uni-lj.si. dr. Rafael Mihalič, redni profesor, Univerza v Ljubljani, Fakulteta, za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija, e-pošta: rafael.mihalic@fe.uni-lj.si.

<https://doi.org/10.18690/978-961-286-071-4.18>

ISBN 978-961-286-071-4

© 2017 Univerzitetna založba Univerze v Mariboru

Dostopno na: <http://press.um.si>.

1 Uvod

Regulacija napetosti ter jalove moči znotraj določenih vrednosti je ena izmed sistemskih storitev, ki igrajo pomembno vlogo pri obratovanju elektroenergetskega sistema (EES). Ena izmed možnosti za učinkovito regulacijo napetosti in jalove moči je vključitev hitrih regulabilnih naprav v EES [1]. V članku je predstavljen trifazni model statičnega sinhronskega serijskega kompenzatorja (SSSC) za regulacijo napetosti za izračun napetostnih razmer in pretokov energije v radialnih omrežjih. Za modeliranje SSSC smo se odločili, ker je v preteklosti, pri uporabi SSSC v izračunih napetostnih razmer in pretokov energije, prihajalo do težav s konvergenco [2]. Pri ostalih modelih hitrih regulabilnih naprav tudi v primeru večjega števila regulirnih parametrov (UPFC) ni prišlo do težav z konvergiranjem izračuna napetostnih razmer ter pretokov energije. Enako načelo, če konvergira za SSSC, bo tudi za ostale hitre regulabilne naprave, je uporabljeno tudi v tem članku. Metodologijo, ki jo uporabimo za modeliranje SSSC lahko uporabimo tudi za ostale hitre regulabilne naprave, pri tem pa se ne bomo soočali s težavami glede konvergence. Bi pa na tem mestu poudarili, da uporaba hitrih regulabilnih naprav v radialnih omrežjih ni pogosta, vendar bi lahko v primeru uporabe koncepta pametnih omrežij, prišlo do preboja hitrih regulabilnih naprav.

Ne glede na vzrok vključitve SSSC v radialna omrežja je potrebno analizirati vpliv novo vključene naprave, za kar pa potrebujemo ustrezen model SSSC. Nekaj načinov modeliranja SSSC je na voljo v [2–5], ki jih v grobem lahko razdelimo na tokovne in napetostne modele. Za slednje je značilno, da imajo težave z konvergenco že v zazankanih omrežjih. Poleg tega pa tako napetostni kot tudi tokovni modeli SSSC nista primerna za uporabo za Newton-Raphsonovo metodo v radialnih omrežjih. Vzrok je v velikem razmerju R/X , kar ima za posledico singularnost Jacobijeve matrike [6] in posledično težave s konvergenco Newton-Raphsonove metode [7]. Vse to pa ima za posledico, da so poleg Newton-Raphsonove metode neuporabni tudi modeli hitrih regulabilnih naprav. Se pa zaradi težav s konvergenco Newton-Raphsonove metode v izračunih napetostnih razmer ter pretokov energije v radialnih omrežjih najpogosteje uporablja učinkovita in robustna metoda, ki je U-I metoda.

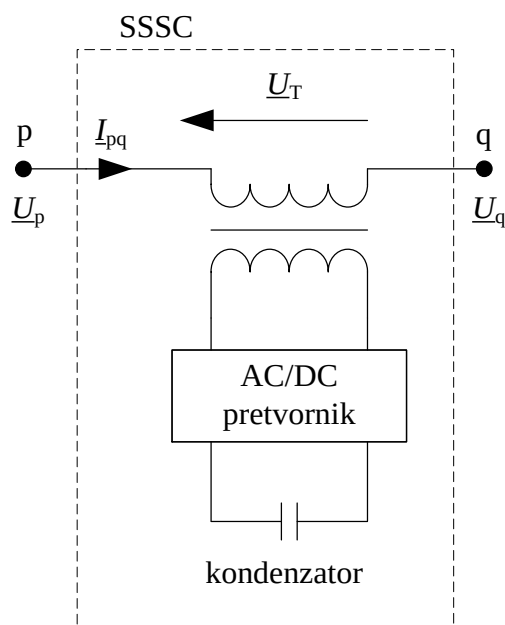
U-I metoda je najpogosteje uporabljena metoda za izračun napetostnih razmer in pretokov energije, ki temelji na glavni lastnosti radialnih omrežij t.j. definiranih poteh pretokov energije od vira do porabnika. Sam princip U-I metode je izračun tokov in padcev napetosti. V prvem koraku izračunamo tokove, ki jih v sistem »vsiljujejo« bremena, čemur sledi izračun vejskih tokov. Ko imamo izračunane vejske tokove, sledi izračun padcev napetosti iz smeri vira proti koncu omrežja oziroma do porabnikov [8]. Prednost U-I metode je, da je enostavna za razumevanje in tudi samo uporabo, slabost pa, da je uporabna le za radialna omrežja.

U-I metoda je doživela že kar nekaj nadgradenj od prve omembe. Ena izmed nadgradenj je uporaba v zazankanih omrežjih, uporaba za modeliranje napetostno odvisnih bremen, uporaba v sistemih, ki imajo vključene razpršene vire električne energije in pa nadgradnja metode, da je uporabna v trifaznih analizah napetostnih razmer ter pretokov energije [6]. V članku bo za testiranje ustreznosti modela SSSC uporabljena modificirana metoda iz [9], pri čemer so razpršeni viri električne energije modelirani kot v [10]. Modeli SSSC so modelirani tako, da upoštevajo vse lastnosti naprave SSSC, še zlasti pa vezavo transformatorja, kar je bistvena nadgradnja. V [11] je uporabljena le funkcija, ki minimizira vsiljeno napetost, ne upošteva pa vezave transformatorja.

Novi modeli SSSC bojo v članku predstavljeni in testirani za namen izboljšanja napetostnih razmer v radialnih omrežjih z razpršenimi viri električne energije za izračun napetostnih razmer in pretokov energije z U-I metodo. V okviru članka bo v drugem poglavju predstavljen model SSSC za U-I metodo, v tretje poglavju bojo predstavljeni rezultati napetostnih razmer in pretokov energije v radialnih omrežjih z vključenimi SSSC in razpršenimi viri, v četrtem poglavju pa bo sledil kratek zaključek.

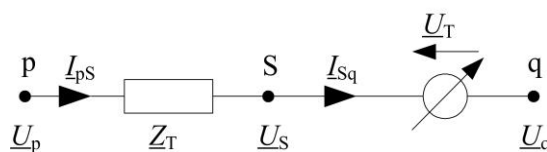
2 Model SSSC

SSSC je serijska hitra regulabilna naprava, ki je sestavljena iz AC/DC pretvornika z kondenzatorjem in je preko transformatorja vezana v EES (slika 18.1). V nekaterih primerih je na mestu kondenzatorja uporabljena baterija [12]. SSSC v zazankanih omrežjih omogoča regulacijo pretokov delovne in jalove moči po vodih, regulacijo vsiljene ali vozliščne napetosti in impedance (reaktance) voda. V radialnih omrežjih pa so možnosti regulacije precej okrnjene le na regulacijo vsiljene in vozliščne napetosti, pri čemer je uporaba SSSC smiselna le v namen regulacije vozliščne napetosti.



Slika 18.1: Shema SSSC

V preteklosti je bilo razvitih že kar nekaj načinov modeliranja SSSC za izračun napetostnih razmer ter pretokov energije z Newton-Raphsonovo metodo. Kljub temu da tej modeli niso primerni za uporabo v samih radialnih omrežjih, pa se lahko sama logika modeliranja SSSC uporabi za modeliranje za U-I metodo. Pri modeliranju SSSC za U-I metodo smo izhajali iz modela predstavljenega v [2], kjer je SSSC predstavljen kot impedanca (predstavlja izgube) in napetostni vir. Uporaba takšnega koncepta je najbolj primerna za U-I metodo, saj se zaradi takšnega modeliranja v model uvede dodatno vozlišče S, ki navidezno loči izgube od regulacije oziroma vira napetosti (slika 18.2).



Slika 18.2: Tokovni model SSSC za Newton-Raphsonovo metodo

Da bi zagotovili ustreznost modela SSSC za U-I metodo, je potrebno pri modeliranju upoštevati zahteve glede vsiljene delovne moči, glede vezave transformatorja in reguliranih veličin. Na možnost reguliranih veličin ima največji vpliv vezava transformatorja in kondenzator. Ker slednji ni hranilnik delovne moči, je delovna moč, ki se pretaka med enosmerno stranjo SSSC in sistemom enaka nič. V kolikor ima SSSC skupen kondenzator za vse tri faze, je delovna moč, ki se pretaka definirana kot nič za vse tri faze skupaj (1), v kolikor pa ima vsaka faza svoj kondenzator pa je delovna moč definirana kot nična za vsako fazo posebej (2).

$$\sum_{p=a,b,c} P_{SSSC}^p = 0 \quad (1)$$

$$P_{SSSC}^a = P_{SSSC}^b = P_{SSSC}^c = 0 \quad (2)$$

pri čemer P_{SSSC}^p predstavlja delovno moč med EES in kondenzatorjem SSSC v fazi p.

Poleg kondenzatorja pa na število možnih reguliranih veličin vpliva še sama vezava transformatorja, ki povezuje SSSC z EES. V kolikor je SSSC z EES povezan preko transformatorja vezanega v vezavo zvezda, potem glede vsiljene napetosti za vsako fazo posebej ni nikakršne omejitve. V kolikor pa je vezava transformatorja trikot, je potrebno upoštevati, da je vektorska vsota vseh treh vsiljenih napetosti enaka nič (3).

$$\sum_{p=a,b,c} \underline{U}_{SSSC}^p = 0 \quad (3)$$

pri čemer je $\underline{U}_{SSSC}^p$ vsiljena napetost SSSC v fazi p.

Zadnji korak pri modeliranju SSSC pa je definiranje reguliranih veličin. Ob upoštevanju vseh zgoraj naštetih lastnosti SSSC, je parameter, ki ga lahko reguliramo le eden (le za eno fazo) ali pa so parametri trije (za vsako fazo posebej). Regulirane veličine so definirane za regulacijo vsiljene napetosti z (4), za regulacijo vsiljene jalove moči (5) in za regulacijo vozliščne napetosti z (6).

$$U_{inj}^p = U_{inj,ref}^p \quad (4)$$

$$Q_{inj}^p = Q_{inj,ref}^p \quad (5)$$

$$U_{node}^p = U_{node,ref}^p \quad (6)$$

V primeru da ima SSSC v vsaki fazi svoj kondenzator in je s sistemom povezan z transformatorjem, ki je vezan v zvezdo, potem je definiranje SSSC za U-I metodo enostavno. V kolikor pa je vezava transformatorja trikot in ima SSSC skupen kondenzator za vse tri faze, potem je definiranje SSSC nekoliko bolj kompleksen proces. Uporabljena je modifikacija U-I

metode, ki v koraku za izračun parametrov SSSC preide v reševanje sistema nelinearnih enačb z Newtonovo metodo.

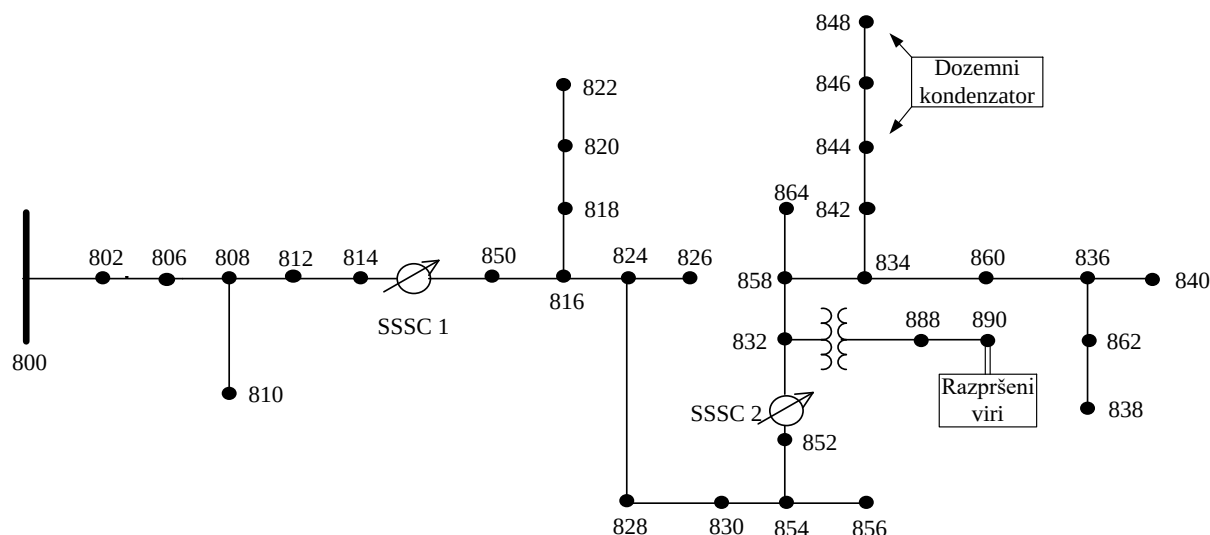
3 Rezultati

Trifazni model SSSC smo testirali na dveh radialnih testnih omrežjih. V vseh testnih primerih je uporabljen SSSC, ki je v sistem povezan preko transformatorja vezanega v trikot. Za izračun napetostnih razmer in pretokov energije smo uporabili matematični program Matlab. Za izračun parametrov SSSC je bila uporabljena integrirana Matlabova funkcija *fsolve*. Razpršeni viri so definirani kot močnostni viri kakor v [11].

3.1 IEEE 34-vozliščni testni sistem

IEEE 34-vozliščni sistem je eden izmed standardnih sistemov, ki se nahaja v Arizoni (ZDA). V testnem sistemu sta vključena dva SSSC, prvi se nahaja med vozliščema 814 ter 850, drugi pa med vozliščema 852 in 832. Na teh dveh lokacijah sta v osnovnem sistemu vključena dva napetostna regulatorja. Razpršeni viri električne energije (sončne elektrarne) maksimalne moči 220 kW v posamezni fazi so v sistem vključeni v vozlišču 890.

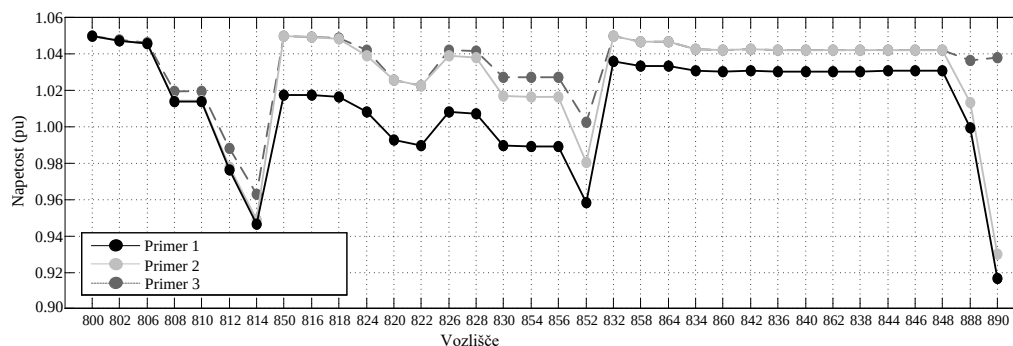
Testirali smo tri različne situacije. V prvem primeru smo testirali osnovni sistem, kjer sta vključena v sistem dva napetostna regulatorja in dva dozemna kondenzatorja. V drugem primeru sta napetostna regulatorja zamenjana z dvema SSSC, dozemna kondenzatorja pa sta izključena. V tretjem primeru pa sta prav tako napetostna kondenzatorja zamenjana z dvema SSSC, dozemna kondenzatorja sta izključena, razpršeni viri električne energije pa so vključeni v sistem, pri čemer proizvajajo maksimalno inštalirano moč, ki je 220 kW v vsaki fazi. Za namen opazovanja konvergence z vključenim SSSC v sistem, smo delovno moč razpršenih virov spreminjali od 0 kW do 220 kW po koraku 10 kW.



Slika 18.3: IEEE 34-vozliščni testni sistem

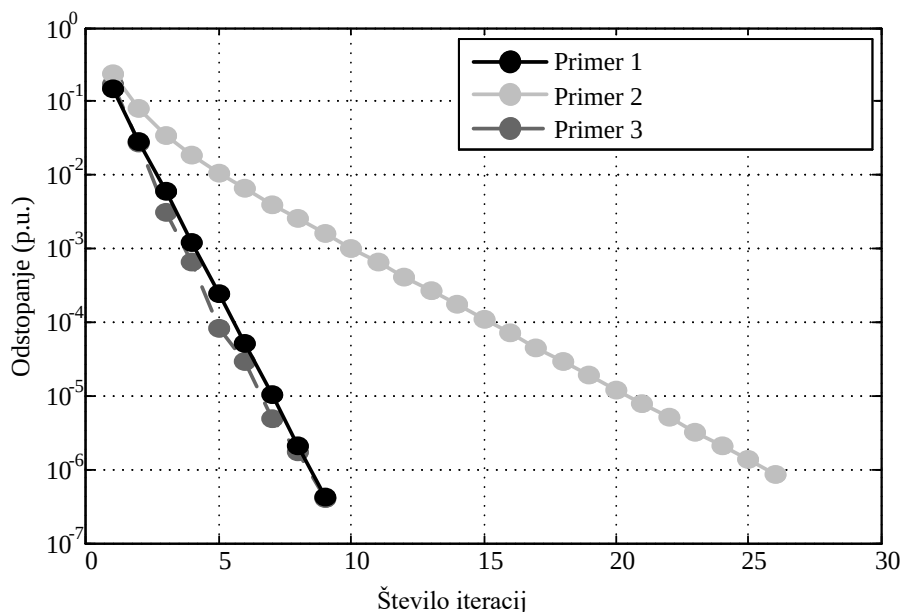
Slika 18.4 prikazuje napetosti v fazi L1 v vsakem vozlišču za vse tri testne situacije. Potek napetosti za osnovni sistem je prikazan s črno barvo. Za drugo situacijo je potek napetosti označen s svetlo sivo barvo, za tretjo situacijo pa je potek prikazan s temno sivo črtkano črto. Na podlagi rezultatov lahko zapišemo, da je najboljše napetostno stanje v primeru, ko so v sistem vključena SSSC in razpršeni viri (primer 3). V kolikor razpršeni viri ne proizvajajo

energije (primer 2) je napetostno stanje še vedno boljše, kot v primeru, ko sta za namen regulacije v sistem vključena napetostna regulatorja (primer 1).

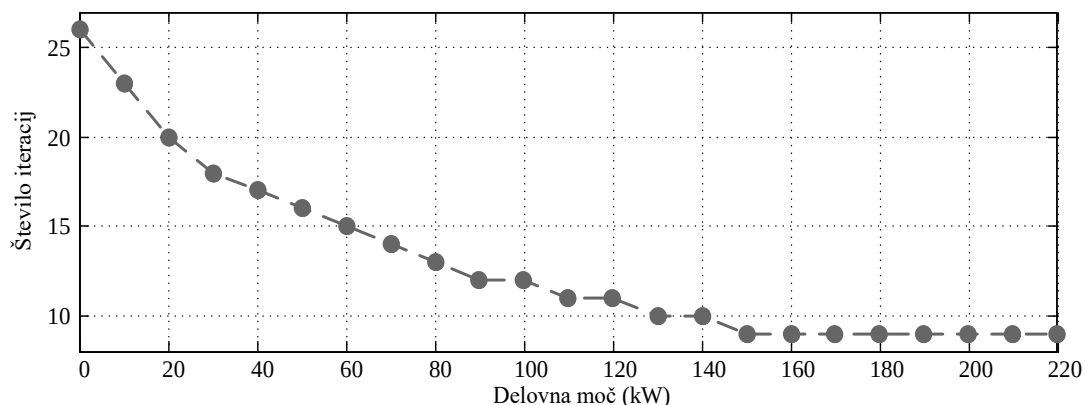


Slika 18.4: Napetostni profil za različne primere

Slika 18.5 prikazuje število iteracij, ki so potrebne za doseg želene odstopanje napetosti v dveh zaporednih iteracijah ($\varepsilon = 10^{-6}$ pu). Za tretji primer smo želeno odstopanje dosegli v devetih iteracijah, kar je enako število iteracij, kot jih je v osnovnem primeru (primer 1). Število iteracij pa je bistveno večje v primeru, ko razpršeni viri ne proizvajajo električne energije (primer 2).



Slika 18.5: Število iteracij za različne primere



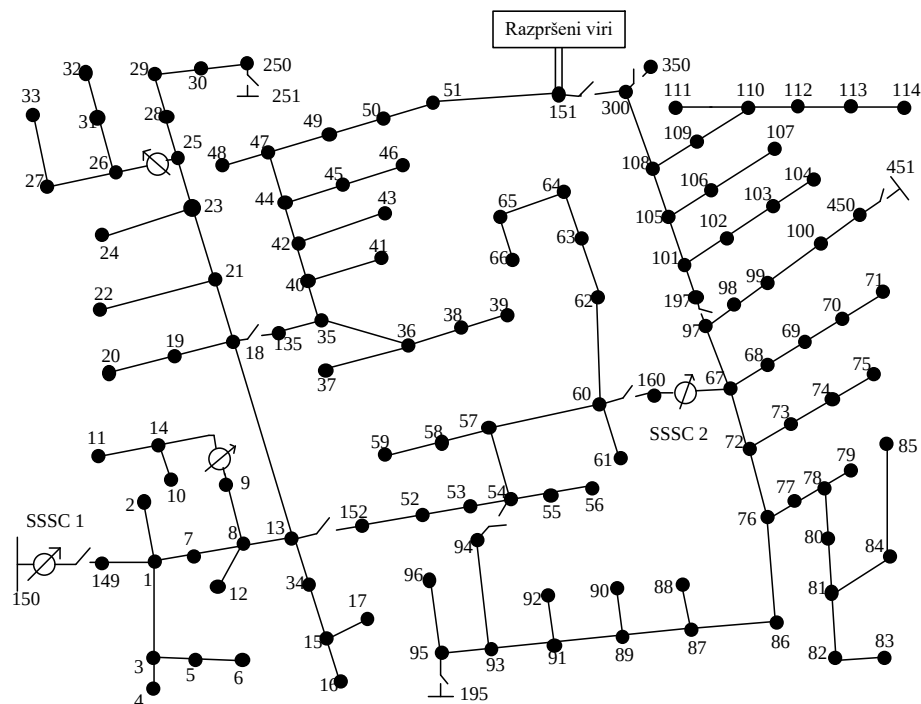
Slika 18.6: Number of iterations for different production of DG with included SSSCs into the feeder

Slika 6 prikazuje število iteracij za doseg želenega odstopanja v odvisnosti od delovne moči razpršenih virov električne energije. Opaziti je obratno sorazmerje, število iteracij upada z naraščanjem moči. Kljub temu da je SSSC poznan po težavah s konvergenco, pa lahko zaključimo, da nov model ne nakazuje teh težav.

3.2 IEEE 123-vozliščni testni sistem

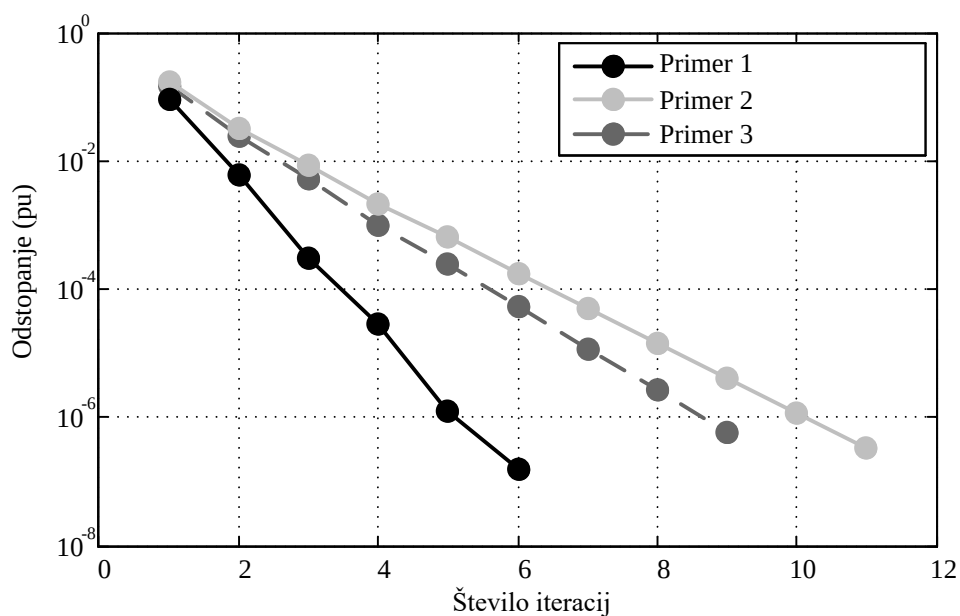
IEEE 123-vozliščni sistem je eden izmed večjih testnih distribucijskih sistemov. V testnem sistemu sta vključena dva SSSC. Prvi se nahaja med vozliščema 150 in 149, drugi pa med vozliščema 160 in 67. V osnovnem sistemu sta na tem mestu vključena napetostna regulatorja.

Razpršeni viri električne energije inštalirane moči 300 kW v vsaki fazi so v sistem vključeni v vozlišču 151. Kakor v primeru 34-vozliščnega sistema, so tudi v tem sistemu testirane tri različne situacije, osnoven sistem, primer 2 z vključenima dvema SSSC in primer 3 z vključenima SSSC in razpršenimi viri električne energije. V obeh primerih, ko so v sistem vključeni SSSC, so dozenmi kondenzatorji izključeni.

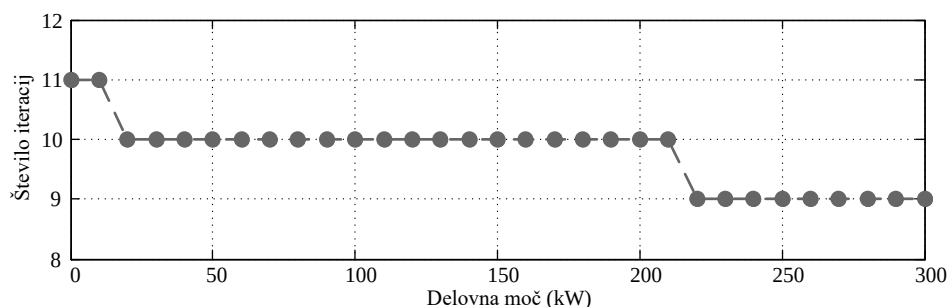


Slika 18.7: IEEE 123-vozliščni testni sistem

Slika 18.8 prikazuje odstopanje napetosti med dvema zaporednima iteracijama za vse tri testne primere. V primeru osnovnega sistema je število iteracij šest, nekaj več iteracij pa je potrebnih v primeru, ko sta napetostna regulatorja nadomeščena z dvema SSSC. Število iteracij pa je skoraj enako ali razpršeni viri proizvajajo ali ne proizvajajo električno energijo (slika 18.9).

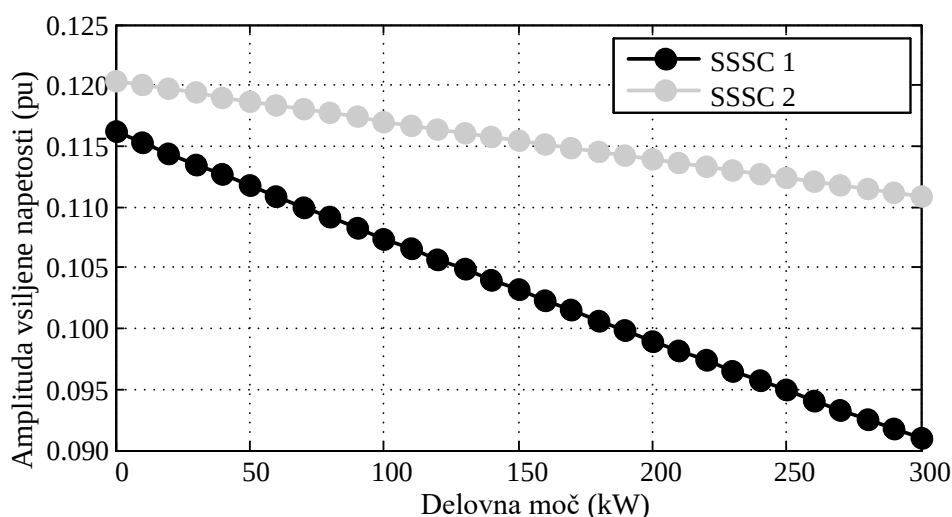


Slika 18.8: Odstopanje med dvema iteracijama za različne testne primere



Slika 18.9: Število iteracij v odvisnosti od proizvodne razpršenih virov

Slika 18.10 prikazuje amplitudo vsiljene moči za oba SSSC za različno delovno moč razpršenih virov. S črno so prikazane amplitude vsiljene moči prvega SSSC (vključen med vozliščema 150 in 149), z sivo pa so prikazane vsiljene moči drugega SSSC (vključen med vozliščema 160 in 67). Vrednosti vsiljenih moči so okoli 10 % nazivne napetosti.



Slika 18.10: Amplituda vsiljene napetosti v odvisnosti od moči razpršenih virov

4 Zaključek

V članku je prikazan nov model SSSC, ki omogoča regulacijo vozliščne napetosti. Model smo testirali na dveh testnih sistemih; IEEE 34-vozliščnem testnem sistemu in IEEE 123-vozliščnem sistemu. SSSC smo testirali na primerih, kjer razpršeni viri ne proizvajajo električne energije (primer 2) in v primerih, kjer razpršeni viri proizvajajo maksimalno moč (primer 3). Dodatno smo opazovali še število iteracij v odvisnosti od različne proizvodnje moči razpršenih virov.

Rezultati prikazujejo, da SSSC izboljša napetostne razmere v sistemu. Poleg tega se število iteracij za izračun napetostnih razmer ter pretokov energije ne poveča bistveno, v kolikor imamo v sistemu vključene SSSC, kljub temu da je SSSC poznan kot naprava, ki ima težave z konvergenco pri izračunih napetostnih razmer in pretokov energije.

Literatura

- [1] T.F. Orchi, H.R. Pota, M.J. Hossain, Stability improvement of wind farms using shunt and series compensation, in: Univ. Power Eng. Conf. AUPEC 2012 22nd Australas., 2012: pp. 1–6.

- [2] A. Vinkovic, M. Suhadolc, 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.* 45 (2013) 117–128. doi:10.1016/j.ijepes.2012.08.070.
- [3] Y. Zhang, Y. Zhang, C. Chen, A Novel Power Injection Model of IPFC for Power Flow Analysis Inclusive of Practical Constraints, *IEEE Trans. Power Syst.* 21 (2006) 1550–1556. doi:10.1109/TPWRS.2006.882458.
- [4] K.K. Sen, SSSC-static synchronous series compensator: theory, modeling, and application, *IEEE Trans. Power Deliv.* 13 (1998) 241–246. doi:10.1109/61.660884.
- [5] R. Benabid, M. Boudour, M.A. Abido, Development of a new power injection model with embedded multi-control functions for static synchronous series compensator, *IET Gener. Transm. Distrib.* 6 (2012) 680–692. doi:10.1049/iet-gtd.2011.0296.
- [6] J.A. Martinez, J. Mahseredjian, Load flow calculations in distribution systems with distributed resources. A review, in: 2011 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet., 2011: pp. 1–8. doi:10.1109/PES.2011.6039172.
- [7] S. Kamel, M. Abdel-Akher, F. Jurado, F.J. Ruiz-Rodriguez, Modeling and Analysis of Voltage and Power Control Devices in Current Injections Load Flow Method, *Electr. Power Compon. Syst.* 41 (2013) 324–344. doi:10.1080/15325008.2012.742945.
- [8] M.M.A.S. Jianwei Liu, An efficient power flow algorithm for distribution systems with polynomial load, *Int. J. Electr. Eng. Educ.* 39 (2002). doi:10.7227/IJEEE.39.4.7.
- [9] J.B.V. Subrahmanyam, Load Flow Solution of Unbalanced Radial Distribution Systems, *J. Theor. Appl. Inf. Technol.* 6 (2009) 040–051.
- [10] Y. Zhu, K. Tomsovic, Adaptive power flow method for distribution systems with dispersed generation, *IEEE Trans. Power Deliv.* 17 (2002) 822–827. doi:10.1109/TPWRD.2002.1022810.
- [11] T. Kondo, J. Baba, A. Yokoyama, Voltage control of distribution network with a large penetration of photovoltaic generation using FACTS devices, *Electr. Eng. Jpn.* 165 (2008) 16–28. doi:10.1002/eej.20499.
- [12] C.R. Xiao-Ping Zhang, Flexible AC transmission systems: Modelling and control, (2006)