

MODEL STATIČNEGA SINHRONSKEGA SERIJSKEGA KOMPENZATORJA

Jerneja BOGOVIČ, Rafael MIHALIČ

POVZETEK

V članku je predstavljen model statičnega sinhronskega serijskega kompenzatorja (SSSC) za izračun pretokov moči v distribucijskem omrežju za uporabo z U-I metodo. Za modeliranje SSSC z U-I metodo je uporabljen tokovni model SSSC za Newton-Raphsonovo metodo. Model je modificiran tako, da je uporaben za U-I metodo, vendar so še vedno ohranjene vse lastnosti SSSC. Ker so distribucijska omrežja predvsem radialna in neenakomerno obremenjena po fazah, bo predstavljen le trifazni model SSSC. Model SSSC bo preizkušen na testnem sistemu.

ABSTRACT

This paper presents a model of Static Synchronous Series Compensators (SSSC) for load-flow calculations in a distribution system for the forward-sweep algorithm. The model of SSSC for forward-sweep algorithm is based on current model used in Newton-Raphson load-flow calculations. The model is modified that is used for forward-sweep algorithm, but all known properties are preserved. Since the distribution networks are mainly radial and unequally loaded by phases, a three-phase modeling of SSSC is presented. Models are verified on a test case.

1. UVOD

Zaradi vse večjega števila manjših obnovljivih virov priključenih na distribucijsko omrežje, je za zagotavljanje ustreznih napetostnih razmer v času, ko nekateri obnovljivi viri ne proizvajajo električne energije, nujna uporaba aktivnih rešitev. Ena izmed možnosti je vključitev statičnega sinhronskega serijskega kompenzatorja (SSSC) v sistem. Prednost SSSC je, da je regulacija napetosti ali moči neodvisna od velikosti toka, ki teče skozi SSSC, kar z drugimi besedami pomeni, da nima določene nadomestne impedance, ampak se le-ta spreminja glede na potrebe sistema oz. za doseganje specifične regulirane veličine. Vendar pa je nujno pred vključitvijo nove naprave v elektroenergetski sistem (EES) izvesti izračune za različna obratovalna stanja. Mednje sodi tudi izračun pretokov moči, za kar potrebujemo primeren model. Zato bomo v članku predstavili nov model SSSC, primeren za uporabo v radialnih omrežjih z U-I metodo.

2. U-I METODA

U-I metoda je najpogosteje uporabljena metoda za izračun pretokov moči v radialnem omrežju. U-I metoda je primerna za uporabo v omrežjih z visokim razmerjem rezistance proti reaktanci, za razliko z Newton-Raphsonovo metodo, ki za takšen sistem ne konvergira 0.

Temelji na izračunih injiciranih tokov in padcev napetosti, ki jih injicirani tokovi povzročajo 0. Pri modeliranju bremen se upošteva ali je breme s konstantno močjo ($n = 0$), konstantnim tokom ($n = 1$) ali konstantno impedanco ($n = 2$). Dodatno se pri trifaznem modeliranju upošteva vezavo bremena, ki je lahko ali zvezda (1) ali trikot (2). Tokove, ki jih povzročajo šentne admitance, izračunamo po (3). Naslednji korak je izračun tokov med vozlišči (4) in padcev napetosti, ki jih tokovi povzročajo (5).

$$[\underline{I}_q^p] = \left[\left(\frac{SI_q^p}{U_q^p} \right)^* \cdot |\underline{U}_q^p|^n \right] \quad (1)$$

$$[\underline{I}_q^p] = \left[\left(\frac{SI_q^{pp}}{U_q^{pp}} \right)^* \cdot |\underline{U}_q^{pp}|^n - \left(\frac{SI_q^{pp}}{U_q^{pp}} \right)^* \cdot |\underline{U}_q^p|^n \right] \quad (2)$$

$$[\underline{Ish}_q^p] = \frac{1}{2} [\underline{Y}_{sh}] [\underline{U}_q^p] \quad (3)$$

$$[\underline{I}_{rq}^p] = \sum_{i=1}^{N(rq)} [\underline{I}_q^p] + \sum_{i=1}^{N(rq)} [\underline{Ish}_q^p] \quad (4)$$

$$[\underline{U}_q^p] = [\underline{U}_r^p] - [\underline{Z}_{rq}] \cdot [\underline{I}_{rq}^p] \quad (5)$$

- kjer je:
- \underline{I}_q^p - Fazni tok, ki ga doprinese breme v vozlišču q ,
 - SI_q^p - moč bremena po posamezni fazi v vozlišču q ,
 - SI_q^{pp} - medfazna moč bremena v vozlišču q ,
 - \underline{U}_q^p - fazna napetost v vozlišču q ,
 - \underline{U}_q^{pp} - medfazna napetost v vozlišču q ,
 - \underline{Ish}_q^p - fazni tok, ki ga doprinese šentna admitanca v vozlišču q ,
 - \underline{Y}_{sh} - matrika šentnih admitanc,
 - \underline{I}_{rq}^p - fazni tok med vozliščema r in q ,
 - \underline{U}_r^p - fazna napetost v vozlišču r ,

\underline{Z}_{rq} - matrika impedanc.

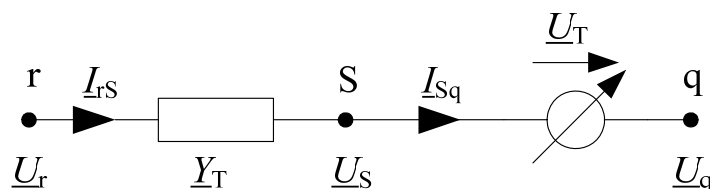
Izračune od (1) do (5) ponavljamo toliko časa, dokler ne dosežemo dovolj majhno razliko med dvema zaporednima izračunoma, mismatch manjši od pogoja.

3. STATIČNI SINHRONSKI SERIJSKI KOMPENZATOR (SSSC)

SSSC je ena izmed FACTS (flexible alternating current transmission system) naprav, ki v EES omogoča regulacijo napetosti, tokov in moči v okviru svojih zmožnosti. Sestavljen je iz transformatorja, AC/DC pretvornika in baterije ali kondenzatorja 0.

V našem primeru se bomo osredotočili na SSSC, ki je sestavljen iz kondenzatorja. Deluje na principu injiciranja napetosti, ki je pravokotna na tok. Pri tem ga omrežje zazna kot navidezni induktivni ali kapacitivni element, odvisno od predznaka injicirane napetosti. Pri enopolnem modelu vezava transformatorja ni pomembna in je ni treba upoštevati. Pri trifaznem modelu je vezava transformatorja bistvenega pomena in ima velik vpliv na samo regulacijo.

Poleg vsega naštetega bi na tem mestu omenili, da je v radialnih omrežjih možna le regulacija injicirane napetosti ter vozliščne napetosti. Regulacija delovne in jalove moči namreč ni smiselna. Pri modeliranju bomo izhajali iz tokovnega modela SSSC za Newton-Raphsonovo metodo, ki se od napetostnega modela razlikuje po dodatnem vozlišču S, ki omogoča, da izgube SSSC upoštevamo ločeno od regulirane veličine. Enačbe, ki opisujejo SSSC bomo prilagodili, da bodo primerne za uporabo z U-I metodo 0.



Sl. 1: Enopolni tokovni model SSSC.

4. TRIFAZNI MODEL SSSC

Pri izdelavi trifaznega modela SSSC je nujno upoštevati povezavo SSSC z omrežjem. Prva možnost je, da imamo tri enofazne transformatorje povezane na skupni AC/DC pretvornik. Druga možnost je en trifazni transformator vezave trikot/zvezda povezan na skupni AC/DC pretvornik. Pri prvi možnosti moramo pri modeliranju sistema upoštevati, da je injicirana napetost v posamezni fazi pravokotna na tok, ki teče skozi SSSC. Pri drugi vezavi je treba upoštevati, da je vsota vseh treh injiciranih napetosti enaka nič in da je injicirana napetost v posamezni fazi pravokotna na tok skozi SSSC. Ne glede na vrsto vezave se tudi pri trifaznem modeliranju sistema tok skozi SSSC ne spreminja (6). Izgube SSSC

upoštevamo z nadomestno impedanco (7), ločeno od regulacije injicirane ali vozliščne napetosti.

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{rS}^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{I}_{Sq}^p \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_S^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_r^p \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \underline{Z}_T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_{rS}^p \end{bmatrix} \quad (7)$$

kjer je: \underline{I}_{Sq}^p - Fazni tok med vozliščema S in q ,
 \underline{I}_{rS}^p - fazni tok med vozliščema r in S ,
 \underline{U}_S^p - fazna napetost v vozlišču S ,
 \underline{U}_r^p - fazna napetost v vozlišču r ,
 \underline{Z}_T - impedanca SSSC, ki ponazarja izgube na SSSC.

4.1 Regulacija injicirane napetosti

4.1.1 Trije enofazni transformatorji

Pri trifaznem modelu SSSC, ki je s sistemom povezan preko treh enofaznih transformatorjev, je regulacija injicirane napetosti preprosta. Vrednost injicirane napetosti je pri SSSC, ki je s sistemom povezan preko treh enofaznih transformatorjev, lahko za vse tri faze enaka ali različna. Za regulacijo injicirane napetosti uporabimo sledeč opis SSSC (8) za vse tri faze. Enako se SSSC modelira tudi za enopolno analizo, pri čemer se upošteva le eno fazo.

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{-q}^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_S^p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_T^p \cdot e^{j \left(\delta_{Sq}^p + \frac{\pi}{2} \right)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

kjer je: \underline{U}_q^p - Fazna napetost v vozlišču q ,
 \underline{U}_S^p - fazna napetost v vozlišču S ,
 U_T^p - amplituda injicirane fazne napetosti SSSC po posamezni fazi,
 δ_{Sq}^p - fazni kot toka med vozliščema S in q .

4.1.2 Trifazni transformator

Pri regulaciji injicirane napetosti s SSSC, ki je s sistemom povezan preko enega trifaznega transformatorja, opis SSSC z enačbami več ni tako preprost, saj je potrebno pri tem upoštevati vezavo transformatorja. Kot regulirana injicirana napetost je lahko definirana le injicirana napetost v eni fazi. Injicirani napetosti v ostalih dveh fazah sta izračunani preko sinusnega

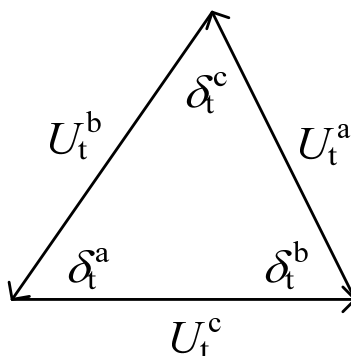
izreka (9) in (10). Pri izračunu ostalih dveh injiciranih napetosti in vozliščne napetosti (11), upoštevamo dejstvo, da so injicirane napetosti pravokotne na tok. Postopek od (9) do (11) ponavljamo v vsaki iteraciji.

$$\begin{aligned}\delta_T^a &= \left| \pi - \left| \delta_{Lsq}^c - \delta_{Lsq}^b \right| \right| \\ \delta_T^b &= \left| \pi - \left| \delta_{Lsq}^a - \delta_{Lsq}^c \right| \right| \\ \delta_T^c &= \left| \pi - \left| \delta_{Lsq}^b - \delta_{Lsq}^a \right| \right|\end{aligned}\quad (9)$$

$$\frac{U_T^a}{\sin \delta_T^a} = \frac{U_T^b}{\sin \delta_T^b} = \frac{U_T^c}{\sin \delta_T^c} \quad (10)$$

$$\left[\underline{U}_{-q}^p \right] = \left[\underline{U}_{-S}^p \right] + \left[U_T^p \cdot e^{j \left(\delta_{Lsq}^p + \frac{\pi}{2} \right)} \right] \quad (11)$$

- kjer je:
- δ_T^p - Kot v sinusnem izreku,
 - δ_{Lsq}^p - fazni kot toka med vozliščema S in q ,
 - U_T^p - amplituda injicirane napetosti SSSC po posamezni fazi,
 - \underline{U}_{-q}^p - fazna napetost v vozlišču q ,
 - \underline{U}_{-S}^p - fazna napetost v vozlišču S .



Sl. 2: Trikotnik za izračun injiciranih napetosti.

4.2 Regulacija amplitude vozliščne napetosti

4.2.1 Trije enofazni transformatorji

Regulacija vozliščne napetosti s SSSC, ki je povezan s sistemom preko treh enofaznih transformatorjev je relativno enostavna. Tudi v tem primeru se tok skozi SSSC ne spremeni (6). Padec napetosti zaradi izgub definiramo ločeno od regulacije (7). Regulacijo vozliščne

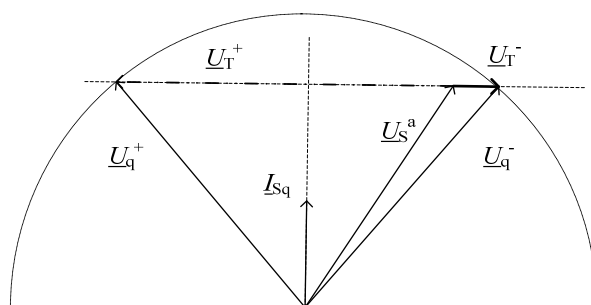
napetosti opisuje (12). Pri enopolnem opisu sistema bi bile enačbe enake, vendar bi se nanašale le na eno fazo.

Na tem mestu moramo opozoriti, da je pri vezavi SSSC s tremi enofaznimi transformatorji možna neodvisna regulacija vozliščnih napetosti. Hkrati pa moramo opozoriti še na dejstvo, da sta v tem primeru za vsako fazo možni dve rešitvi za vozliščno napetost (Sl. 3), z induktivnim oz. kapacitivnim karakterjem. Tako za vsako fazo izberemo tisto vozliščno napetost, za katero velja, da je nadomestna virtualna impedanca SSSC manjša (13), da dosežemo konvergenco 0.

$$\underline{U}_q^p = U_{def}^p \cdot e^{j \left(\delta_{I_{sq}}^p \pm \arccos \left(\frac{U_S^p}{U_{def}^p} \cdot \cos(\delta_{U_s}^p - \delta_{I_{sq}}^p) \right) \right)} \quad (12)$$

$$Z_{SSSC}^p = \left| \frac{U_q^p - U_s^p}{I_{sq}^p} \right| \quad (13)$$

- kjer je:
- \underline{U}_q^p - Fazna napetost v vozlišču q ,
 - U_{def}^p - zelena fazna amplituda vozliščne napetosti SSSC,
 - $\delta_{I_{sq}}^p$ - fazni kot toka med vozliščema S in q ,
 - \underline{U}_s^p -fazna napetost v vozlišču S ,
 - $\delta_{U_s}^p$ - fazni kot napetosti v vozlišču S ,
 - Z_{SSSC} - nadomestna virtualna impedanca,
 - \underline{I}_{sq}^p - fazni tok med vozliščema S in q .



Sl. 3: Dve rešitvi za zeleno vrednost amplitude vozliščne napetosti.

4.2.2 Trifazni transformator

Pri regulaciji vozliščne napetosti s SSSC, ki je s sistemom povezan z enim trifaznim transformatorjem, smo omejeni z regulacijo vozliščne napetosti le na eno fazo. Vzrok temu je v vezavi transformatorja, ki je trikot/zvezda. Vozliščna napetost v preostalih dveh fazah je

odvisna od injicirane napetosti in kota toka. Vsota injiciranih napetosti vseh treh faz SSSC mora biti 0 in prav tako delovna moč v vsaki fazi.

Najprej naredimo izračun vozliščne napetosti le za eno fazo po (12) in (13). Sledi izračun amplitude injicirane napetosti (14) in uporaba sinusnega izreka za preračun injiciranih napetosti za preostali dve fazi po (9) in (10). Iz injiciranih vozliščnih napetosti izračunamo vozliščne napetosti preostalih dveh faz po (11).

$$\underline{U}_T^p = \underline{U}_q^p - \underline{U}_S^p \quad (14)$$

kjer je:

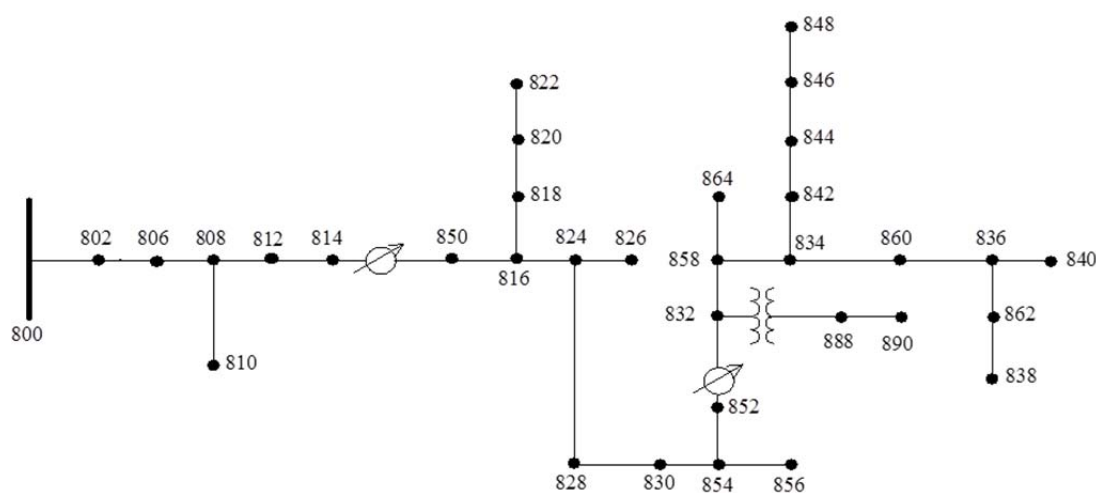
\underline{U}_T^p - amplituda injicirane napetosti SSSC po posamezni fazi,

\underline{U}_q^p -fazna napetost v vozlišču q ,

\underline{U}_S^p - fazna napetosti v vozlišču S .

5. REZULTATI

Modele SSSC smo preizkusili na testnem IEEE 34 vozliščnem sistemu. V sistem sta vključena dva SSSC, med vozliščema 814 in 850 ter vozliščema 852 in 832. Oba SSSC sta enaka in regulirata enako napetost. Impedanca SSSC, ki ponazarja izgube je $j 2.07 \Omega$. Zahtevana maksimalna razlika med dvema iteracijama je 10^{-8} p.u..



Sl. 4: Testni IEEE 34 vozliščni sistem.

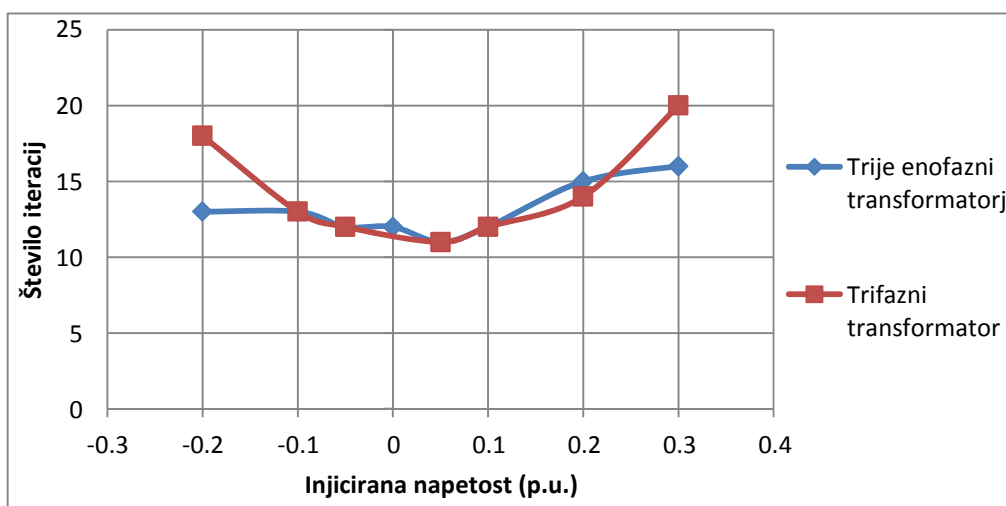
Najprej smo preizkusili trifazna modela SSSC za regulacijo injicirane napetosti. Sl. 5 prikazuje število iteracij v odvisnosti od injicirane napetosti. Željen mismatch je brez regulacije injicirane napetosti dosežen v 12 iteracijah, kar je približno enako kot v primerih, ko je injicirana napetost velikosti od -0.1 p.u. do 0.2 p.u.. Na tem območju je število iteracij

enako za oba modela SSSC. Pri večjih vrednostih injicirane napetosti se število iteracij poveča, vendar ne bistveno.

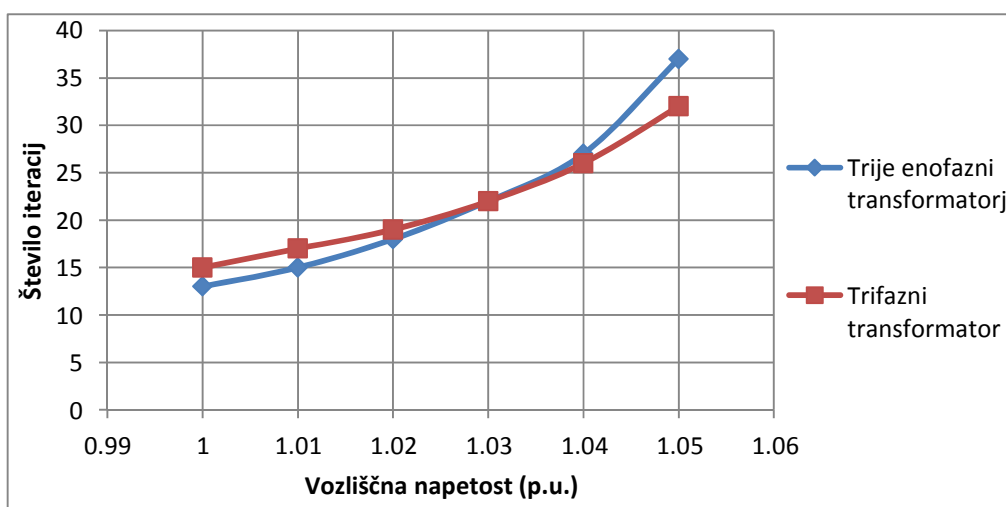
Injicirane napetosti pri SSSC s tremi enofaznimi transformatorji so enake za vse tri faze, medtem ko je pri SSSC z enim trifaznim transformatorjem injicirana napetost v preostalih dveh fazah (b in c) manjša ali enaka.

Sl. 6 prikazuje število iteracij v odvisnosti od zelene vozliščne napetosti. Trend naraščanja števila iteracij za višje zelene vozliščne napetosti je zelo opazen, saj je za zeleno vozliščno napetost 1.05 p.u. od 2 do 3 krat večji kot pri zeleni vozliščni napetosti 1.0 p.u.. Vzrok temu je odvisnost vozliščne napetosti od različnih dejavnikov.

Amplitude vozliščne napetosti so pri SSSC s tremi enofaznimi transformatorji v vseh treh fazah enake, pri SSSC z enim trifaznim transformatorjem pa so amplitude v b in c fazah višje.



Sl. 5: Število iteracij pri regulaciji injicirane napetosti.



Sl. 6: Število iteracij pri regulaciji vozliščne napetosti.

6. ZAKLJUČEK

V radialnih omrežjih Newton-Raphsonova metoda ne konvergira, zato je za izračun napetostnih razmer in pretokov moči primerna za uporabo U-I metoda, za katero smo izdelali modele SSSC tako za enopolno analizo kot tudi za trifazno. Pri izdelavi trifaznega modela smo upoštevali tudi vezavo SSSC z omrežjem. Ta je lahko povezan preko treh enofaznih transformatorjev ali preko enega trifaznega transformatorja z trikot/zvezda vezavo. Vse trifazne modele smo preizkusili tudi na testnem omrežju. V vseh primerih model konvergira, vendar pa bi bilo smiselno model za regulacijo vozliščne napetosti dodelati, da bi zmanjšali število iteracij potrebnih za doseg želenega mismatcha.

7. VIRI, LITERATURA

- [1] X.-P. Zhang, C. Rehtanz, B. Pal, Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, Springer Verlag, 2006.
- [2] K. Balamurugan, D. Srinivasan, Review of Power Flow Studies on Distribution Network with Distributed Generation, IEEE PEDS 2011.
- [3] J. B. V. Subrahmanyam, Load Flow Solution Of Unbalanced Radial Distribution Systems, Journal of Theoretical and Applied Information Technology, Vol6. No1. (pp 040 - 051).
- [4] A. Vinkovič, R. Mihalič, Modificirana Newton-Raphsonova metoda za izračun pretokov moči v elektroenergetskem omrežju s statičnim serijskim kompenzatorjem (SSSC), 7. Konferenca slovenskih elektroenergetikov – Velenje 2005, CIGRE ŠK B4 - 7.
- [5] J. Bogovic, R. Mihalic, A Current Model of an SSSC for the Calculation of Power Flow in a Distribution Network, DEMSEE 2013.
- [6] J. Bogovic, R. Mihalic, SSSC Three Phase Current Model for Distribution Networks Power Flow Calculation, DEMSEE 2013.

NASLOV AVTORJEV

Jerneja Bogovič, univ. dipl. inž. el.

prof.dr. Rafael Mihalič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko

Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

Tel: +386 1 4768 956

Elektronska pošta: jerneja.bogovic@fe.uni-lj.si