

## METODE ZA UGOTAVLJANJE IZVOROV UPADOV NAPETOSTI

Boštjan POLAJŽER

### POVZETEK

*V prispevku so opisane in ovrednotene metode za ugotavljanje izvorov upadov napetosti. Obravnavane so metode, ki temeljijo na različnih kriterijih – sprememba energije, sprememba toka in sprememba impedance. Izvedeni so številni simulacijski preizkusi, obravnavane metode pa so preizkušene tudi z meritvami v laboratoriju in na terenu. Z analizo dobljenih rezultatov so metode za ugotavljanje izvorov upadov napetosti tudi ovrednotene. V primerih simetričnih upadov napetosti vse metode dajejo zadovoljive rezultate. V primerih nesimetričnih upadov napetosti, ki so med najbolj pogostimi, uspešnost večine obravnavanih metod ni zadostna. Z uporabo pozitivnega zaporedja napetosti in tokov se uspešnost vseh obravnavanih metod izrazito poveča.*

### ABSTRACT

*This paper describes and evaluates methods for voltage sag source detection. These methods are based on different criteria, i.e. disturbance energy, current change, and incremental impedance. Extensive simulation tests are performed, whereas the methods for voltage sag source detection are also tested through laboratory measurements, and field data. Based on the analysis of the obtained results, an evaluation of the discussed methods is performed. It is found that in the cases of symmetrical voltage sags, all methods give satisfactory results. However, in the cases of asymmetrical voltage sags, which are the most frequent ones, the effectiveness of almost all methods is insufficient. Furthermore, using positive-sequence components for voltages and currents, the effectiveness of all the discussed methods is considerably increased.*

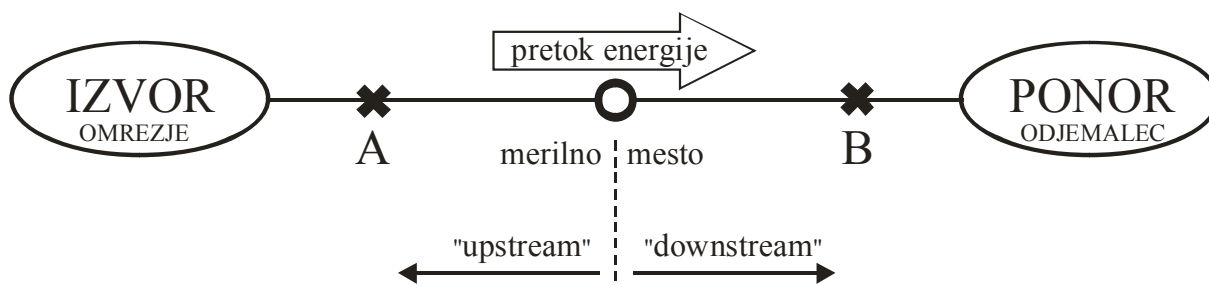
## 1. UVOD

Upadi napetosti so zelo pogosta prehodna motnja v elektroenergetskem sistemu, saj lahko nastanejo zaradi različnih vzrokov kot so vklopi velikih bremen, vklopi energetskih transformatorjev, težki zagoni motorjev in različne vrste okvar [1]. Ker so nekaterih zahtevnejši odjemalci električne energije zelo občutljivi na upade napajalne napetosti [2] ni mogoče izključiti zahtev po odškodninah zaradi nastale gospodarske škode, povzročene zaradi upadov napetosti. V takšnih primerih je potrebno z zelo veliko zanesljivostjo ugotoviti ali je upad napetosti povzročen v razdelilnem ali prenosnem delu omrežja, ali morda pri katerem izmed odjemalcev električne energije.

Na merilnem mestu je običajno vgrajena naprava za spremljanje kakovosti električne energije, ki med različnimi dogodki v omrežju beleži podatke o efektivnih vrednostih, harmonskem spektru, simetričnih komponentah, faktorju moči ipd. Z ustreznimi metodami [3]-[6] lahko iz razpoložljivih podatkov ugotavljamo, na kateri strani merilnega mesta upad izvira. Ugotavljanje izvorov upadov napetosti je seveda bistveno bolj zanesljivo z uporabo metod, ki temeljijo na trenutnih vrednosti napetosti in tokov [7], vendar so tovrstne meritve manj pogoste. Zato so v tem prispevku obravnavane metode, ki temeljijo bodisi na efektivnih in povprečnih vrednostih ali pa na fazorjih oziroma na komponentah pozitivnega zaporedja.

## 2. METODE ZA UGOTAVLJANJE IZVOROV UPADOV NAPETOSTI

Glede na smer pretoka energije na merilnem mestu (slika 1), ki je določena za normalno obratovalno stanje, so dogodki v točki A definirani kot "upstream" dogodki, dogodki v točki B pa kot "downstream" dogodki. Seveda upadi napetosti redko nastanejo na napetostnem nivoju merilnega mesta. Običajno je vmes več ali vsaj en transformator, ki v primerih nesimetričnih upadov spremenijo način vpliva dogodkov na posamezne faze. V primerih upadov na primer zaradi dvopolnega kratkega stika, transformator vezalne skupine Yd upade na primarni strani, ki so tipa C (velik upad v dveh fazah), na sekundarni strani spremeni v upade tipa D (manjši upad v dveh fazah in večji upad v tretji fazi) in obratno.



Sl. 1: Definicija "upstream" (A) in "downstream" (B) strani izvora upada napetosti

### 2.1 Metoda na osnovi kriterija sprememba energije

Upadi napetosti nastanejo zaradi različnih dogodkov, ki jih lahko vse obravnavamo kot ponore energije. Torej lahko predpostavimo, da se bo v primerih "upstream" dogodkov energija na merilnem mestu zmanjšala, medtem ko se bo v primerih "downstream" dogodkov povečala. Spremembo energije na merilnem mestu  $\Delta w(t)$ , ki je določena iz razlike moči med upadom (*sag*) in pred upadom (*presag*) uporabimo za kriterij (1)-[3].

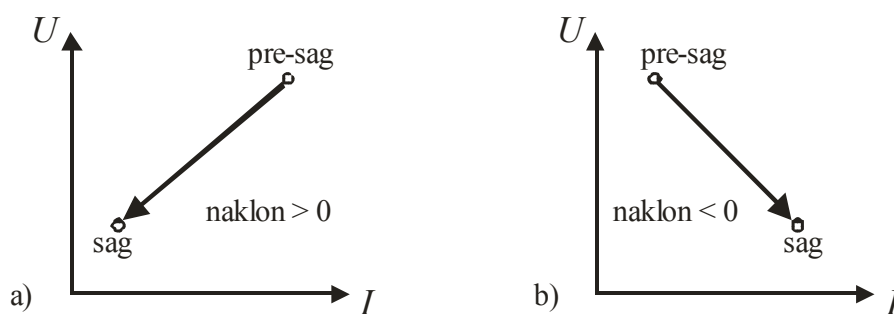
$$\Delta w(t) = \int_0^t (p_{sag}(\tau) - p_{presag}(\tau)) d\tau \begin{cases} < 0 \Rightarrow \text{upstream} \\ > 0 \Rightarrow \text{downstream} \end{cases} \quad (1)$$

Ta metoda zahteva meritve trenutnih vrednosti, kar pa ni vedno mogoče. Zato v enačbi (1) namesto trenutne moči  $p(t)$  uporabimo bodisi povprečno delovno moč  $P$  ali pa samo komponento pozitivnega zaporedja delovne moči  $P^+$ .

## 2.2 Metodi na osnovi kriterija sprememba tokov

Povečanja tokov v neki točki omrežja povzročajo upade napetosti, kar pomeni da se na merilnem mestu toki med "upstream" dogodki zmanjšajo, oziroma povečajo med "downstream" dogodki (slika 2). Na tej osnovi temelji metoda, ki je predlagana v [4]. Ker odvisnost iz slike 2 ni linearna, običajno je to neka trajektorija, je izvedena linearna aproksimacija točk. Dobljeni naklon karakteristike ( $|I_k|, |U_k \cos \phi_k|$ ) uporabimo za kriterij (2),  $|U_k|$  in  $|I_k|$  sta dolžini fazorjev, kjer je  $k \in \{a, b, c\}$  ( $a, b, c$  označujejo posamezne faze). Namesto fazorjev lahko uporabimo tudi efektivne vrednosti.  $\phi_k$  je fazni kot.

$$\text{naklon } (|I_k|, |U_k \cos \phi_k|) \begin{cases} > 0 \Rightarrow \text{upstream} \\ < 0 \Rightarrow \text{downstream} \end{cases} \quad (2)$$



Sl. 2:  $U$ - $I$  karakteristika za "upstream" dogodke (a) in za "downstream" dogodke (b), kjer *sag* označuje stanje med upadom, *pre-sag* pa stanje pred upadom

Ob enakih predpostavkah kot metoda (2)-[4] je v [5] vpeljana metoda, ki temelji na časovnem odzivu delovne komponente toka ( $|I_k| \cos \phi_k$ ). Predznak spremembe prvega prenehaja uporabimo kot kriterij (3), kjer je  $|I_k|$  dolžina fazorja toka,  $\phi_k$  pa je fazni kot. Tudi pri tej metodi lahko uporabimo efektivne vrednosti.

$$\text{prvi prenehaj } (|I_k| \cos \phi_k) \begin{cases} < 0 \Rightarrow \text{upstream} \\ > 0 \Rightarrow \text{downstream} \end{cases} \quad (3)$$

Kriterija (2) in (3) se preverjata za vsako fazo posebej. Ker v primerih nesimetričnih upadov posamezne faze kažejo različne odzive, dobljeni rezultati običajno niso enoumni. Zato lahko v enačbah (2) in (3) upoštevamo samo komponento pozitivnega zaporedja napetosti in tokov,  $\underline{U}^+$  in  $\underline{I}^+$ .

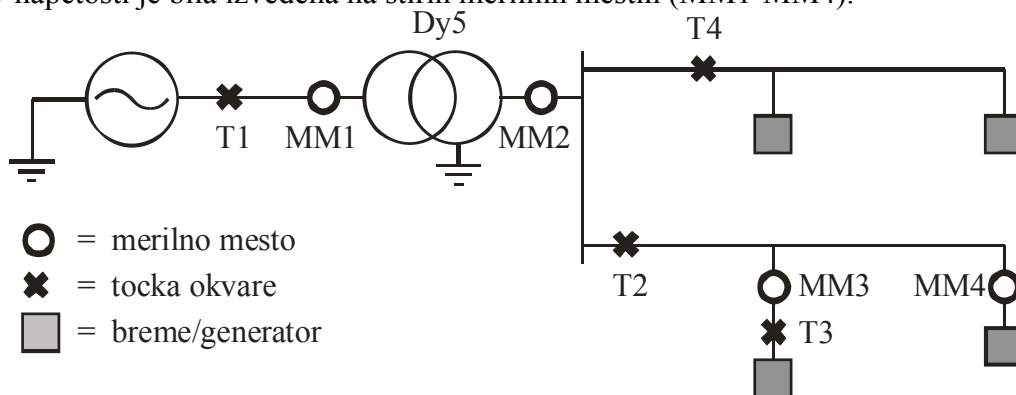
### 2.3 Metoda na osnovi kriterija sprememba impedance

V [6] je predlagan koncept spremembe impedance, ki je negativna za "downstream" dogodke in pozitivna za "upstream" dogodke. Kot kriterij se uporabi samo realni del impedance pozitivnega zaporedja (4). Sprememba impedance je definirana z razmerjem  $\Delta \underline{Z}^+ = (\Delta \underline{U}^+ / \Delta \underline{I}^+)$ . Spremembi napetosti in toka sta izračunani iz vrednosti med upadom (*sag*) in pred upadom (*presag*) kot  $\Delta \underline{U}^+ := (\underline{U}^+_{sag} - \underline{U}^+_{presag})$  in  $\Delta \underline{I}^+ := (\underline{I}^+_{sag} - \underline{I}^+_{presag})$ .

$$\operatorname{Re}(\Delta \underline{Z}^+) = \Delta R^+ \begin{cases} < 0 \Rightarrow \text{upstream} \\ > 0 \Rightarrow \text{downstream} \end{cases} \quad (4)$$

## 3. SIMULACIJE IN MERITVE UPADOV NAPETOSTI

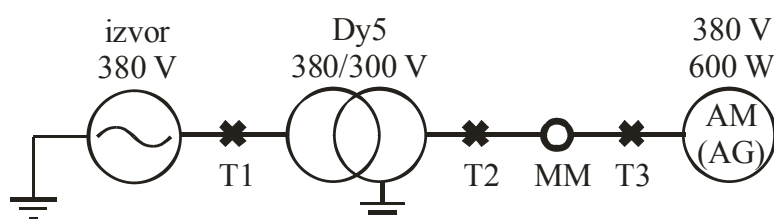
Numerične simulacije upadov napetosti so bile izvedene z uporabo programskega paketa MATLAB/Simulink/SimPowerSystems za izbrano testno omrežje (slika 3). Uporabljeni so bili različni tipi in različne kombinacije bremen kot so RL-breme, asinhronski in sinhronski motorji, ter bremen s konstanto močjo. Z majhnimi asinhronskimi generatorji je bil upoštevan tudi vpliv razpršene proizvodnje. Upadi napetosti zadostne globine (>15%) in trajanja (100 ms) so bili generirani na dva načina: s težkimi zagoni motorjev in z okvarami v omrežju. Okvare so bile povzročene v različnih točkah (T1-T4) in sicer enopolni in dvopolni zemeljski stiki (ZS in 2PZS) ter dvopolni in tripolni kratki stiki (2PKS in 3PKS). Meritev upadov napetosti je bila izvedena na štirih merilnih mestih (MM1-MM4).



Sl. 3: Testno omrežje za numerične simulacije upadov napetosti

Upadi napetosti so bili generirani tudi z eksperimentalnim sistemom iz slike 4. Asinhronski stroj je bil uporabljen kot motor (aktivno breme) ter kot generator (majhna elektrarna). Opravljeni so bili težki zagoni motorja in okvare v treh različnih točkah (T1-T3). Izvedene so bile vse vrste okvar (ZS, 2PZS, 2PKS in 3PKS), tok okvare pa je bil omejen z dodatnimi upori na mestu okvare. Trenutne vrednosti napetosti in tokov so bile izmerjene na merilnem mestu (MM) z digitalnim sistemom dSpace DS1103 PPC.

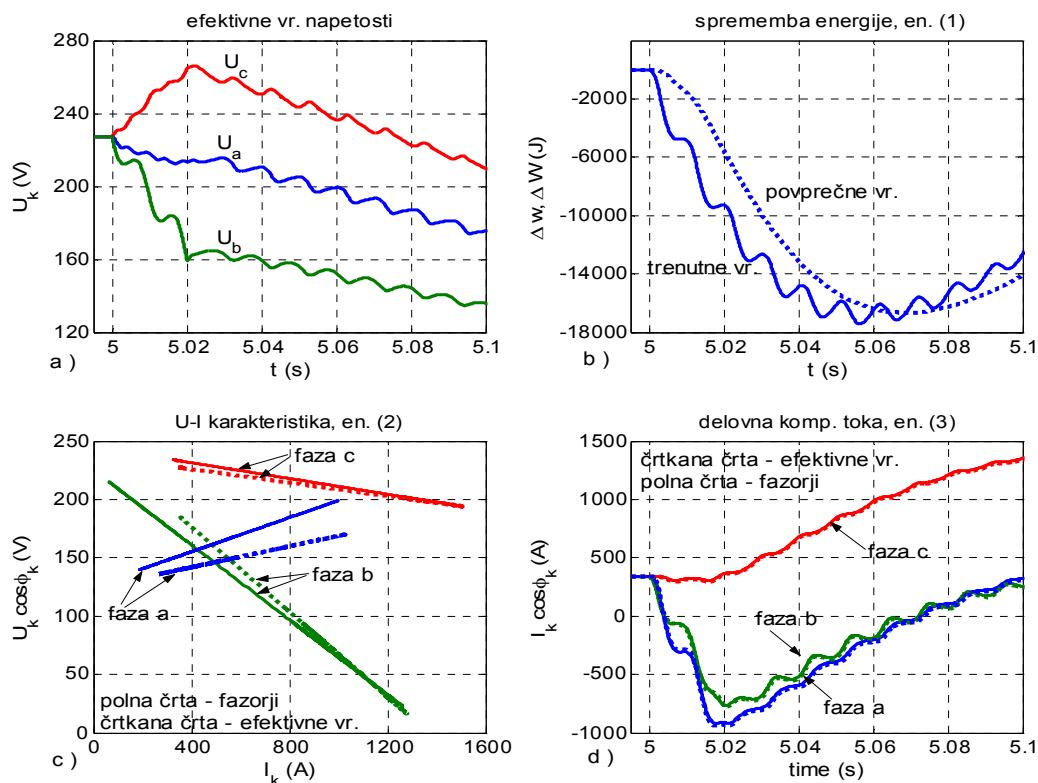
Izvedena je bila tudi analiza podatkov iz terena, ki so bili zajeti v slovenskem omrežju na različnih napetostnih nivojih (400 kV, 220 kV, 110 kV, 20 kV in 0,4 kV). Izvori upadov napetosti so bili znani vnaprej, nastali pa so zaradi različnih vrst okvar v omrežju (ZS, 2PKS in 3PKS) in zaradi vklopov energetskih transformatorjev.



Sl. 4: Eksperimentalni sistem za generiranje upadov napetosti

## 4. REZULTATI

Tipičen primer simulacijskih rezultatov je prikazan na sliki 5. Izvor tega upada napetosti je na "upstream" strani merilnega mesta MM3 (slika 3), to je v točki T2, kjer je nastal 2PZS. Iz dobljenih rezultatov je mogoče razbrati, da je sprememba energije na merilnem mestu negativna (slika 5b), kar je pravilen rezultat ("upstream"). Metodi, ki temeljita na spremembi toka v obravnavanem primeru ne dajeta enournih rezultatov, saj so odzivi za posamezne faze različni – različni predznaki naklonov  $U-I$  karakteristik (slika 5c) in različni predznaki prvih prenihajev delovne komponente toka (slika 5d). Iz dobljenih rezultatov lahko razberemo, da v primeru, kadar namesto trenutnih vrednosti uporabimo povprečne vrednosti, dobimo zelo podobne rezultate. Enako velja kadar namesto fazorjev uporabimo efektivne vrednosti.

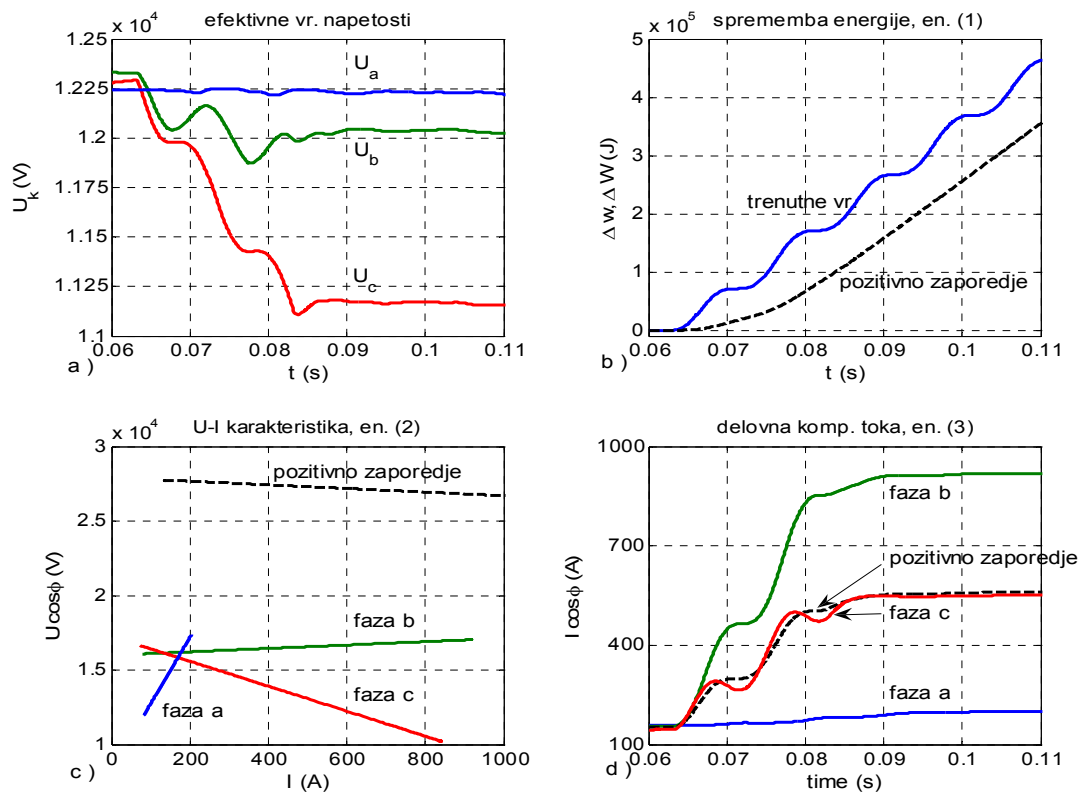


Sl. 5: Simulacijski rezultati za primer "upstream" dvopolnega zemeljskega stika

Na sliki 6 je prikazan primer upada napetosti, ki je nastal zaradi "downstream" 2PKS in sicer na primarni strani distribucijskega transformatorja 20/0,4 kV. Zaradi tega dogodka je bil na bližnjih 20 kV zbiralnicah zabeležen 10% upad napetosti (slika 6a). Vse obravnavane metode, razen metode  $U-I$ , so ugotovile pravilno smer upada ( $\Delta w > 0$ , prenehaj toka  $> 0$ ,  $\Delta R^+ < 0$ ) kot je prikazano na slikah 6b in 6d. Rezultat dobljen z  $U-I$  metodo ni enoumen, saj so predznaki naklonov karakteristike za posamezne faze različni (slika 6c). Kadar namesto fazorjev uporabimo komponente pozitivnega zaporedja, pa tudi ta metoda daje pravilen rezultat, saj je naklon negativen, kar pomeni "downstream" dogodek.

Vse obravnavane metode za ugotavljanje izvorov upadov napetosti so bile preizkušene za skupno 213 primerov upadov (174 simulacij in 39 meritev). Simetrični in nesimetrični upadi napetosti so bili obravnavani ločeno. Posebna pozornost je bila posvečena upadam zaradi zemeljskih stikov (110 primerov), saj so ti v praksi med najbolj pogostimi. Za vse obravnavane metode je bila določena uspešnost, ki je prikazana v preglednici 1. Iz dobljenih rezultatov lahko zaključimo, da so skoraj vse metode v primerih simetričnih upadov napetosti zelo uspešne. Najboljše rezultate je dosegla metoda, ki temelji na spremembi energije, vendar le kadar namesto povprečnih vrednosti uporabimo komponente pozitivnega zaporedja. Obe metodi, ki temeljita na spremembi tokov ( $U-I$  metoda in odziv delovne komponente) dajeta v primerih nesimetričnih upadov zelo slabe rezultate. Uspešnost obeh metod se izrazito poveča kadar namesto fazorjev uporabimo komponente pozitivnega zaporedja. Metoda, ki temelji na spremembi impedance, v splošnem daje sprejemljive rezultate. Uporaba te metode je

vprašljiva v primerih upadov zaradi "upstream" dogodkov v radialnih omrežjih, saj se impedanca v takih primerih praviloma sploh ne spremeni.



Sl. 6: Rezultati za primer "downstream" dvopolnega kratkega stika zabeleženega na terenu,  $\Delta R^+ = -3.6 \Omega$

Preglednica I: Uspešnost obravnavanih metod za ugotavljanje izvorov upadov napetosti

| Metoda                                | simetrični | nesimetrični |                 | skupno |
|---------------------------------------|------------|--------------|-----------------|--------|
|                                       | upadi      | upadi        | zemeljski stiki |        |
| $\Delta w$ (povprečne vr.)            | ••         | •            | ??              | •      |
| $\Delta w$ (pozitivno zap.)           | ••         | ••           | ••              | ••     |
| $U-I$ (fazorji)                       | •          | —            | —               | —      |
| $U-I$ (pozitivno zap.)                | •          | •            | ??              | •      |
| $I_{\text{delovni}}$ (fazorji)        | ••         | —            | —               | ??     |
| $I_{\text{delovni}}$ (pozitivno zap.) | ••         | ••           | ••              | ••     |
| $\Delta R^+$ (pozitivno zap.)         | •          | •            | •               | •      |

Legenda: •• visoka uspešnost (> 95%), • sprejemljiva uspešnost (70% – 95%),  
 ?? vprašljiva uspešnost (50% – 70%), — nezadostna uspešnost (< 50%).

## 5. SKLEP

V prispevku so obravnavane različne metode za ugotavljanje izvorov upadov napetosti. Iz dobljenih rezultatov lahko zaključimo, da so v primerih simetričnih upadov vse obravnavane metode zelo uspešne. V primerih nesimetričnih upadov, še posebej v primerih upadov zaradi zemeljskih stikov, je uspešnost večine metod nezadostna. Kadar pri obravnavanih metodah fazorje nadomestimo s komponentami pozitivnega zaporedja dobimo bistveno boljše rezultate. Dobljeni simulacijski rezultati so v celoti potrjeni z meritvami v laboratoriju in na terenu.

## 6. VIRI, LITERATURA

- [1] M. J. H. Bollen, "Voltage sags in three-phase systems," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 21, no. 9, pp. 8-11,15, September 2001.
- [2] C. J. Melhorn, T. D. Davis and G. E. Beam, "Voltage sags: their impact on the utility and industrial customers," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, no. 3, pp. 549-558, May-June 1998.
- [3] A. C. Parsons, W. M. Grady, E. J. Powers and J. C. Soward, "A direction finder for power quality disturbances based upon disturbance power and energy," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 3, pp. 1081-1086, July 2000.
- [4] C. Li, T. Tayjasanant, W. Xu and X. Liu, "Method for voltage-sag-source detection by investigating slope of the system trajectory," *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, vol. 150, no. 3, pp. 367-372, May 2003.
- [5] N. Hamzah, A. Mohamed and A. Hussain, "A new approach to locate the voltage sag source using real current component," *Electric Power Systems Research*, vol. 72, no. 2, pp. 113-123, December 2004.
- [6] T. Tayjasanant, V. Li, and W. Xu, "A resistance sign-based method for voltage sag source detection," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 4, pp. 2544-2551, October 2005.
- [7] B. Polajžer, G. Štumberger, S. Seme, and D. Dolinar, "Detection of voltage sag sources based on instantaneous voltage and current vectors and orthogonal Clarke's transformation," *IET Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, vol. 2, no. 2, pp. 219-226, March 2008.

## NASLOV AVTORJA

doc. dr. Boštjan Polajžer.

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

Tel: + 386 2 220 70 76

Fax: + 386 2 220 72 72

Elektronska pošta: [bostjan.polajzer@uni-mb.si](mailto:bostjan.polajzer@uni-mb.si)