

Rekonfiguracija distributivne mreže primenom metode pomerajućeg registra otvorenih prekidača

Distribution Network Reconfiguration Using the Open Switch Moving Register Method

Darko Šošić, Tomislav Rajić, Branko Stojanović

Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija

Rezime – Rekonfiguracija distributivne mreže je proces promene statusa pojedinih rasklopnih uređaja u cilju postizanja boljih radnih uslova distributivne mreže. Poboljšanje karakteristika može da se odnosi na kraći ili duži vremenski period. Jedan od najčešćih ciljeva kod problema promene konfiguracije distributivne mreže je smanjivanje gubitaka aktivne snage. U ovom radu će se rešavanju problema rekonfiguracije distributivne mreže pristupiti primenom metode pomerajućeg registra otvorenih prekidača. Glavna ideja metode je da se normalno otvorene grane postepeno zatvaraju, pri čemu je neophodno otvoriti jednu normalno zatvorenu granu iz formirane petlje u cilju održavanja radijalne strukture mreže. Zbog habanja rasklopne opreme i njenog ograničenog životnog veka nije poželjno vršiti promenu konfiguracije mreže za svaki vremenski trenutak. U ovom radu će se razmatrati postizanje najekonomičnije konfiguracije distributivne mreže na mesečnom nivou.

Ključne reči – distributivne mreže, rekonfiguracija, heuristički pristup

Abstract – Reconfiguration of the distribution network is a process of changing the status of individual switch equipment in order to achieve better operating conditions of the distribution network. Performance improvement may relate to a shorter or longer period of time. One of the most common goals in the problem of changing the configuration of the distribution network is to reduce the losses of active power. In this paper, the problem of reconfiguration of the distribution network will be solved by applying the method of moving register of open switches. The main idea of the method is to gradually close normally open branches, whereby it is necessary to open one normally closed branch from the formed loop in order to maintain the radial structure of the network. Due to the wear of the switchgear and its limited-service life, it is not desirable to change the network configuration for each time. This paper will consider achieving the most economical distribution network configuration on a monthly basis.

Index Terms – distribution networks, reconfiguration, heuristic approach

I UVOD

Rekonfiguracija distributivne mreže je proces promene statusa pojedinih rasklopnih uređaja, najčešće u cilju smanjivanja gubitaka. Gubici aktivne snage i energije u distributivnim mrežama su izraženiji u odnosu na gubitke u prenosnom sistemu. Ovo je direktna posledica proticanja struja većih amplituda preko grana distributivne mreže. Distributivna mreža učestvuje sa više od 10% u ukupnim gubicima aktivne snage koji su prisutni u celom elektroenergetskom sistemu. Sa druge strane gubici aktivne snage i energije su u neposrednoj vezi sa novčanim troškovima i zbog toga im se pridaje najveća pažnja. Postoji nekoliko problema i ograničenja sa kojima se inženjeri susreću u praksi prilikom odabira najpovoljnije konfiguracije mreže. Neophodno je očuvati radijalnu strukturu distributivne mreže, prvenstveno zbog jednostavnije zaštite distributivnog sistema. Sa druge strane moraju se zadovoljiti dozvoljeni padovi napona i pogonska ograničenja elemenata mreže [1].

Problem rekonfiguracije distributivne mreže svrstava se u mešoviti celobrojno/binarni nelinearni ne diferencijalni optimizacioni problem. Umesto klasičnih metoda optimizacije [2–4] predložen je niz heurističkih metoda [5–7]. Većina heurističkih metoda brzo pronalazi rešenje tako da ih je moguće primeniti u okviru automatizacije distributivnih mreža u realnom vremenu. U treću grupu metoda za rešavanje ovog problema spadaju meta-heurističke metode optimizacije, kao što su algoritam kolonije mrava [8], roj čestica [9], genetički algoritam [10], i mnogi drugi. Pored standardnih optimizacionih metoda koje uglavnom favorizuju jedan kriterijum u novije vreme počeli su da se pojavljuju i radovi u kojima je uporedo posmatrano više kriterijuma [11–16].

Iako optimizacione metode pružaju velike mogućnosti u pogledu poboljšavanja karakteristika distributivne mreže i uvažavanja najrazličitijih uslova u mreži njihov glavni nedostatak predstavlja brzina izvršavanja (konvergencije) algoritma. Za neke jednostavnije mreže sa manjim brojem normalno otvorenih grana, a samim tim i manjim brojem potencijalnih petlji, vreme izvršavanja meta-heurističkih algoritama se kreće u opsegu od nekoliko minuta do dvadesetak minuta. Brzina konvergencije u velikoj meri zavisi i od složenosti i robusnosti samog optimizacionog algoritma. Sa druge strane, kada postoji veliki

broj mogućih petlji problem se dosta usložnjava, pri čemu pojedine metode uopšte nisu u stanju da nađu izvodljivo rešenje.

U ovom radu razmatraće se metoda koja se zasniva na pomeranju registra otvorenih prekidača, a koja je izložena u [17]. U navedenom radu je razmatrano samo jedno stanje potrošnje, dok će se u ovom radu razmatrati primena te metode na vremenski horizont od jednog meseca uz ograničeni broj prekidačkih operacija. Glavna prednost ove metode je u njenoj jednostavnosti i brzini. U [17] je pokazano da za jednostavnije mreže ova metoda nalazi globalni optimum, pošto je on poznat, a za mreže sa većim brojem petlji nalazi konfiguraciju koja je dovoljno bliska najboljoj konfiguraciji koja se može naći u literaturi.

Posle uvodnog poglavlja u kome je izvršen kratak pregled literature i izložena glavna ideja koja će se obrađivati u ovom radu, u drugom poglavlju je prikazana formulacija problema rekonfiguracije distributivne mreže. U trećem delu je detaljno objašnjena korišćena heuristička metoda, dok su u četvrtom delu prikazani rezultati i dalje smernice za istraživanje. Na kraju u petom delu je dat zaključak rada.

II FORMULACIJA PROBLEMA

Generalno gledano rekonfiguracija distributivne mreže predstavlja celobrojni nelinearni optimizacioni problem. U najvećem broju slučajeva cilj pronalazanja optimalne konfiguracije distributivne mreže je smanjivanje gubitaka aktivne snage pošto su oni direktno proporcionalni gubitku novca sa kojim se suočava svako distributivno preduzeće. Gubici aktivne snage se mogu odrediti pomoću sledećeg izraza:

$$P_{\gamma} = \sum_{q=1}^{N_b} r_q \cdot |J_q|^2, \quad (1)$$

gde je r_q aktivna otpornost grane q , J_q struja koja teče po grani q , P_{γ} ukupni gubici aktivne snage u distributivnoj mreži, dok je sa N_b označen ukupan broj grana radijalne mreže.

Primenom algoritma napred nazad [18] zagarantovano je poštovanje prvog i drugog Kirhofovog zakona, tj. da je zbir struja koje se susiču u jedan čvor jednak nuli i da je pad napona po zatvorenoj konturi jednak nuli. Pored ovih ograničenja neophodno je zadovoljiti i tehnička ograničenja koja garantuju neometan rad distributivne mreže [1]. Pod ovim se misli da napon svih čvorova u svakom trenutku vremena mora da se nalazi u dozvoljenim granicama, odnosno:

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad (2)$$

gde su sa V_{\min} i V_{\max} označena donja i gornja granična vrednost modula napona na čvoru distributivne mreže, dok V_i označava napon čvora i . Drugo tehničko ograničenje koje će se razmatrati je maksimalno opterećenje pojedinačnih grana distributivne mreže, tj. potrebno je obezbediti da struje (snage) koje protiču preko komponenti distributivne mreže budu u granicama koje je definisao proizvođač tih komponenti. Ovo ograničenje je moguće prikazati pomoću sledećeg izraza:

$$|J_i| \leq J_{i,\max} \vee S_i \leq S_{i,\max} \quad (3)$$

gde $J_{i,\max}$ predstavlja maksimalnu struju koja može da protekne preko i -te grane, J_i je struja koja protiče preko i -te grane, sa

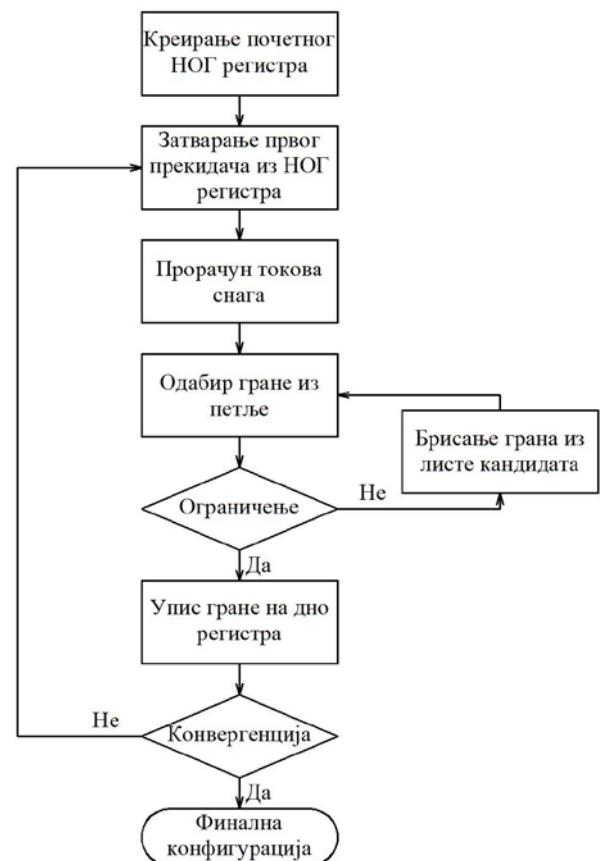
$S_{i,\max}$ je označena maksimalna snaga koja može da protekne preko i -te grane, dok je sa S_i označena snaga koja protiče preko i -te grane.

Dodatni uslov koji je potrebno ispoštovati prilikom promene rekonfiguracije distributivne mreže je očuvanje radijalne strukture mreže. Jedan od mogućih načina za proveru kriterijuma radijalnosti je opisan u radu [19].

Za razliku od meta-heurističkih metoda optimizacije kod kojih su korišćene dve vrste kodiranja, binarno i celobrojno [20,21], u ovom heurističkom pristupu zbog promene topologije mreže grana koja će se otvoriti odnosno zatvoriti se kodira pomoću svojih koordinata. Drugim rečima, čvorovi koji ograničavaju neku deonicu distributivne mreže predstavljaju koordinate te grane.

III METODA PRORAČUNA

Metoda koja će se prikazati u nastavku teksta polazi od pretpostavke da će otvaranje grane unutar posmatrane petlje preko koje protiče najmanje opterećenje prouzrokovati najmanje poremećaja u mreži. Za razliku od metode koja je prikazana u [22] gde se sa proračunom polazilo od kompletno upetljane mreže, tj. svi normalno otvoreni prekidači su zatvoreni, u ovom radu će se izložiti slučaj kada normalno otvoreni prekidači formiraju početni registar. Pošto gubici aktivne snage direktno zavise od opterećenja, najbolja konfiguracija se obično postiže otvaranjem grane sa najmanjim opterećenjem.



Slika 1. Blok dijagram predloženog algoritma

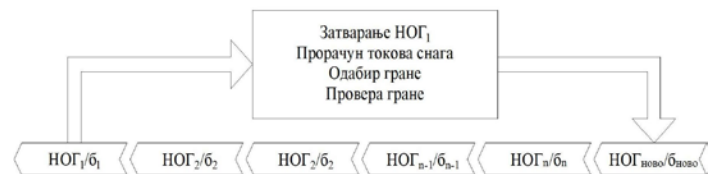
Na slici 1. je prikazan blok dijagram algoritma, a u nastavku teksta sledi detaljno objašnjenje metode.

- 1 Kreiranje početnog registra normalno otvorenih grana (NOG).
- 2 Zatvaranje prvog prekidača iz registra.
- 3 Pokretanje proračuna tokova snaga za upetljanu mrežu.
- 4 Odabir grane sa najmanjom strujom iz formirane petlje.
- 5 Provera da li su ograničenja narušena. Ako je neko ograničenje narušeno potrebno je uzeti prvu sledeću granu iz liste, u suprotnom je potrebno preći na sledeći korak.
- 6 Upis nove grane na dno registra.
- 7 Provera konvergencije. Ako su zadovoljeni kriterijumi zaustavljanja algoritma preći na sledeći korak, u suprotnom vratiti se na korak broj 2.
- 8 Ispis NOG registra.

U prvom koraku se formira registar normalno otvorenih grana koji može da se sastoji ili od grana koje su trenutno otvorene, ili od bilo koje druge kombinacije grana koje formiraju radialnu konfiguraciju mreže.

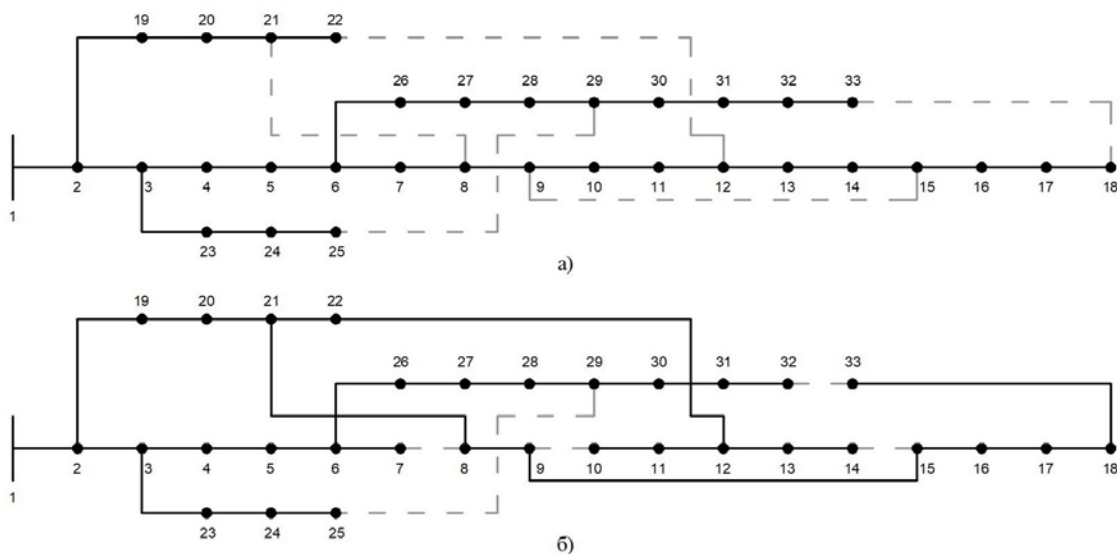
Nakon početnog formiranja NOG registra potrebno ga je unaprediti da bi se dobila bolja konfiguracija mreže. Ovaj proces obuhvata više koraka prikazanog algoritma. Da bi se neka grana ubacila u NOG registar potrebno je da su zadovoljena sva

ograničenja koja su definisana u drugom delu ovog rada. Ako je neko ograničenje narušeno potrebno je uzeti prvu sledeću granu sa najmanjim opterećenjem iz posmatrane petlje. Pošto je moguće otvoriti samo grane koje formiraju petlju nije neophodno vršiti proveru kriterijuma radialnosti. Prilikom ulaska grane u NOG registar proverava se da li je u pitanju ista grana koja je poslednja izbačena. U slučaju potvrdnog odgovora, brojač ulaska te grane u NOG registar se povećava za jedan, u suprotnom taj brojač se postavlja na nulu. Na slici 2 je prikazan proces unapređivanja NOG registra.



Slika 2. Proces unapređivanja NOG registra

Za kriterijum konvergencije se koriste vrednosti brojača ulaska grana u NOG registar. Naime, kada je najmanja vrednost brojača ulaska grane u NOG registar u trenutnom registru jednaka 2 potrebno je zaustaviti proračun. Ovo praktično znači da je do ponovnog otvaranja istih grana koje se nalaze u registru došlo najmanje dva puta.



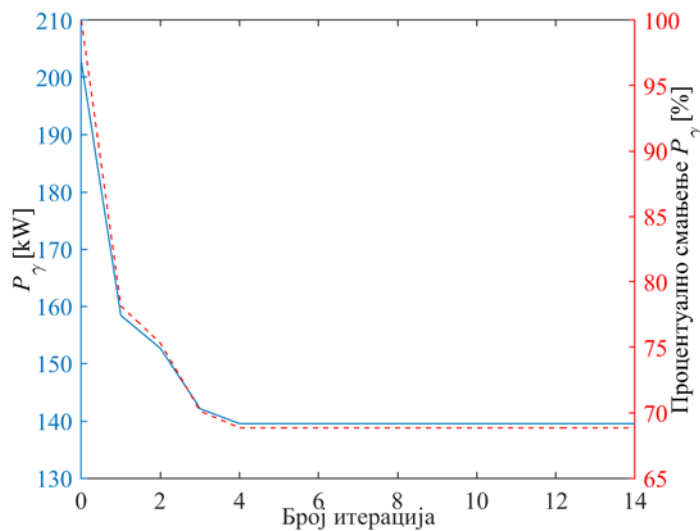
Slika 3. IEEE 33 test sistem: a) bazno stanje, b) optimalna konfiguracija

IV REZULTATI ANALIZA

Za testiranje predloženog algoritma korišćena je standardna simetrična IEEE 33 test distributivna mreža, čija je osnovna konfiguracija prikazana na slici 3a). Podaci koji su potrebni za proračune se mogu naći u [23]. Razmatrana test mreža ima ukupno 33 čvora i 5 petlji, pri čemu je ukupna potrošnja aktivne i reaktivne snage 3.715 MW i 2.3 MVar, respektivno. Za prikazano bazno stanje, slika 3a), pri naponu referentnog čvora 1 od $V_{ref} = 12.66$ kV gubici aktivne snage su 202.68 kW.

U prvom slučaju je razmatrano samo jedno stanje mreže, ono koje je dato u [23]. Na slici 4 je prikazana promena gubitaka aktivne snage sa promenom iteracija, plava kriva. Na istoj slici crvenom isprekidanom krivom je prikazano i procentualno smanjivanje gubitaka aktivne snage. Kao što se sa slike može uočiti za razmatranu mrežu, koja ima izuzetno nepovoljno početno stanje, posle procesa rekonfiguracije gubici aktivne snage će biti manji za nešto više od 30%. Pošto se ova test mreža koristi u velikom broju radova [24–27], poznat je globalni optimum koji je pronađen upotrebom ove metode. Na slici 3b)

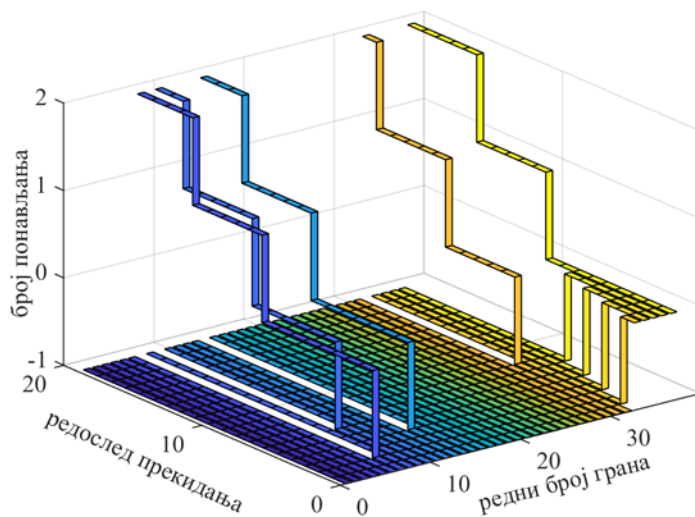
prikazana je finalna konfiguracija nakon završetka proračuna, a radi lakšeg praćenja koordinate isključenih grana su date u tabeli 1.



Slika 4. Konvergencija algoritma

Tabela 1. Otvorene grane

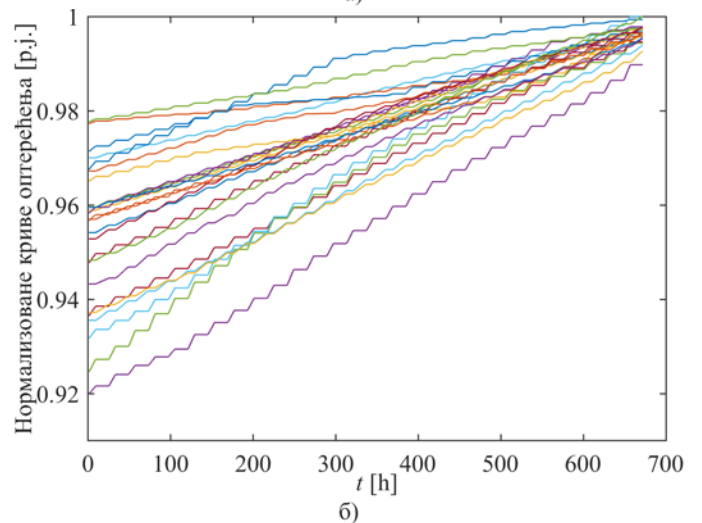
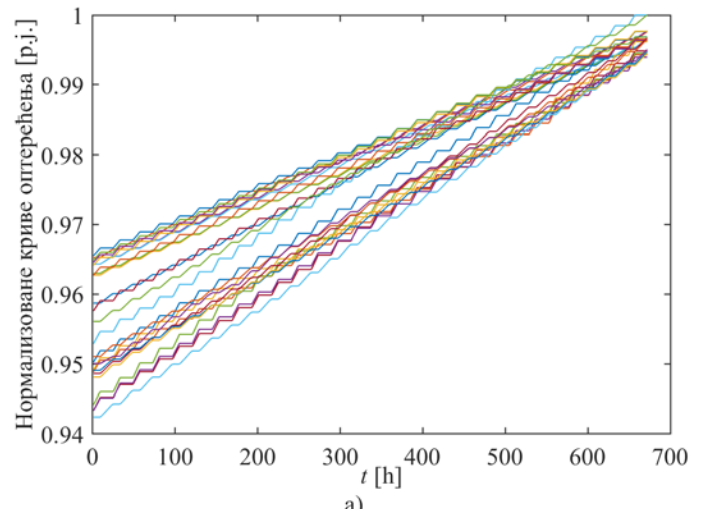
	Grana	
	Čvor 1	Čvor 2
1	25	29
2	7	8
3	14	15
4	9	10
5	32	33



Slika 5. Raspored prekidačkih operacija

Na slici 5 je prikazan redosled prekidačkih operacija. Svakoj grani je dodeljena jedna „traka“, pri čemu je početna vrednost brojača za grane kod kojih se rasklopna oprema nalazi u normalno zatvorenom položaju postavljena na vrednost od -1 . Kod povezanih vodova, kod kojih je rasklopna oprema u normalno otvorenom položaju, početna vrednost brojača je

postavljena na vrednost 0. Uključivanjem poveznog voda vrednost njegovog brojača će opasti na vrednost -1 samo ako se za formiranje radijalne strukture otvori neka druga grana iz upravo formirane petlje, u suprotnom vrednost tog brojača će se povećati za 1. Prema kriterijumima koji su opisani u 3. delu, rasklopna oprema koja se nalazi na grani preko koje protiče najmanja struja unutar formirane petlje će otvoriti svoje kontakte i tako obezbediti radijalnu konfiguraciju. Upravo otvorenoj grani će se brojač uvećati za 1. Postupak će se nastaviti sve do trenutka kada najmanja vrednosti brojača svih otvorenih grana bude na vrednosti 2. Ovo praktično znači da su se sve grane u proračunu zatvorile i ponovo otvorile najmanje dva puta uzastopno.

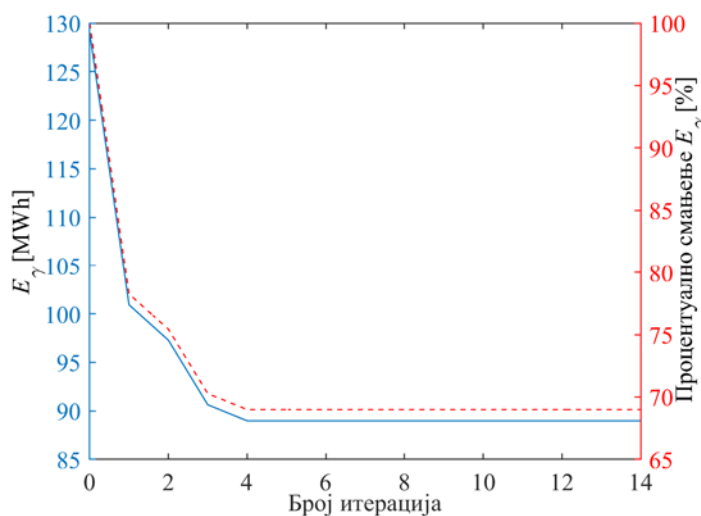


Slika 6. Normalizovane krive: a) aktivne, i b) reaktivne snage

Zbog zanemarljive ekonomske dobiti nije poželjno rekonfiguraciju distributivne mreže raditi za svaki vremenski interval pojedinačno. Pored zanemarljive dobiti bili bi prisutni i veliki troškovi usled potrebe za održavanjem rasklopne opreme pošto ona nije predviđena za tako čestu upotrebu. Stoga je poželjno tražiti najbolje uklopno stanje ali za veći vremenski horizont. Za potrebe ovog proračuna bilo je neophodno usvojiti hronološku promenu opterećenja svih čvorova posmatrane mreže. Na slikama 6a) i 6b) su prikazane normalizovane promene opterećenja aktivne i reaktivne snage za sve posmatrane

čvorove mreže.

Pošto je originalni algoritam predviđen za rad sa samo jednim vremenskim intervalom bilo je neophodno uneti neke izmene. U svakoj iteraciji algoritma je potrebno ponoviti proračune tokova snaga onoliko puta koliko ima vremenskih podataka. Iz ovih proračuna tokova snaga potrebno je zabeležiti struje po granama upravo formirane petlje za svaki vremenski trenutak. Nakon dobijanja kompletne slike potrebno je otvoriti rasklopnu opremu na onoj grani preko koje teče najmanja sumarna struja na celom vremenskom intervalu. Na slici 7. je prikazano smanjenje gubitaka električne energije kao posledica promene uklopnog stanja, kako u apsolutnim vrednostima (plava kriva) tako i u procentualnim vrednostima (crvena isprekidana kriva). Zbog velike podudarnosti korišćenih oblika normalizovanog dijagrama opterećenja dobijeni su identični rezultati kao kod prethodno analiziranog slučaja.



Slika 7. Konvergencija algoritma

Dalje istraživanje će se usmeriti na traženje najbolje predstave potrošnje distributivne mreže na nekom vremenskom horizontu. Cilj ovog istraživanja bi bilo ubrzavanje izloženog algoritma i njegova primene u meta-heurističkim metodama optimizacije radi procenjivanja najboljeg trenutka izvršenja promene uklopnog stanja radi postizanja najveće dobiti.

V ZAKLJUČAK

U radu je prikazan metod proračuna kojim se dobija optimalna konfiguracija sa više aspekata. Ograničenja koja se moraju zadovoljiti su dozvoljene vrednosti napona, opterećenje elemenata mreže koje propisuje proizvođač i radijalnost mreže. Metod koji je opisan pripada grupi heurističkih pristupa. Polazi se od pretpostavke da će otvaranje grane unutar posmatrane petlje preko koje protiče najmanje opterećenje prouzrokovati najmanje poremećaja u mreži. U prvom koraku se formira registar normalno otvorenih grana koji može da se sastoji ili od grana koje su trenutno otvorene, ili od bilo koje druge kombinacije grana koje formiraju radijalnu konfiguraciju mreže. Zatim se zatvara jedna od otvorenih grana i otvara grana sa najmanjom strujom ali tako da se ne dobije zatvorena petlja. Za kriterijum konvergencije se koriste vrednosti brojača ulaska grana u registar. Metoda se pokazuje kao brza i daje

zadovoljavajuće rezultate.

ZAHVALNICA

Autori zahvaljuju Ministarstvu za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije koje je omogućilo izradu ovog rada u okviru Projekta III 42009 Inteligentne energetske mreže.

LITERATURA

- [1] „Pravila o radu distributivnog sistema“, EPS Distribucija d.o.o Beograd. https://www.aers.rs/FILES/AktiAERS/AERSDajeSaglasnost/2017-07-19_Pravila%20o%20radu%20ED-ODS%20EPS%20distr.pdf [pristupljeno 20.02.2021]
- [2] López, J.C., Lavorato, M., Franco, J.F., Rider, M.J. Robust optimization applied to the reconfiguration of distribution systems with reliability constraints, *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol.10, Issue 4, pp. 917–927, 2016. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0558>
- [3] Quevedo, P.M., Contreras, J., Rider, J.M., Allahdadian, J. Contingency Assessment and Network Reconfiguration in Distribution Grids Including Wind Power and Energy Storage, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 6, Issue 4, pp. 1524–1533, 2015. <https://doi.org/10.1109/tste.2015.2453368>
- [4] Llorens-Iborra, F., Riquelme-Santos, J., Romero-Ramos, E. Mixed-integer linear programming model for solving reconfiguration problems in large-scale distribution systems, *Electric Power Systems Research*, Vol. 88, pp. 137–145, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.01.014>
- [5] Goswami, S.K., Basu, S.K. A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 7, (3), pp. 1484–1491, 1992. <https://doi.org/10.1109/61.141868>
- [6] Shirmohammadi, D., Hong, H.W. Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol 4, Issue 3, pp. 1492–1498, 1989. <https://doi.org/10.1109/61.25637>
- [7] Bayat, A. Uniform voltage distribution based constructive algorithm for optimal reconfiguration of electric distribution networks, *Electric Power Systems Research*, Vol. 4, pp. 146–155, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2013.06.010>
- [8] Wu, Y.–K., Lee, C.–Y., Liu, L.–C., Tsai, S.–H. Study of Reconfiguration for the Distribution System With Distributed Generators, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 25, Issue 3, pp. 1678–1685, 2010. <https://doi.org/10.1109/tpwr.2010.2046339>
- [9] Sayadi, F., Esmaili, S., Keynia, F. Feeder reconfiguration and capacitor allocation in the presence of non-linear loads using new P-PSO algorithm, *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 10, Issue 10, pp. 2316–2326, 2016.
- [10] Khorshid-Ghazani, B., Seyedi, H., Mohammadi-ivatloo, B., Zare, K., Shargh, S. Reconfiguration of distribution networks considering coordination of the protective devices, *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 11, Issue 1, pp. 82–92, 2017. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.0539>
- [11] Tavakoli Ghazi Jahani, M.A., Nazarian, P., Safari, A., Haghifam, M.R. Multi-objective optimization model for optimal reconfiguration of distribution networks with demand response services, *Sustainable Cities and Society*, Vol. 47, pp. 1–11, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101514>
- [12] Azizivahed, A., Narimani, H., Fathi, M., Naderi, E., Safarpour, H.R., Narimanie, R.M. Multi-objective dynamic distribution feeder reconfiguration in automated distribution systems, *Energy*, Vol. 147, pp. 896–914, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.111>
- [13] Azizivahed, A., Narimani, H., Naderi, E., Fathi, M., Safarpour, H.R., Narimanie, R.M. A hybrid evolutionary algorithm for secure multi-objective distribution feeder reconfiguration, *Energy*, Vol. 138, pp. 355–373, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.102>
- [14] Eldurssi, A.M., O'Connell, R.M. A Fast Nondominated Sorting Guided Genetic Algorithm for Multi-Objective Power Distribution System Reconfiguration Problem, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 30, Issue 2, pp. 593–601, 2015. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2014.2332953>
- [15] Asrari, A., Lotfifard, S., Payam, M.S. Pareto Dominance-Based Multiobjective Optimization Method for Distribution Network Reconfiguration, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 7, Issue 3, pp.

- 1401–1410, 2016. <https://doi.org/10.1109/tsg.2015.2468683>
- [16] Mahboubi-Moghaddam, E., Narimani, M.R., Khooban, M.H., Azizivaheda, A., Sharif, M.J. Multi-objective distribution feeder reconfiguration to improve transient stability, and minimize power loss and operation cost using an enhanced evolutionary algorithm at the presence of distributed generations, *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 76, pp. 35–43, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.09.007>
- [17] Zin, A.A.M., Ferdavani, A.K., Khairuddin, A.B., Naeini, M.M. Reconfiguration of Radial Electrical Distribution Network Through Minimum-Current Circular-Updating-Mechanism Method, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 27, Issue 2, pp. 967-974, 2012. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2011.2174258>
- [18] Shirmohammadi, D., Hong, H.W., Semlyen, A., Luo, G.X. A Compensation-Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks, in Proc. *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 3, Issue: 2, pp. 370–376, 1988. <https://doi.org/10.1109/59.192932>
- [19] Šošić, D., Stefanov, P. Multi-objective optimal reconfiguration of distribution network, *Journal of Electrical Engineering-Elektrotechnicky Casopis*, Vol. 69, Issue 2, pp. 128–137, 2018. <https://doi.org/10.2478/jee-2018-0016>
- [20] Huang, Y.–C. Enhanced genetic algorithm–based fuzzy multi–objective approach to distribution network reconfiguration, in Proc. *IEEE Proceedings–Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 149, Issue 5, pp. 615–620, 2002.
- [21] Šošić, D., Stefanov, P. Reconfiguration of distribution system with distributed generation using an adaptive loop approach, *Journal of Electrical Engineering-Elektrotechnicky Casopis*, Vol. 70, Issue 5, pp. 345–357, 2019. <https://doi.org/10.2478/jee-2019-0066>
- [22] Shirmohammadi, D., Hong, H. W. Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, Issue 3, pp. 1492–1498, 1989. <https://doi.org/10.2478/jee-2019-0066>
- [23] Baran, M., Wu, F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, Issue 2, pp. 1401-1407, 1989. <https://doi.org/10.1109/61.25627>
- [24] Ahmadi, H., Martí, J.R. Minimum–loss network reconfiguration: A minimum spanning tree problem, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, Vol. 1, pp. 1–9, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2014.10.001>
- [25] Souza, S.S., Romero, R., Franco, J.F. Artificial immune networks Copt-aiNet and Opt-aiNet applied to the reconfiguration problem of radial electrical distribution systems, *Electric Power Systems Research*, Vol. 119, pp. 304–312, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2014.10.012>
- [26] de Oliveira, L., de Oliveira, E., Gomes, F., Artificial Immune Systems applied to the reconfiguration of electrical power distribution networks for energy loss minimization, *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 56, pp. 64–74, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.11.008>
- [27] Duan, D.–L., Ling, X.–L., Wu, X.–Y., Zhong, B. Reconfiguration of distribution network for loss reduction and reliability improvement based on an enhanced genetic algorithm, *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 64, pp. 88–95, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.07.036>

AUTORI

dr Darko Šošić - docent, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, sosic@etf.rs

dr Tomislav Rajić - docent, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, rajic@etf.rs

mr Branko Stojanović, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet – stojanovic.branko@rocketmail.com.