

ANALIZA VPLIVA PRETOKA ENERGIJE PREKO RAZLIČNIH NIZKONAPETOSTNIH VODOV NA NAPETOSTNI PROFIL OMREŽJA

Ernest BELIČ, Klemen DEŽELAK, Gorazd ŠTUMBERGER

POVZETEK

V tem delu je predstavljena analiza vpliva pretoka energije na napetostne razmere v vozlišču voda. Analiza je opravljena na podlagi podanega analitičnega izraza. Pri tem je predpostavljeno, da je vod na eni strani priključen na neskončne zbiralke, na drugi strani voda pa je opazovana napetost v odvisnosti od pretoka energije. V analizo so zajeti trije nizkonapetostni kabelski vodi, analiziran pa je tudi vpliv dveh različnih dolžin vodov. Rezultati kažejo, da v nizkonapetostnem omrežju na napetost bistveno bolj vpliva usmerjen pretok energije (delovna moč), med tem ko je vpliv recipročne izmenjave energije (jalove moči) minimalen. Omenjen vpliv na napetost se poveča, če so uporabljeni daljši vodi.

ABSTRACT

The paper provided presents a line voltage dependency analysis on active and reactive power flow. The line voltage dependency is studied based on analytical expression. For the analysis it is assumed that one end of the line is connected to infinite bus, while at the other end voltage is observed in dependency of active and reactive power flow. The analysis covers three different low voltage cables with two different lengths. The results shows that in low voltage network voltage significantly depends on active power flow, while reactive power flow dependency is minimal. Voltage dependency increases, when low voltage lines are extended.

1. UVOD

Nizkonapetostno omrežje je zadnji element elektroenergetskega omrežja, ki omogoča prenos in izmenjavo električne energije med prenosnim omrežjem, porabniki in proizvajalci. To omrežje ima nekatere specifične lastnosti, ki se razlikujejo od prenosnega omrežja. Med najpomembnejše sodijo [1]:

- radialno ali šibko zazankano obratovanje,
- nizko razmerje X/R vodov,
- nesimetrično obratovanje,
- nesimetrična bremena in
- razpršena proizvodnja.

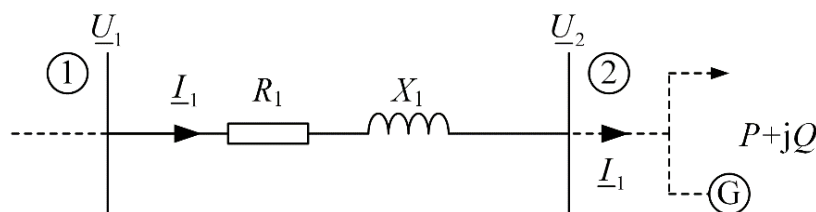
Vse te lastnosti vplivajo na napetostni profil omrežja, ki mora zaradi končnih porabnikov (proizvajalcev) biti znotraj predpisanih meja. Največji in neposreden vpliv na napetostni profil omrežja ima pretok energije preko vodov. Kakšen bo ta vpliv je odvisno predvsem od tipa oziroma lastnosti uporabljenih vodov omrežja. Pri izmeničnem prenosu električne energije sodelujeta dva dela pretoka energije. Prvi del je usmerjen pretok energije imenovan tudi delovna moč. Ta del pretoka energije je mogoče pretvoriti v mehansko delo. Drugi del pretoka energije predstavlja recipročna izmenjava energije ali jalova moč. Ta poteka med energijskimi posodami v omrežju in služi predvsem za magnetenje strojev in tuljav, za svoje obratovanje pa jo potrebujejo tudi vodi. Omenjeni elementi omrežja potrebujejo jalovo moč induktivnega značaja. Da pa recipročna izmenjava energije lahko poteka pa je potrebna tudi jalova moč kapacitivnega značaja. To zagotavljajo generatorji, ki lahko zraven delovne moči generirajo tudi jalovo moč kapacitivnega značaja, kondenzatorske baterije ali aktivni filtri.

Preko posameznega voda v omrežju lahko torej poteka usmerjen pretok in recipročna izmenjava energije. Različne smeri oziroma različni značaji pretakanja energije bodo v omrežju povzročili različne vplive na napetostni profil omrežja. Takšni vplivi so še posebej očitni v nizkonapetostnem omrežju, kjer ne veljajo predpostavke iz prenosnega omrežja, da je na napetostni profil mogoče bistveno vplivati z jalovo močjo [2]. Zaradi tega so v tem delu s pomočjo matematičnih izrazov analizirani vplivi pretoka energije na napetostni profil za različne nizkonapetostne vode. V razdelku 2 je predstavljen model nizkonapetostnega voda in analitičen izraz za napetost v točki voda, kjer je priključeno breme ali generator v odvisnosti od moči bremena ali generatorja. V razdelku 3 so predstavljeni rezultati dobljeni s pomočjo analitičnega izraza podanega v razdelku 2 za tri tipične nizkonapetostne kabelske vode. Sklep je podan na koncu, v razdelku 4.

2. ANALIZA NIZKONAPETOSTNEGA OMREŽJA

V tem razdelku je predstavljen model nizkonapetostnega voda, ki temelji na RL modelu voda. Za ta model je podan analitičen izraz za napetost v vozlišču 2, v odvisnosti od napetosti v vozlišču 1 in pretoka energije preko vozlišča 2.

Omenjen model voda je predstavljen na sl. 1. Predstavljata ga fazna vrednost ohmske upornosti voda R_1 in fazna vrednost reaktance voda X_1 . Napetost v vozlišču 1, kjer je priključen en del voda je označena s fazorjem $\underline{U}_1$, napetost v vozlišču 2, ker je priključen drugi del voda, pa s fazorjem $\underline{U}_2$. Fazor toka $\underline{I}_1$ je definiran v smeri od vozlišča 1 proti vozlišču 2. Glede na prvi Kirchhoffov zakon bo isti tok $\underline{I}_1$ tekkel tudi iz vozlišča 2, kot je to označeno na sl. 1.



Sl. 1: Model voda nizkonapetostnega omrežja

V skladu z označeno smerjo toka $\underline{I}_1$, pozitivni predznak P označuje porabo, negativni pa proizvodnjo delovne moči v vozlišču 2. Pozitivni predznak Q označuje induktivni značaj, negativni pa kapacitivni značaj jalove moči. Za vozlišče 2 velja zveza med napetostjo, tokom, delovno in jalovo močjo, ki je zapisana s (1).

$$\underline{U}_2 \underline{I}_1^* = P + jQ \quad (1)$$

Pri tem je z^* pri toku $\underline{I}_1$ označena konjugirana kompleksna vrednost. Prav tako je mogoče zapisati zvezo med napetostjo v vozlišču 1 in napetostjo v vozlišču 2, ki je zapisana s (2).

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 - \underline{I}_1 (P + jQ) \quad (2)$$

Iz enačbe (1) je mogoče izraziti tok $\underline{I}_1$ in ga vstaviti v enačbo (2). To enačbo je potem potrebno razcepiti na realni in imaginarni del. Ob upoštevanju povezave med funkcijo sinus in kosinus pa je mogoče dobiti bi-kvadratno enačbo zapisano s (3).

$$U_2^4 + 2U_2^2(PR_1 + QX_1) - U_1^2U_2^2 + (P^2 + Q^2)(R_1^2 + X_1^2) = 0 \quad (3)$$

Enačba (3) povezuje efektivno vrednost napetosti v vozlišču 1 U_1 , vozlišču 2 U_2 ter delovno moč P , jalovo moč Q in parametra voda R_1 in X_1 . Omenjena enačba je pogosto uporabljena v analizi stabilnosti radialnih distribucijskih omrežij [3], [4]. Ker je enačba bi-kvadratna ima štiri rešitve. Od teh štirih je le ena rešitev znotraj množice realnih števil in je zapisana s (4).

$$U_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\left(b + \sqrt{b^2 - 4c} \right)} \quad (4)$$

Pri tem b označuje izraz zapisan s (5),

$$b = U_1^2 - 2(PR_1 + QX_1) \quad (5)$$

c pa izraz zapisan s (6).

$$c = (P^2 + Q^2)(R_1^2 + X_1^2) \quad (6)$$

S pomočjo enačbe (4) lahko torej za poznano napetost v vozlišču 1 in poznane parametre voda določimo odvisnost napetosti U_2 od delovne in jalove moči v vozlišču 2. Ob predpostavki, da je vod v vozlišču 1 priključen na neskončne zbiralke, bo napetost v vozlišču 1 konstantna. Zaradi tega lahko s pomočjo enačbe (4) opazujemo kaj se dogaja z napetostjo v

vozlišču 2 ob spreminjanju delovne in jalove moči v vozlišču 2. Zraven tega pa je mogoče analizo izvesti za različne vode in različne dolžine vodov. Vse to je prikazano v razdelku 3.

3. REZULTATI ANALIZE

V tem razdelku so s pomočjo enačbe (4) analizirani 3 različni nizkonapetostni vodi. Rezultate analize predstavljajo izrisi napetosti U_2 v odvisnosti od delovne moči P in Q . Glavna predpostavka pri omenjeni analizi je, da je napetost v vozlišču 1 konstantna in znaša $U_1 = 230$ V. Omenjena predpostavka bi v realnosti pomenila, da je vod v vozlišču 1 priključen na neskončne zbiralke. Ta trditev v realnosti ne drži, vendar jo je smiselno vpeljati za lažjo predstavitev in preglednost rezultatov.

Podatki nizkonapetostnih kabelskih vodov, ki so analizirani v tem delu so prikazani v preglednici 1. Izbrani so trije aluminijasti kabli podjetja Nexans, katerih podatki so pridobljeni iz kataloga [5].

Preglednica 1: Podatki v analizi uporabljenih kabelskih vodov

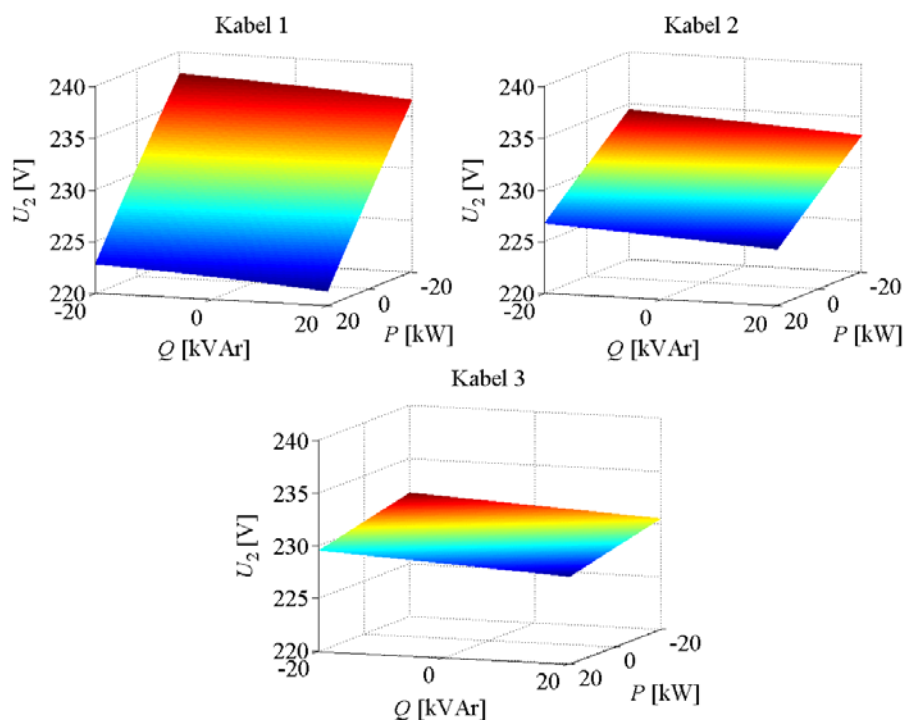
Oznaka kabla	Tip kabla	Število in presek vodnikov	R [Ω/km]	X [Ω/km]	X/R [/]	I_N [A]
Kabel 1	NAA Y	4×35	0,868	0,079	0,091	123
Kabel 2	NAA Y	4×70	0,443	0,075	0,163	179
Kabel 3	NAA Y	4×240	0,125	0,072	0,576	364

Ker se parametri vodov spreminjajo glede na izbran vod, kot tudi na dolžino voda, sta v analizi izvedena dva primera različnih dolžin voda. Izbrani vrednosti dolžin voda sta:

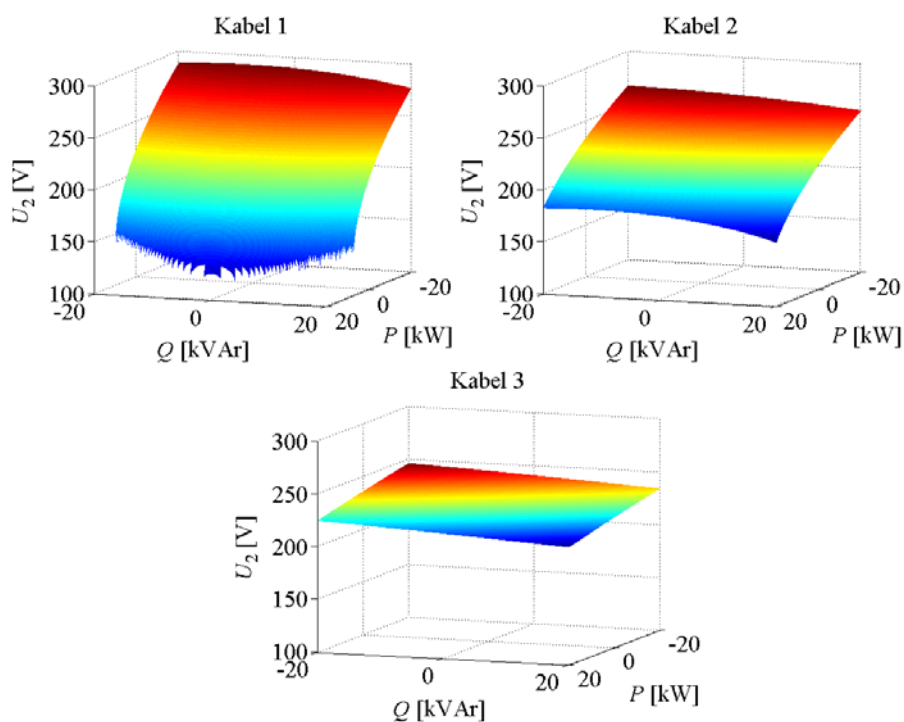
- $l_1 = 100$ m in
- $l_2 = 1$ km.

Iz preglednice 1 je tudi razvidno, da različni vodi prenašajo različne tokovne obremenitve, kar omejuje tudi pretok energije preko vodov. Zaradi tega je v analizi upoštevan pretok energije, ki se lahko prenaša preko najšibkejšega voda označenega s kabel 1. V primeru, da je posamezen vod toliko obremenjen, da ni več zagotovljena napetostna stabilnost (rezultat enačbe (4) je kompleksno število), takrat v izrisih posamezne točke niso izrisane.

V prvem primeru je izbrana dolžina vodov l_1 , ki je enaka 100 m. Za to dolžino vodov so na sl. 2 prikazane odvisnosti napetosti U_2 od jalove moči Q , ki se spreminja v območju ± 20 kVar in delovne moči P , ki se spreminja v območju ± 20 kW. Sl. 3 pa prikazuje rezultate za izbrano dolžino vodov $l_2 = 1$ km, kjer so prikazane enake odvisnosti kot na sl. 2.

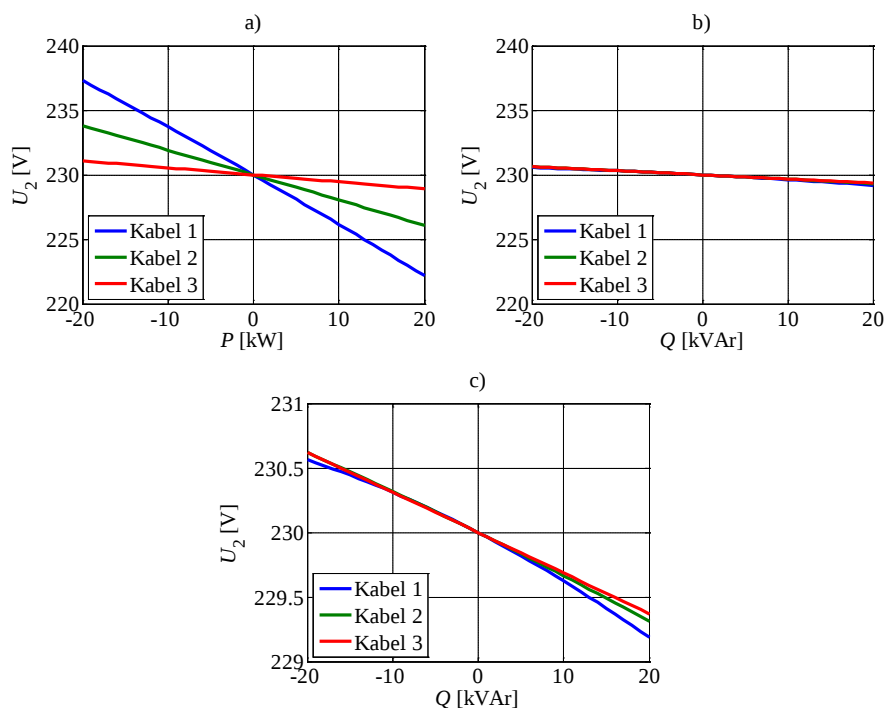


Sl. 2: Odvisnost napetosti v vozlišču 2 v odvisnosti od delovne in jalove moči za vse tri vode in dolžino posameznega voda l_1



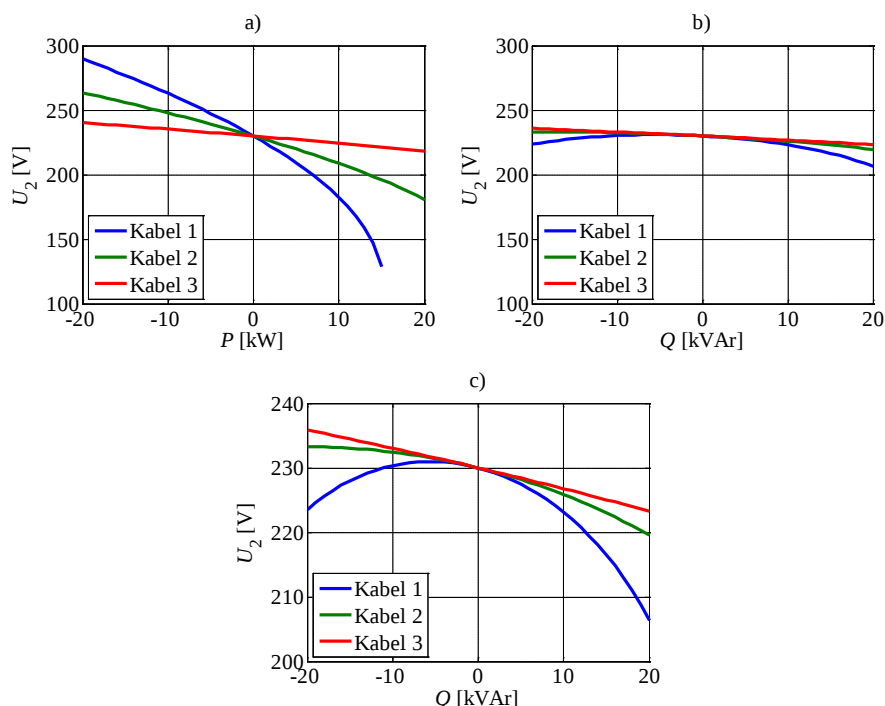
Sl. 3: Odvisnost napetosti v vozlišču 2 v odvisnosti od delovne in jalove moči za vse tri vode in dolžino posameznega voda l_2

Iz rezultatov na sl. 2 vidimo, da bo za kabel 1 spreminjanje delovne moči povzročilo največjo spremembo napetosti U_2 . Spreminjanje jalove moči bo na napetost vplivalo zelo malo pri vseh treh obravnavanih vodih. Najbolj občutljiv na spremembe delovne moči je torej vod z najnižjim presekom, med tem ko je pri vodu z največjim presekom opazen najmanjši vpliv delovne moči na napetost. Na sl. 3, kjer so vsi vodi podaljšani na 1 km vidimo, da enake spremembe delovne moči povzročijo veliko večje spremembe napetosti kot na sl. 2. Med tem pa vidimo, da se vpliv jalove moči na napetost ni bistveno spremenil. Za kabel 1 na sl. 3 vidimo, da pri povečevanju obremenitve napetost v vozlišču 2 ni več stabilna, kar se pa za kabla 2 in 3 v omenjenem primeru ni pokazalo. Iz tega je tudi razvidno, da je potrebno presek kabla izbirati tudi glede na predvideno dolžino. Za podrobnejši prikaz krivulj sta na sl. 4 podrobneje predstavljena dva mejna primera za dolžino kabla l_1 . V prvem primeru (primer a)) je $Q = 0$ kVAr in se spreminja delovna moč P , v drugem primeru (primer b)) pa je $P = 0$ kW in se spreminja Q . Primer c) pa predstavlja povečano sliko slike b).



Sl. 4: Odvisnosti napetosti U_2 v odvisnosti od a) delovne moči P v primeru ko je $Q = 0$ kVAr, b) jalove moči Q v primeru ko je $P = 0$ W in c) povečava slike b), za dolžino vodov l_1 .

Rezultati kažejo, da je napetost U_2 v odvisnosti od delovne moči P praktično linearna, največji naklon pa ima pri kablu 1, ki je kabel z najmanjšim presekom. Krivulje napetosti U_2 v odvisnosti od jalove moči na sl. 4 b) in c) potekajo skoraj paralelno in se ne sekajo kot krivulje na sl. Sl. 4 a), njihov naklon pa je manjši od najmanjšega naklona na sl. Sl. 4 a) pri kablu 3. Če vse tri vode podaljšamo na $l_2 = 1$ km, pridejo pri kablilih šibkejšega preseka (kabel 1 in 2) bolj do izraza nelinearne odvisnosti med napetostjo U_2 in delovno ter jalovo močjo, kot kaže sl. 5.



Sl. 5: Odvisnosti napetosti U_2 v odvisnosti od a) delovne moči P v primeru ko je $Q = 0$ kVAr, b) jalove moči Q v primeru ko je $P = 0$ W in c) povečava slike b), za dolžino vodov l_2 .

Na sl. 5 a) vidimo, da bo napetost U_2 postala močno nelinearno odvisna od spremembe delovne moči za najšibkejši vod (kabel 1). Pri veliki obremenitvi bo celo postala nestabilna. Pri kablu 2 vidimo, da je ta odvisnost manj očitna, pri kablu 3 pa je ta odvisnost še vedno praktično linearna. Pri odvisnosti napetosti U_2 od jalove moči na sl. 5 b) in c) vidimo, da bo pri kablu 1 vsakršna jalova moč (induktivnega ali kapacitivnega značaja) vodila v nižanje napetosti U_2 , kar se pri kablu 2 in 3 ne bo zgodilo. Pri kablilih 2 in 3 bo povečanje jalove moči kapacitivnega značaja vodilo v povišanje napetosti U_2 . Pri primerjavi vpliva delovne in jalove moči na napetost U_2 vidimo, da bo vpliv jalove moči še vedno manjši od vpliva delovne moči.

4. SKLEP

V delu so na podlagi analitičnega izraza analizirani vplivi delovne in jalove moči na napetost v vozlišču 2 voda, ki je predstavljen v razdelku 2. Analizirani so trije nizkonapetostni kabelski vodi, za vse tri pa je analiza izvedena za dve različni dolžini vodov. Rezultati analize so pokazali, da je v primeru kratkih vodov odvisnost napetosti U_2 skoraj linearno odvisna tako od delovne, kot tudi jalove moči. V primeru da so vodi daljši pa ta odvisnost postane nelinearna za vode s manjšim presekom. Pri daljših vodih postane ogrožena napetostna stabilnost za vode z manjšim presekom, prav tako pa vpliv jalove moči postane takšen, da povečevanje jalove moči vodi v nižanje napetosti U_2 . Prikazani rezultati nasprotujejo lastnostim, ki jih odraža prenosno omrežje, kjer jalova moč vpliva na napetost bistveno bolj

kot delovna. Razlog za to so specifične lastnosti nizkonapetostnega omrežja, med katerimi je najpomembnejše nizko razmerje X/R . To razmerje daje omenjenemu omrežju predvsem ohmski značaj.

5. VIRI, LITERATURA

- [1] K. Balamurugan in D. Srinivasan, „Review of Power Flow Studies on Distribution Network with Distributed Generation,“ *IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, pp. 411-417, 2011.
- [2] O. I. Elgerd, *Electric energy system theory: An introduction*, New York: McGraw Hill Inc., 1971.
- [3] T. Gözel, U. Eminoglu in M. H. Hocaoglu, „A tool for voltage stability and optimization (VS&OP) in radial distribution systems using matlab graphical user interface (GUI),“ *Simulation Modelling Practice and Theory*, Izv. 16, št. 5, pp. 505-518, 2008.
- [4] M. Chakravorty in D. Das, „Voltage stability analysis of radial distribution networks,“ *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Izv. 23, št. 2, pp. 129-135, 2001.
- [5] Nexans, *Power Cables 1 - 30 kV*, Hannover: Nexans, 2012.

NASLOV AVTORJEV

Ernest Belič, mag. inž. el.

doc. dr. Klemen Deželak, univ. dipl. inž. el.

red. prof. dr. Gorazd Štumberger, univ. dipl. inž. el.

Univerza v Mariboru, Fakulteta, za elektrotehniko, računalništvo in informatiko
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija

Tel: + 386 2 220 71 75

Fax: + 386 2 252 54 81

Elektronska pošta: ernest.belic@um.si