

# Pozicioniranje indikatora kvarova u nadzemnim distributivnim mrežama metodom pretraživanja

Predrag Mršić, Čedomir Zeljković

Katedra za elektroenergetiku  
Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Banjoj Luci  
Banja Luka, Bosna i Hercegovina  
predrag.mrsic@etfbl.net

**Sažetak** — U radu je predstavljena metoda za pozicioniranje indikatora kvarova u srednjenaponskim distributivnim mrežama u cilju povećanja pouzdanosti napajanja potrošača. Kriterijumska funkcija uvažava topologiju mreže, učestanost kvarova, broj i snagu potrošača. Indikatori kvarova se pozicioniraju na takozvanom glavnom fideru koji se određuje prema kriterijumu najveće udaljenosti od transformatorske stanice. Metoda je prezentovana na primjeru jedne realne distributivne mreže sa područja opštine Banja Luka.

**Ključne riječi** - glavni fider, distributivna mreža, indikatori kvarova, pouzdanost

## I. UVOD

Elektroenergetski sistem je složen dinamički sistem čija je funkcija da sigurno, pouzdano i ekonomično napaja potrošače električnom energijom. On objedinjuje četiri podsistema: proizvodnju, prenos, distribuciju i potrošnju [1]. Potrošači električne energije, zbog svog položaja u elektroenergetskom sistemu, trpe prekide napajanja u bilo kom dijelu sistema. Međutim, zbog različite topologije prenosne i distributivne mreže utvrđeno je da se oko 80% kvarova, koji uzrokuju prekid napajanja, dešava u distributivnoj mreži [2],[3].

Distributivna mreža se sastoji od srednjenaponske i niskonaponske mreže. Kako se, obično, niskonaponska mreža izvodi sa samonosivim kablovskim snopovima, u prigradskim i ruralnim područjima, ona je manje osjetljiva na klimatske promjene i održavanje trase od srednjenaponske mreže koja se obično izvodi sa golim, neizolovanim provodnicima. Prema tome, značajan broj kvarova koji uzrokuju prekid napajanja krajnjih potrošača se, u stvari, dešava u srednjenaponskim mrežama [1].

Postoje dva načina da se poveća pouzdanost napajanja potrošača djelovanjem na srednjenaponsku mrežu: da se smanji broj prekida napajanja i da se smanji trajanje prekida uzrokovano kvarovima. Da bi se smanjio broj prekida napajanja, u distributivnu mrežu, tipično se ugrađuju riklozari pomoću kojih se sekcionišu dijelovi mreže u kvaru, a da bi se smanjilo trajanje prekida u mrežu se ugrađuju indikatori kvarova. Za razliku od riklozera indikatori kvarova ne utiču na topologiju mreže, nego samo na skraćivanje vremena nalaženja kvara, a samim tim i na vrijeme njegovog otklanjanja [4]. Kada se uzme u obzir cijena riklozera i indikatora kvarova dolazi se

do toga da se u mrežu obično ugrađuje jedan ili nijedan riklozer i nekoliko indikatora kvarova. Studije su pokazale da se ugradnjom indikatora kvarova vrijeme trajanja prekida napajanja može smanjiti i do 60% [5].

Problem pozicioniranja indikatora kvarova u srednjenaponskim mrežama je aktuelan od samog nastanka prvih indikatora kvarova sredinom četrdesetih godina dvadesetog vijeka [6]. U jednoj grupi radova pribjegava se određenim uprošćenjima kriterijumske funkcije pa se zanemaruje učestanost kvarova i posmatra sa samo glavni fider koji se određuje prema kriterijumu najveće udaljenosti od napojne tačke [7]-[9]. U drugoj grupi radova koriste se složeniji i realniji modeli koji zahtijevaju složenije optimizacione algoritme [10], [11].

U ovom radu predložice se jedan algoritam za pozicioniranje indikatora kvarova koji je nadogradnja na [9] i koji će uvažiti topologiju mreže, ogranke i učestanost kvarova na vodovima, koja ne mora biti ista za sve vodove u mreži. Zatim, izvršice se poređenje predloženog algoritma i algoritma predstavljenog u radu [9]. Dakle, očuvaće se jednostavnost algoritma za pozicioniranje indikatora kvarova, a pokazace se da se algoritam predložen u radu [9] može unaprijediti. Poređenje dva algoritma izvršice se tako što će se za lokacije indikatora kvarova računati pokazatelji pouzdanosti i to kumulativno vrijeme trajanja prekida napajanja jednog potrošača (engl. *System Average Interruption Duration Index - SAIDI*) i neisporučena električna energija (engl. *Energy Not Supplied - ENS*), srednji broj prekida napajanja potrošača u toku godine (engl. *System Average Interruption Frequency Index - SAIFI*) se neće razmatrati jer indikatori kvarova na njega ne utiču.

## II. METODOLOGIJA

U ovom dijelu će se formulisati problem, definisati kriterijumska funkcija i ukratko objasniti pojam glavnog fidera. Kriterijumska funkcija se može postaviti tako da se direktno posmatra kumulativno vrijeme trajanja prekida napajanja, ali to dovodi do jako komplikovane kriterijumske funkcije. Zbog toga je u [9] data jednostavnija kriterijumska funkcija koja ne posmatra direktno kumulativno vrijeme trajanja prekida napajanja jednog potrošača, ali je jako korelisana sa njom. Zatim koristeći genetski algoritam određuje se minimum kriterijumske funkcije, a onda estimacijom pokazatelja pouzdanosti potvrđuje se korektnost izabranih lokacija [9].

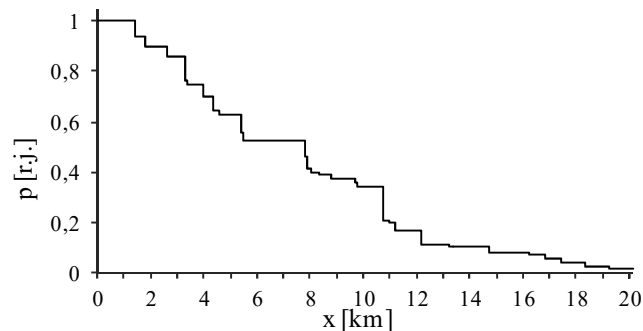
### A. Određivanje glavnog fidera

U cilju pojednostavljenja problema, izbora pozicija za postavljanje indikatora kvarova, u [9] je predstavljen algoritam koji čitavu mrežu posmatra preko tzv. glavnog fidera koji napaja sve potrošače u mreži. Pozicije na glavnom fideru su jedini kandidati za postavljanje indikatora kvarova. Glavni fider se određuje prema kriterijumu najveće udaljenosti od napojne tačke, tj. transformatorske stanice. Oblast u kojoj je nastao kvar je omeđena sa dva indikatora, indikatorom koji signalizira da je protekla struja kvara i prvog narednog koji ne signalizira. U literaturi se mogu naći različite tehnike za određivanje glavnog fidera. U ovom radu je korišćena metodologija predstavljena u [7], [8].

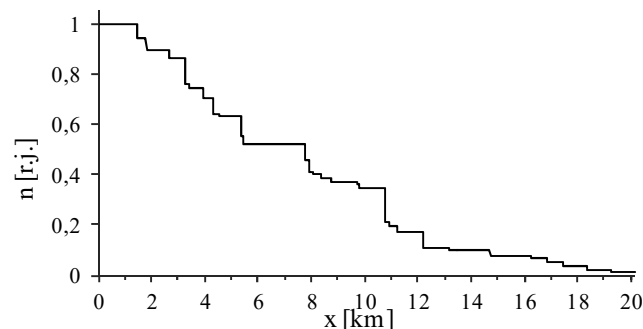
### B. Formulisanje kriterijumske funkcije

Kriterijumska funkcija korištena u [9] uzima u obzir broj i snagu potrošača i udaljenosti između uređaja koji mogu signalizirati da li je struja kvara protekla nekim vodom ili ne. Da bi se ona formirala prvo se formira dijagram relativnog opterećenja i broja potrošača duž glavnog fidera.

Skica mreže na kojoj će se testirati algoritmi i prezentovati procedura za pozicioniranje indikatora kvarova je prikazana na Sl. 1. To je jedna realna 20 kV distributivna mreža sa područja opštine Banja Luka koja napaja dio prigradskog i ruralnog područja opštine. Plavom podebljanom linijom je prikazan glavni fider. Ukupna dužina svih vodova u mreži je 65 km, a najudaljeniji potrošač je udaljen 20,14 km od napojne tačke, tj. glavni fider je dugačak 20,14 km. Detaljni podaci o mreži, dužine vodova, te broj i snaga potrošača priključenih u čvorovima mogu se vidjeti u [12].



Slika 2. Relativno opterećenje duž glavnog fidera



Slika 3. Relativni broj potrošača duž glavnog fidera

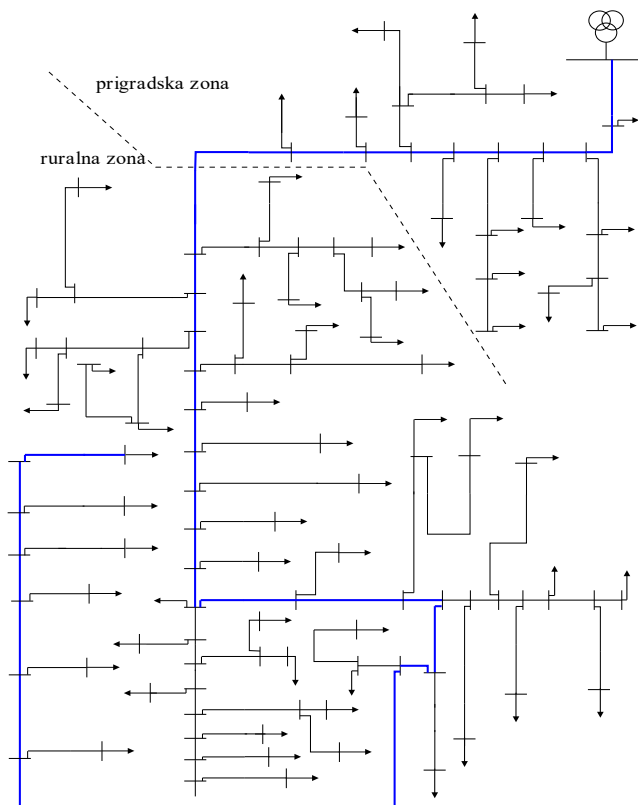
Relativno opterećenje glavnog fidera je prikazano na Sl. 2, a relativni broj potrošača duž glavnog fidera na Sl. 3. Zatim, krećući se duž glavnog fidera detektuju se uređaji koji mogu signalizirati da li je struja kvara protekla vodom ili ne, kao što su prekidači, riklozeri, osigurači i indikatori kvarova. Na osnovu kojih se formira dijagram relativne udaljenosti mjesta kvara do najbližeg uređaja za detekciju kvara, za svaku tačku na glavnom fideru. Na Sl. 4 prikazan je dijagram relativne udaljenosti mjesta kvara od uređaja za detekciju kvara za mrežu prikazanu na Sl. 1 ako bi se na udaljenosti 7,30 km od napojne tačke nalazio indikator kvara. Na osnovu dijagrama prikazanih na Sl. 2, 3 i 4, tj. relativnog opterećenja i broja potrošača duž glavnog fidera, te relativne udaljenosti kvara od uređaja za detekciju kvara formira se dijagram prikazan na Sl. 5, prema formuli:

$$g(x) = (\alpha_1 p(x) + \alpha_2 n(x))d(x), \quad x \in [0, x_{\max}]. \quad (1)$$

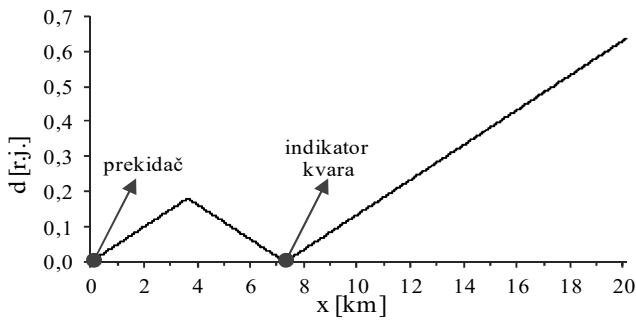
Koeficijenti  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$  su težinski koeficijenti koji određuju odnos uticaja relativnog opterećenja i broja potrošača na kriterijumsku funkciju. U ovom slučaju usvojene su vrijednosti koeficijenata  $\alpha_1 = \alpha_2 = 1,0$ .

Površina prikazana na Sl. 5, dobijena na osnovu izraza (1) treba se minimizovati pomjerajući indikator kvara duž glavnog fidera [9]. Dakle, kriterijumska funkcija za izbor pozicije za postavljanje indikatora kvara je:

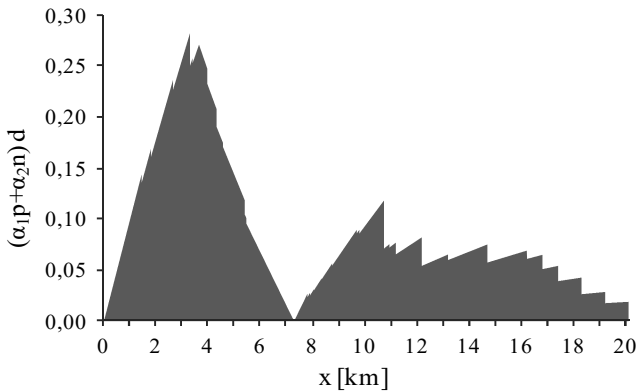
$$g_{opt} = \min \left( \int_0^{x_{\max}} (\alpha_1 p(x) + \alpha_2 n(x))d(x)dx \right). \quad (2)$$



Slika 1. Skica posmatrane 20 kV distributivne mreže



Slika 4. Relativna udaljenost mjesta kvara od uređaja za detekciju kvara



Slika 5. Minimizovana površina kriterijumske funkcije koja se ima za jedan indikator kvara postavljen na 7,30 km od napojne tačke

Formirajući kriterijumsku funkciju na način dat izrazom (2), pri izboru lokacija za postavljanje indikatora, uvažava se broj i snaga potrošača i njihova lokacija u mreži. Međutim, učestanost otkaza vodova, kao i dužina ogranaka ni na koji način ne figurišu. Ako se posmatra Sl. 4, za svaku tačku na glavnom fideru, na dijagramu je, u stvari, data relativna dužina ogranaka koja se treba pretražiti da bi se našao kvar. Prema tome, trebalo bi na neki način i ogranke uvažiti, jer i oni čine dio mreže između dva lokatora. U ovom radu je predloženo da se dijagram relativne udaljenosti mjesta kvara modifikuje tako da se na lokacijama ogranaka, na dijagram prikazan na Sl. 4, superponiraju polovine relativnih dužina ogranaka, Sl. 6. Dakle, određuje se dužina ogranaka, zatim određuje se polovina njihovih relativnih vrijednosti u odnosu na dužinu glavnog fidera i superponira na postojeći dijagram relativne udaljenosti kvara od uređaja za detekciju. Uzima se polovina dužine ogranaka, jer u suštini, srednja vrijednost vremena nalaženja kvara na ogranacima odgovara vremenu koje je potrebno za pretraživanje pola dionice ogranaka. Druga važna činjenica koja se ne uvažava je učestanost otkaza vodova. Fideri, na kojima se ugrađuju indikatori kvarova, obično napajaju potrošače u prigradskom i ruralnom dijelu opštine, kao što je slučaj i u [9]. Prema tome učestanost otkaza vodova ne mora biti ista duž glavnog fidera. Da bi se i ona uvažila, kriterijumska funkcija se modifikuje:

$$g_{opt1} = \min \left( \int_0^{x_{max}} (\alpha_1 p(x) + \alpha_2 n(x)) d_1(x) f(x) dx \right), \quad (3)$$

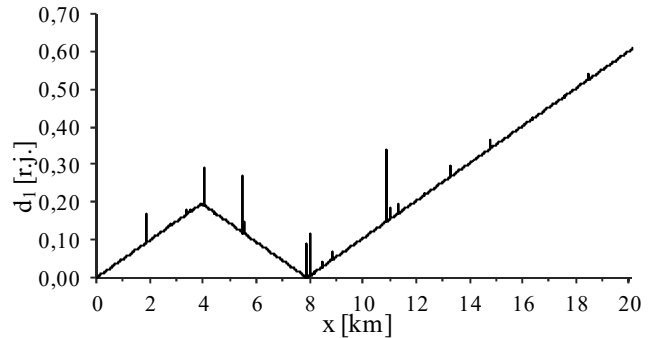
gdje je  $f(x)$  učestanost kvarova na glavnom fideru i ogranacima. Ona se dobije tako što se na učestanost kvarova glavnog fidera superponira učestanost kvarova ogranaka. Naime, sa strane glavnog fidera, ogranaci se posmatraju kao diskontinuiteti u kojima je učestanost kvarova dosta veća. Učestanost kvarova ogranaka se računa kao suma proizvoda dužine vodova koji čine ogranak i učestanosti kvarova tih vodova:

$$f_{ogr} = \sum_i l_i f_i, \quad (4)$$

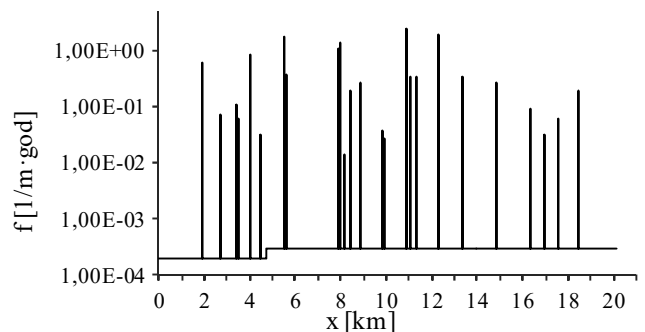
Učestanost kvarova ogranaka, koja se superponira na učestanost kvarova glavnog fidera, treba biti takva da ne zavisi od koraka numeričke integracije. Prema tome, to bi trebao biti pravougaonik jedinične dužine, koja odgovara koraku integracije i površine koja je jednaka  $f_{ogr}$ . U opštem slučaju ako korak integracije teži nuli, ogranaci bi trebali biti opisani dirakovom funkcijom koja je skalirana sa učestanošću kvarova posmatranog ogranaka:

$$f_{ogr}^*(x) = f_{ogr} \delta(x). \quad (5)$$

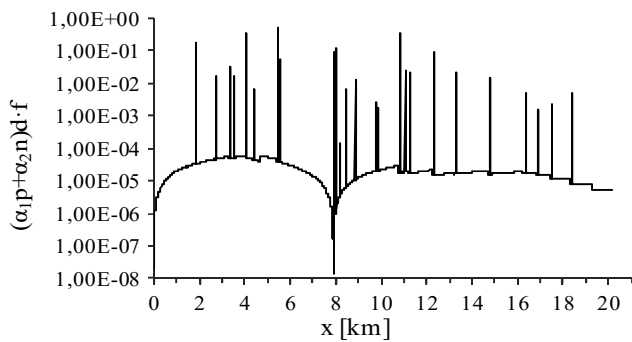
Jedino ako bi učestanost kvarova bila ista duž cijele dionice glavnog fidera i ako taj fider ne bi imao ogranke tada učestanost kvarova vodova ne bi uticala na kriterijumsku funkciju jer bi uvažavanje učestanosti kvarova bilo isto kao da se funkcija množi sa konstantom. Ona bi doprinijela tome da se numerička vrijednost kriterijumske funkcije smanji ali bi se minimum te funkcije dobio za iste pozicije indikatora kvarova.



Slika 6. Relativna udaljenost mjesta kvara duž glavnog fidera i ogranaka od uređaja za detekciju kvara



Slika 7. Učestanost kvarova glavnog fidera i ogranaka



Slika 8. Minimizovana površina kriterijumske funkcije koja se ima za jedan indikator kvara, postavljen na 7,9 km od napojne tačke, kada se uvažava učestanost kvarova glavnog fidera i ogranaka

Za posmatranu mrežu, koja takođe napaja dio prigradskog i dio ruralnog dijela opštine, usvojeno je da je učestanost otkaza vodova u prigradskom dijelu mreže 0,0002 1/m·god, a u ruralnom dijelu mreže 0,0003 1/m·god. Prosječna vremena za nalaženja kvara, manipulaciju rastavljačem i popravak kvara su 13 h, 0,5 h i 12 h, respektivno. Na Sl. 7 prikazana je učestanost otkaza vodova duž glavnog fidera, koja zavisi od udaljenosti od napojne tačke, jer se fider proteže kroz prigradsku i ruralnu zonu i od dužine i lokacije ogranaka. Može se primijetiti da na udaljenosti 4,7 km od transformatorske stanice glavni fider prelazi u ruralnu zonu, pa učestanost otkaza raste sa 0,0002 1/m·god na 0,0003 1/m·god. Na Sl. 8 je prikazana kriterijumska funkcija za jedan indikator kvara postavljen na 7,9 km od napojne tačke uz uvažavanje učestanosti otkaza glavnog fidera i ogranaka, te vremena potrebnog da se pretraže ogranaci, odnosno dužine ogranaka.

### III. PRORAČUN POKAZATELJA POUZDANOSTI

U ovom dijelu će se izvršiti proračun pokazatelja pouzdanosti za mrežu koja sadrži jedan, dva ili tri indikatora kvarova. Lokacije za postavljanje indikatora će se odrediti po algoritmu predstavljenom u [9] i po modifikovanom algoritmu koji je predstavljen u ovom radu kako bi se moglo izvršiti njihovo poređenje i sagledati poboljšanje kriterijumske funkcije kroz standardne pokazatelje pouzdanosti. Pokazaće se doprinos modifikovane kriterijumske funkcije na primjerima do tri indikatora iz razloga što se lokacija za postavljanje indikatora određuje pretraživanjem cijelog skupa mogućih rješenja. Indikatori kvarova koji se danas koriste se obično postavljaju na stubove srednjenaponske mreže, pa prema tome izabrana je rezolucija pretraživanja od 50 m, jer je rastojanje između stubova tog reda veličine. Na osnovu toga dobija se da je za jedan indikator kvara potrebno pretražiti 402 lokacije, dok taj broj rapidno raste sa povećanjem broja indikatora. Za dva indikatora potrebno je pretražiti 80 601 kombinacija, dok za tri 10 746 800 kombinacija. Kako raste broj kombinacija raste i računarsko vrijeme koje je potrebno za izvršavanje programa, pa je tako za pozicioniranje jednog indikator kvara personalnom računaru (CPU: Intel Core i5-4300M 2,6 GHz RAM: 8 GB) potrebno oko 1,5 s, a za tri 6,56 h, dok za četiri indikatora nema smisla ni računati. Ako bi se koristio računar boljih performansi ili ako bi se koristile metode paralelnog izvršavanja programa opet bi bilo pitanje koliko bi vremena trebalo da se odrede lokacije za desetak indikatora kvarova. Ne

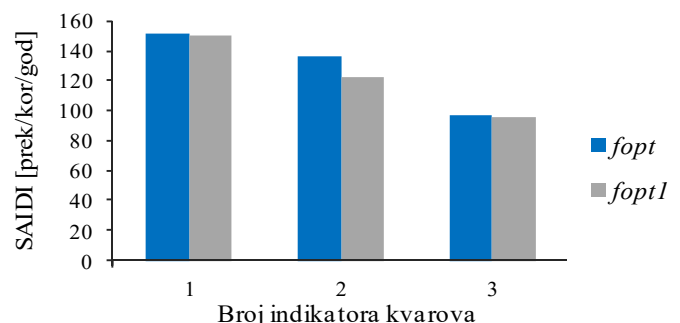
zaboravimo da je ovdje rađeno sa rezolucijom od 50 m, ako bi se željela veća rezolucija, npr. 10-ak metara tada broj kombinacija i vrijeme izvršavanja raste pet puta. Dakle, za veći broj indikatora i bolju rezoluciju potrebno je koristiti napredne optimizacione metode, što će naravno biti predmet narednih istraživanja.

U tabeli I su date lokacije indikatora kvarova određene prema dvije predstavljene kriterijumske funkcije  $f_{opt}$  i  $f_{opt1}$  metodom pretraživanja. Lokacije su računane u odnosu na napojnu tačku. Dakle, prema [9] ako bi se ugradio jedan indikator kvara on bi trebao biti postavljen 7300 m od transformatorske stanice na glavnom fideru, a prema modifikovanoj kriterijumskoj funkciji na udaljenosti 7900 m.

TABELA I. LOKACIJE INDIKATORA KVAROVA

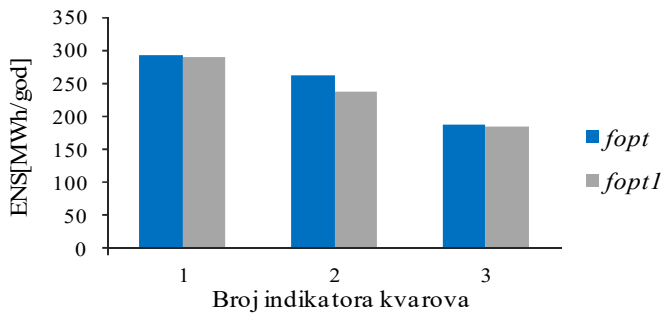
Kriterijumska funkcija	Jedan indikator	Dva indikatora	Tri indikatora
$f_{opt}$	7300	3950, 9500	2950, 6600, 10950
$f_{opt1}$	7900	5500, 8850	5500, 8000, 10900

Nakon pozicioniranja indikatora kvarova na lokacije koje su date u tabeli I izvršen je proračun pokazatelja pouzdanosti. Na Sl. 9 prikazano je kumulativno vrijeme trajanja prekida napajanja jednog potrošača u toku godine za dvije kriterijumske funkcije. Može se vidjeti da se smanjuje kumulativno vrijeme trajanja prekida napajanja bez obzira na broj indikatora, ali isto tako to smanjenje nije procentualno isto za sve grupe indikatora. U tabeli I smo vidjeli da dolazi do promjene lokacija za postavljanje indikatora ako se koristi modifikovana kriterijumska funkcija, međutim, prvenstveno od broja i dužine ogranaka zavisi da li će ušteda biti veća ili ne, tj. da li će ogranak pripadati jednoj ili drugoj oblasti omeđenoj indikatorima kvarova. Smanjenje kumulativnog vremena trajanja prekida dovodi i do smanjenja neisporučene električne energije koja je prikazana na Sl. 10. Takođe, i neisporučena električna energija se smanjila za sve grupe indikatora kvarova, ali opet to smanjenje varira od par procenata za jedan i tri indikatora do desetak procenata za dva indikatora postavljena u mrežu, kao na Sl. 11. Dakle, modifikovanjem kriterijumske funkcije tako da se uvažava učestanost otkaza vodova i vrijeme pretraživanja ogranaka ostvaruje se smanjenje neisporučene električne energije, u posmatranom slučaju do desetak posto. To smanjenje dovodi do povećanja prihoda distributivne kompanije i do 985 KM/god ako se neisporučena električna energija obračuna po cijeni prosječne ljetne i zimske tarife za domaćinstva sa jednotarifnim brojlom [13].

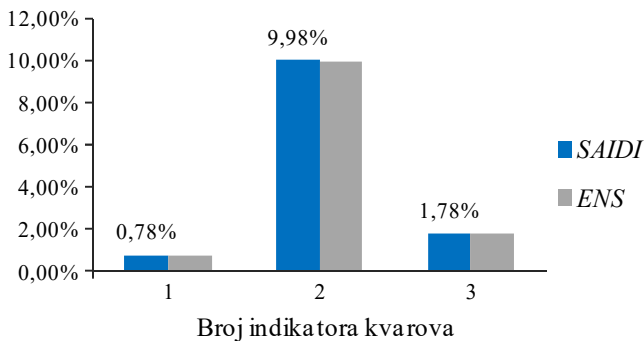


Slika 9. Kumulativno vrijeme trajanja prekida napajanja jednog potrošača

## LITERATURA



Slika 10. Neisporučena električna energija na nivou godine



Slika 11. Procentualno smanjenje kumulativnog vremena trajanja prekida napajanja i neisporučene električne energije

## IV. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana metoda za pozicioniranje indikatora kvarova duž glavnog fidera u srednjenaponskim distributivnom mrežama. Analizirana je jedna kriterijumska funkcija data u prestižnoj literaturi i ustanovljene njene prednosti i nedostaci. Ustanovljeno je da kriterijumska funkcija ne uvažava učestanost otkaza vodova i dužinu ogranaka. Ne gubeći na jednostavnosti metode za pozicioniranje indikatora kvarova, predložena je modifikacija kriterijumske funkcije kako bi se uzela u obzir učestanost otkaza vodova i dužina ogranaka. Poređenje ovih kriterijumskih funkcija izvršeno je na primjeru jedne realne distributivne mreže sa područja opštine Banja Luka preko standardnih pokazatelja pouzdanosti, kumulativnog vremena trajanja prekida napajanja jednog potrošača i neisporučene električne energije. Ustanovljeno je da se uvažavanjem učestanosti otkaza vodova i dužine ogranaka u kriterijumsku funkciju, može smanjiti kumulativno vrijeme trajanja prekida napajanja jednog potrošača i neisporučena električna energija i od desetak procenata.

## ZAHVALNICA

Rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke i tehnologije Republike Srpske u okviru projekta INGRID.

- [1] N. Rajaković i D. Tasić, Distributivne i industrijske mreže, drugo izdanje, Akademska misao, Beograd, 2008.
- [2] G. Morales-España, J. Mora-Flórez and H. Vargas-Torres, "Elimination of multiple estimation for fault location in radial power systems by using fundamental single-end measurements," IEEE Trans. Power Del, vol. 24, pp. 1382 - 1389, June 2009.
- [3] J. Teng; W. Huang; S. Luan, "Automatic and fast faulted line-section location method for distribution systems based on fault indicators," IEEE Trans. Power Syst, vol. 29, no. 4, pp. 1653 - 1662, July 2014.
- [4] H. Falaghi, M.-R. Haghifam and M. R. Osouli Tabrizi, "Fault Indicators Effects on Distribution Reliability Indices," CIRED 2005 - 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Turin, June 2005.
- [5] D.J. Krajinak, "Faulted circuit indicators and system reliability," IEEE Rural Electric Power Conference, pp. A4/1-A4/4, Kentucky, USA, May 2000.
- [6] F.M. Angerer, "New developments in Faulted Circuit Indicators help utilities reduce cost and improve service," IEEE Rural Electric Power Conference, pp. B4-B4/3, Charleston, South Carolina, USA, April 2008.
- [7] D. M. B. S. de Souza, A. F. de Assis, I. N. da Silva and W. F. Usida, "Efficient fuzzy approach for allocating fault indicators in power distribution lines," IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, pp.1-6, August 2008.
- [8] D. M. B. S. de Souza, I. N. da Silva, V. Ziolkowski and R. A. Flauzino, "Efficient allocation of fault indicators in distribution circuits using fuzzy logic," IEEE Power & Energy Society General Meeting, pp. 1-6, Calgary, Alberta Canada, July 2009.
- [9] W. F. Usida, D.V. Coury, R.A. Flauzino and I.N.da Silva, "Efficient Placement of Fault Indicators in an Actual Distribution System Using Evolutionary Computing," IEEE Trans. Power Syst, vol. 27, no. 4, pp. 1841 - 1849, Nov. 2014.
- [10] Ž. Popović, S. Knežević and B. Brbaklić, "Optimal number, type and location of remotely controlled and supervised devices in distribution networks," IEEE PowerTech, Eindhoven, pp. 1-6, June-July 2015.
- [11] C. Y. Ho, T.E. Lee and C.H. Lin, "Optimal Placement of Fault Indicators Using the Immune Algorithm," IEEE Trans. Power Syst, vol. 26, pp. 38 - 45, Feb. 2011.
- [12] P. Mršić, Đ. Lekić, Č. Zeljković, "Demonstracija upotrebe lokatora kvarova u distributivnoj mreži," Naučno-stručni simpozijum Energetska efikasnost - ENEF, str. 52-57, Banja Luka, Septembar 2015.
- [13] RERS [Regulatorna komisija za energetiku Republike Srpske], „Tarife,” <http://www.reers.ba/taxonomy/term/9>.

## ABSTRACT

This paper presents a method for positioning of fault passage indicators in medium voltage distribution networks in order to enhance the customer reliability indices. The specifics of network topology, the non-uniform failure rates of the lines as well as the number and power demand of the customers are taken into account in the objective function to be minimized. The fault passage indicators are positioned along the so called main feeder which is determined by the criterion of the greatest distance from the point of supply. The method is verified by using a real distribution network from the area of Banja Luka.

## POSITIONING OF FAULT PASSAGE INDICATORS IN OVERHEAD DISTRIBUTION NETWORKS BY USING THE SEARCH METHOD

Predrag Mršić and Čedomir Zeljković