

Implementacija algoritma kolonije mrava za optimalnu rekonfiguraciju distributivne mreže

Implementation of ant colony optimization algorithm for optimal reconfiguration of the distribution network

Predrag Mršić *, Nikola Rajaković **

* Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet; Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet

** Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Sažetak - U radu je analizirana mogućnost primjene algoritma kolonije mrava za rekonfiguraciju distributivne mreže u cilju minimizacije gubitaka aktivne snage. Algoritam kolonije mrava je metaheuristički metod baziran na populaciji koji se koristi za rješavanje različitih kombinatornih zadataka. Inspirisan je ponašanjem kolonije mrava u prirodi. Efikasnost algoritma je testirana na IEEE test mrežama sa 33 i 69 čvorova. Takođe, rezultati rekonfiguracije dobijeni algoritmom kolonije mrava su upoređeni sa rezultatima koje daju druge heurističke i metaheurističke metode.

Ključne reči - rekonfiguracija, distributivna mreža, algoritam kolonije mrava, minimizacija gubitaka aktivne snage

Abstract - The paper analyzes the possibility of application of Ant Colony Optimization (ACO) algorithm for reconfiguration of distribution network with the aim of active power minimization. ACO is a population-based meta-heuristic technique used to solve different combinatorial optimization problems. The search technique is inspired by the behaviour of ant colonies in nature. The efficiency of the proposed algorithm is demonstrated on IEEE 33-bus and IEEE 69-bus test distribution systems. Also, the results obtained by using ACO algorithm are compared to the results achievable by other heuristic and meta-heuristic algorithms.

Index Terms - reconfiguration, distribution network, ant colony optimization algorithm, active power minimization

I. UVOD

Dugi niz godina distributivne mreže su imale skromne mogućnosti za rekonfiguraciju zbog niskog stepena automatizacije. Zahvaljujući, prvenstveno ulaganju u osavremenjavanje i povećanje stepena automatizacije, omogućena je lakša rekonfiguracija distributivnih mreža i povećanje pouzdanosti, ekonomičnosti, efikasnosti i sigurnosti napajanja potrošača. Rekonfiguracija distributivne mreže se definiše kao promjena

topološke strukture distributivne mreže promjenom stanja otvoren / zatvoren sekcioni (engl. *sectionalizing switch*) i povezanih (engl. *tie switch*) prekidača u cilju postizanja optimalne konfiguracije. Optimalna konfiguracija distributivne mreže je ona konfiguracija koja zadovoljava korisnički specificiranu kriterijumsku funkciju uz uvažavanje svih tehničkih ograničenja. Pri formiranju kriterijuma optimalnosti teži se da on bude kvantitativan, mjerljiv. Ako se kriterijumu optimalnosti dodaju tehnička ograničenja dolazi se u opštem slučaju do nelinearnog dinamičkog optimizacionog zadatka [1], [2].

Postoji veliki broj razloga za promjenu konfiguracije distributivne mreže. Oni se mogu podijeliti u dvije velike grupe: poboljšanje uslova rada u normalnom pogonu i napajanje potrošača u havarijskim uslovima. U okviru poboljšanja uslova rada mreže u normalnom pogonu kao najznačajnije mogu se izdvojiti dvije grupe: smanjenje gubitaka aktivne snage i otklanjanje preopterećenja elemenata. Pored navedenih kriterijuma, u cilju poboljšanja rada mreže u normalnom pogonu kao kriterijumi za rekonfiguraciju mogu biti: poboljšanje pokazatelja pouzdanosti i sigurnosti mreže, balansiranje opterećenja, popravljavanje naponskog profila, itd [2].

Problem određivanja optimalne konfiguracije mreže je kompleksan, diskretan i nelinearan optimizacioni problem. Pored toga, ovaj problem se dodatno usložnjava uvažavanjem svih relevantnih tehničkih ograničenja. Prvi rad koji se bavi rekonfiguracijom distributivne mreže su objavili *Merlin* i *Buck* 1975. godine [3]. Predloženi metod se zasniva na pretraživanju svih mogućih konfiguracija mreže uz uvažavanje tehničkih ograničenja, te pronalasku konfiguracije koja ispunjava zadatu kriterijumsku funkciju. U opštem slučaju ako u mreži postoji n rasklopnih uređaja tada postoji 2^n konfiguracija mreže [4]. Međutim, većina tih konfiguracija nije dozvoljena jer nisu zadovoljeni osnovni tehnički uslovi kao što su radikalna konfiguracija i napajanje svih potrošača u mreži. Npr. za standardnu IEEE test mrežu sa 33 čvora postoji $1,3744 \cdot 10^{11}$ konfiguracija od kojih je samo 53957 dozvoljeno. Računanje tokova snaga i određivanje optimalne konfiguracije, posmatrajući samo dozvoljene konfiguracije, nije moguće za mreže sa većim

brojem čvorova čak i uz upotrebu najmoćnijih računara. Iz tog razloga razvijene su razne matematičke metode za rekonfiguraciju distributivnih mreža. U zavisnosti od matematičkog modela i primijenjene tehnike pretraživanja metode se mogu globalno podijeliti na: matematički optimizacione metode [5]–[7], heurističke metode [8]–[10] i metaheurističke metode [11]–[17].

Matematički optimizacione metode za rješavanje problema rekonfiguracije distributivne mreže koriste metode linearnog programiranja, nelinearnog programiranja, kvadratnog programiranja, dinamičkog programiranja, itd. Heurističke metode se baziraju na poznavanju fizike problema. Ove metode su najčešće korišćene metode za određivanje optimalne konfiguracije distributivne mreže zbog sposobnosti da relativno brzo generišu rješenje sa zadovoljavajućom tačnošću [1]. Metaheurističke metode su većinom iterativne metode koje su zasnovane na modelima inspirisanim prirodnim procesima, vještačkoj inteligenciji i stohastičkom pretraživanju. Koriste se za rješavanje nelinearnih optimizacionih problema velike dimenzionalnosti. Ove metode u pojedinim slučajevima ne garantuju pronalazak globalnog ekstrema nego se kao rješenje uzima najbolji lokalni ekstrem [26]. Iterativni proces započinje izborom proizvoljnog rješenja iz prostora mogućih rješenja. Nakon ovoga, uz niz pravila izbjegavaju se lokalni ekstremi i iz iteracije u iteraciju metoda konvergira ka globalnom ekstremu (optimumu). Prema *Blum*-u i *Roli*-ju metaheurističke metode se dijele u dvije kategorije [11]: metaheurističke metode zasnovane na jednom rješenju i metaheurističke metode zasnovane na populaciji.

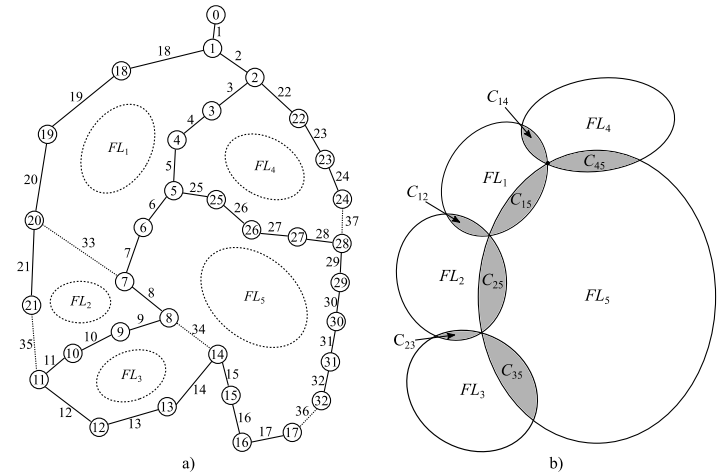
Metaheurističke metode zasnovane na jednom rješenju predstavljaju metaheuristike zasnovane na lokalnom pretraživanju prostora mogućih rješenja koje koriste različite mehanizme za izbjegavanje lokalnih ekstrema. Najpoznatije metaheurističke metode zasnovane na jednom rješenju koje se koriste za rješavanje problema rekonfiguracije distributivnih mreža su: simulirano kaljenje (engl. *Simulated Annealing* - SA) i tabu pretraživanje (engl. *Tabu Search* - TS).

Metaheurističke metode zasnovane na populaciji predstavljaju metaheuristike kod kojih su algoritmi pretraživanja prostora rješenja zasnovani na prirodnim procesima. Najpoznatije metode zasnovane na populaciji koje se koriste za rekonfiguraciju distributivnih mreža su: evolutivni algoritmi (genetski algoritmi i evolutivno programiranje) i algoritmi zasnovani na grupnoj inteligenciji skupa samoorganizujućih jedinki (metode mravljih kolonija, optimizacija rojem čestica, *harmony search* algoritmi i metode pčelinjih kolonija).

U ovom radu će biti izvršena rekonfiguracija distributivnih mreža koristeći algoritam kolonije mrava. U odnosu na slične algoritme koji se mogu naći u literaturi [18]–[22], u ovom radu je predložen drugačiji proračun poželjnosti isključenja grana. Poželjnost isključenja grana se zasniva na odnosu tokova snaga po granama u okviru fundamentalne petlje. Formula za proračun poželjnosti je takva da se za granu kojom teče najmanja snaga u okviru fundamentalne petlje dobija najveća poželjnost za isključenje. Kriterijumska funkcija po kojoj je izvršena optimalnu rekonfiguraciju distributivnih mreža je bazirana na minimizaciji gubitaka aktivne snage.

II. FORMULISANJE PROBLEMA REKONFIGURACIJE

Problem rekonfiguracije distributivne mreže se može svesti na zadatak određivanja prekidača u svakoj fundamentalnoj petlji koji treba biti isključen da bi se minimizovala objektivna funkcija. Fundamentalna petlja predstavlja petlju koja se dobija zatvaranjem jednog poveznog prekidača pod uslovom da se bilo koja dva čvora koja pripadaju fundamentalnoj petlji ne mogu povezati zatvaranjem nekog drugog prekidača [25]. Npr. IEEE mreža sa 33 čvora ima pet fundamentalnih petlji koje se dobijaju zatvaranjem poveznih prekidača u granama 33, 34, 35, 36 i 37, slika 1a.



Slika 1. Fundamentalne petlje u IEEE test mreži sa 33 čvora.

Broj fundamentalnih petlji u jednoj mreži se može izračunati na osnovu broja grana i čvorova u mreži. Ako je L broj grana u nekoj proizvoljno odabranoj mreži, a N broj čvorova, broj fundamentalnih petlji se dobija iz sljedećeg izraza [25]:

$$FL = L - N + 1. \quad (1)$$

Posmatrajući petlje prikazane na slici 1a može se uočiti da određene grane pripadaju različitim petljama, pri tome jedna grana može figurisati u najviše dvije fundamentalne petlje. Grane koje figurišu u dvije fundamentalne petlje nazivaju se *zajedničke grane*. Zajedničke grane dvije fundamentalne petlje formiraju *vektor zajedničkih grana*. Za sagledavanje svih vektora zajedničkih grana poželjno je formirati *Venn-ov dijagram*. *Venn-ov dijagram* za IEEE test mrežu sa 33 čvora je prikazan na slici 1b. Vektore zajedničkih grana ćemo označiti sa C , a u indeksu ćemo dodati dva broja koja će nositi informaciju od koji fundamentalnih petlji je dobijen vektor. Na primjer, vektor zajedničkih grana fundamentalnih petlji FL_2 i FL_3 je [18]:

$$C_{23} = [9 \ 10 \ 11]. \quad (2)$$

Vektori zajedničkih grana su bitni za normalno funkcionisanje mreže. Naime, zajedničke grane za fundamentalne petlje FL_1 i FL_4 su 3, 4 i 5. Ako isključimo prekidač u trećoj grani koja pripada prvoj fundamentalnoj petlji (FL_1) i prekidač u petoj grani koja pripada četvrtoj fundamentalnoj petlji (FL_4) izolovali smo čvorove 4 i 5. Dakle, nije dozvoljeno isključenje dvije grane koje pripadaju jednom vektoru zajedničkih grana jer to dovodi do

izolovanja najmanje jednog čvora u mreži. Može se postaviti pitanje da li se izborom samo jednog prekidača iz vektora zajedničkih grana, mreža može dovesti u nedozvoljeno radno stanje. Na primjer, ako se isključi grana koja pripada vektoru zajedničkih grana C_{14} , zatim grana koja pripada vektoru zajedničkih grana C_{15} i grana koja pripada vektoru zajedničkih grana C_{45} u najboljem slučaju se izoluje samo čvor 5. Dakle, uslov da može biti samo jedna grana isključena, koja pripada vektoru zajedničkih grana, nije dovoljan da se obezbijedi dozvoljena konfiguracija mreže. Pri čemu se pod dozvoljenom konfiguracijom mreže podrazumijeva radikalna konfiguracija mreže u kojoj nijedan čvor nije izolovan. Ako se ponovo vratimo na čvor 5, on neće biti izolovan ako nijedna grana bar jednog vektora zajedničkih grana ne bude isključena. Da bi se jednostavnije provjerilo da li će određena kombinacija dovesti do izolacije pojedinih čvorova formiraju se *grupe zabranjenih vektora* [18]. Za onemogućavanje formiranja konfiguracije u kojoj bi, na primjer, čvor 5 bio izolovan formira se grupa zabranjenih vektora u oznaci PGV i dodaje indeks čvora čija izolacija se sprečava:

$$PGV_5 = [C_{14} \ C_{15} \ C_{45}]. \quad (3)$$

Na osnovu prethodno izloženog mogu se formirati tri pravila koja će osigurati da je kombinacija isključenih grana koja je predložena, fizički ostvariva [18]:

- 1) Tačno određene grane se mogu nalaziti na tačno određenim pozicijama u kombinaciji isključenih grana, odnosno n -ti član kombinacije isključenih grana mora pripadati n -toj fundamentalnoj petlji.
- 2) Samo jedna grana vektora zajedničkih grana može biti isključena.
- 3) Broj grana koje pripadaju različitim vektorima zajedničkih grana mora biti manji od broja vektora zajedničkih grana koji formiraju grupu zabranjenih vektora.

Rekonfiguracija distributivnih mreža se vrši iz različitih razloga. Najčešći razlozi za rekonfiguraciju distributivnih mreža su [4]: minimizacija gubitaka aktivne snage, balansiranje opterećenja napojnih transformatora, balansiranje opterećenja izvoda, popravljavanje naponskog profila u mreži i povećanje pouzdanosti napajanja potrošača. U ovom radu će biti izvršena rekonfiguracija distributivnih mreža sa ciljem minimizacije gubitaka aktivne snage. Objektivna funkcija je definisana sljedećim izrazom:

$$P_g = \sum_{i=1}^{N_{izv}} \sum_{j \in \alpha_i} r_{ij} I_{ij}^2, \quad (4)$$

gdje je N_{izv} ukupan broj izvoda, α_i skup indeksa grana koje pripadaju izvodu i , r_{ij} rezistansa grane j koja pripada izvodu i , I_{ij} moduo struje koja teče granom j izvoda i .

III. REKONFIGURACIJA METODOM KOLONIJE MRAVA

Metoda mravljih kolonija je metaheuristička metoda koja je zasnovana na populaciji. Metodu je razvio *Marco Dorigo* u svojoj doktorskoj disertaciji 1992. godine. Inspiracija za metodu potiče od kretanja mrava u prirodi i njihovoj sposobnosti da nađu najkraći put između gnijezda i izvora hrane [23].

A. Optimizacija kolonijom mrava

Pri rješavanju problema algoritmom kolonije mrava kao agenti koriste se virtuelni mravi. U odnosu na mrave u prirodi virtuelnim mravima su dodate određene sposobnost kako bi se omogućilo rješavanje kompleksnih optimizacionih problema. Glavne karakteristike virtuelnih mrava su [20]:

- 1) *Kolonija kooperativnih pojedinaca*: virtuelni mravi, kao i pravi, saraduju kako bi pronašli „dobro” rješenje, dijeleći informacije o okolini.
- 2) *Feromonski trag i stigmetrija*: realni mravi mijenjaju okolinu ostavljajući za sobom trag feromona, dok virtuelni mravi mijenjaju numeričke vrijednosti lokacija koje posjećuju. U algoritmima kolonije mrava, kao i kod realnih mrava, lokalni tragovi (numeričke vrijednosti) su jedina komunikacija između jedinki. Takođe, u algoritmima kolonije mrava se dodaje isparavanje feromona, koje je slično pravom isparavanju feromona kod realnih mrava. Ovo omogućava da kolonija „zaboravlja” svoju prošlost i pretraži nove smjerove bez uticaja prethodnih odluka.
- 3) *Traženje najkraćeg puta i lokalno kretanje*: Virtuelni i pravi mravi dijele isti zadatak, naći najkraći put od gnijezda do izvora hrane.
- 4) *Stohastičke odluke*: virtuelni mravi odlučuju na koju će stranu ići na osnovu vjerovatnoće koja se bazira na lokalnim informacijama okoline i koncentraciji feromona.
- 5) *Diskretan svijet*: virtuelni mravi se kreću u diskretnom svijetu, tj. oni se mogu nalaziti na tačno određenim lokacijama u okolini.
- 6) *Sposobnost pamćenja*: virtuelni mravi imaju sposobnost pamćenja prošlog poteza.
- 7) *Koncentracija feromona zavisi od kvaliteta rješenja*: koncentracija feromona koju polažu virtuelni mravi na rutu kojim su prošli zavisi od kvaliteta te rute.
- 8) *Dodatne sposobnosti*: kako bi se povećala efikasnost algoritama, virtuelni mravi se mogu obogatiti dodatnim mogućnostima kao što su predviđanje koraka unaprijed, lokalna optimizacija, itd.

Važna odlika virtuelnih mrava u odnosu na prave mrave je sposobnost da se najbolje rješenje održava od strane kolonije, tako da razlika između trenutno najboljeg rješenja i globalnog rješenja zadržava na istoj vrijednosti ili smanjuje iz iteracije u iteraciju.

B. Primjena metode mravljih kolonija za rekonfiguraciju distributivnih mreža

Prvi problem za čije rješavanje je korišćen algoritam razvijen na bazi kolektivnog ponašanja mrava je problem trgovačkog putnika [24]. Problem trgovačkog putnika se ogleda u određivanju najkraćeg puta kojim trgovački putnik treba da se kreće tako da posjeti sve navedene gradove samo jednom. U slučaju distributivne mreže, može se primijeniti slična procedura, tako što gradovi predstavljaju čvorove mreže, putevi koji povezuju gradove, grane mreže, a izabrana ruta konfiguraciju mreže [19]. Pored ovog postoji još jedan, mnogo češće korišćen, metod za zapisivanje konfiguracije mreže. Biraju se grane koje moraju biti isključene. Odnosno, mrav bira kombinaciju grana iz fundamentalnih petlji koje će biti isključene, tako da n -ta grana

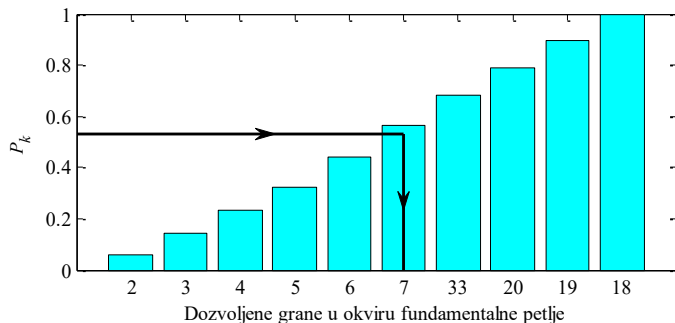
pripada n -toj fundamentalnoj petlji [18], [21], [22]. U ovom radu će se koristiti sistem u kome se biraju grane koje trebaju biti isključene. Prelazak mrava sa jedne grane na drugu u okviru fundamentalne petlje vrši se na osnovu vjerovatnoće. Prvo se računa vjerovatnoća prelaza mrava sa trenutne grane na ostale grane u okviru fundamentalne petlje. Vjerovatnoća prelaza mrava sa grane i na granu j data je izrazom:

$$P_k(i, j) = \frac{[\tau_j]^\alpha [\eta_j]^\beta}{\sum_{\mu \in M_k} [\tau_\mu]^\alpha [\eta_\mu]^\beta}, \quad (5)$$

gdje je τ_j koncentracija feromona na j -toj grani, η_j poželjnost isključenja j -te grane, M_k skup grana u okviru fundamentalne petlje na koje mrav može preći i α, β težinski koeficijenti. Nakon proračuna vjerovatnoća prelaska mrava sa trenutne grane na ostale vrši se izbor grane na koju će mrav preći prema sljedećem izrazu:

$$L_k = \begin{cases} \arg \max \{P_k\} & \text{za } q \leq q_0 \\ J & \text{za } q > q_0 \end{cases}, \quad (6)$$

gdje je q slučajno izvučen broj iz uniformne raspodjele, q_0 parametar iz opsega $0 < q_0 < 1$ i J slučajno izabrana grana iz skupa M_k prema raspodjeli P_k . Za izbor grane J formira se kumulativna suma prelazaka sa trenutne grane na ostale grana u okviru dozvoljenih prelazaka jedne fundamentalne petlje. Zatim se izvlači broj iz uniformne raspodjele i određuje odgovarajuća grana. Praktično, sa vjerovatnoćom q_0 mrav će birati najbolje trenutno rješenje, a sa vjerovatnoćom $(1-q_0)$ će istraživati ostale grane u okviru fundamentalne petlje [22]. Primjer određivanja grane J na koju će preći mrav je prikazan na slici 3. Neka su dozvoljene grane 2, 3, 4, 5, 6, 7, 33, 20, 19 i 18 koje mrav može izabrati u okviru fundamentalne petlje. Shodno vjerovatnoćama izbora grana formira se kumulativna suma tih vjerovatnoća, kao što je prikazano na slici 3. Izvlačenjem iz uniformne raspodjele npr. broja 0,53, povlači se horizontalna linija koja prvo presjeca stubac koji odgovara grani 7, te mrav bira prelazak na granu 7 (ili ostaje na grani 7 ako je već tu bio).



Slika 3. Primjer izbora grane J .

Procedura prelaska mrava sa jedne na drugu granu u okviru dozvoljenih grana jedne fundamentalne petlje se ponavlja za sve fundamentalne petlje čime se završava izbor konfiguracije distributivne mreže jednog mrava. Ponavljajući proceduru za svakog mrava vrši se izbor seta konfiguracija.

C. Ažuriranje feromona

Nakon izbora seta konfiguracija distributivne mreže vrši se ažuriranje feromona za svaku fundamentalnu petlju. Koncentracija feromona koja se dodaje na grane koje je izabrao neki od mrava zavisi od kvaliteta rješenja koje je taj mrav generisao. Takođe, pri ažuriranju feromona je uvaženo i isparavanje istog. Vrijednost feromona na grani k se ažurira na sljedeći način [21]:

$$\tau_k \leftarrow (1 - \rho)\tau_k + \sum_{n \in N_a} \rho \tau_{kn}, \quad (7)$$

gdje je τ_k trenutna koncentracija feromona na grani k , ρ koeficijent isparavanja feromona ($0 < \rho < 1$), τ_{kn} koncentracija feromona koju na k -tu granu ostavlja n -ti mrav koji je izabrao granu k i N_a skup mrava u koloniji koji su izabrali granu k u svom rješenju (konfiguraciji). Koncentracija feromona koju na k -tu granu ostavlja n -ti mrav je normalizovana:

$$\tau_{kn} = \frac{f(s_n)}{\sum_{s_i \in A} f(s_i)}, \quad (8)$$

gdje je $f(s_n)$ kvalitet rješenja koje je generisao n -ti mrav i A skup mrava u koloniji. Kvalitet rješenja koje je jedan mrav generisao zavisi od gubitaka aktivne snage [21]:

$$f(s_n) = \frac{2}{1 + e^{P_n^{gub}/2}}, \quad (9)$$

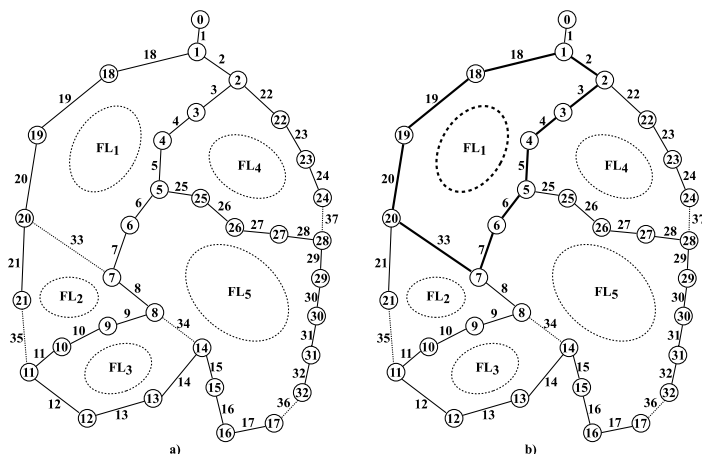
gdje su P_n^{gub} gubici aktivne snage za konfiguraciju koju je odabrao n -ti mrav.

D. Poželjnost isključenja grane (Desirability)

U algoritmima optimizacije kolonijom mrava poželjnost je obično obrnuto proporcionalna udaljenosti između čvorova. Za probleme rekonfiguracije distributivnih mreža poželjnost se može računati na više načina. Jedan od načina je na osnovu napona u čvorovima mreže [18], zatim na osnovu otpornosti grana [19] ili se jednostavno zanemari, uzimanjem da je koeficijent $\beta = 0$ [21], [22]. U ovom radu je predložen način za računanje poželjnosti isključenja grane koji se bazira na tokovima aktivnih snaga. Poželjnost se obično računa jednom u okviru svake iteracije za najbolje trenutno rješenje. Bez umanjenja opštosti procedure, ista će biti prikazana na primjeru IEEE mreže sa 33 čvora za prvu iteraciju. Početna konfiguracija IEEE mreže sa 33 čvora je prikazana na slici 4a. Poželjnost se računa za svaku fundamentalnu petlju posebno. Na primjer, ako računamo za prvu fundamentalnu petlju onda zatvorimo sve povezne prekidače u toj petlji, slika 4b, i izračunamo tokove snaga za tako formiranu mrežu. Na osnovu tokova snaga računa se poželjnost za svaku granu u okviru fundamentalne petlje. Poželjnost za isključenje j -te grane, koja pripada prvoj fundamentalnoj petlji, računa se na sljedeći način:

$$\eta_j = 1 - \frac{P_j}{\sum_{i \in FL_1} P_i}, \quad (10)$$

gdje je P_j aktivna snaga koja teče granom j .



Slika 4. Fundamentalne petlje IEEE mreže sa 33 čvora i ilustracija proračuna poželjnosti isključenja grana u prvoj fundamentalnoj petlji.

E. Kriterijum zaustavljanja

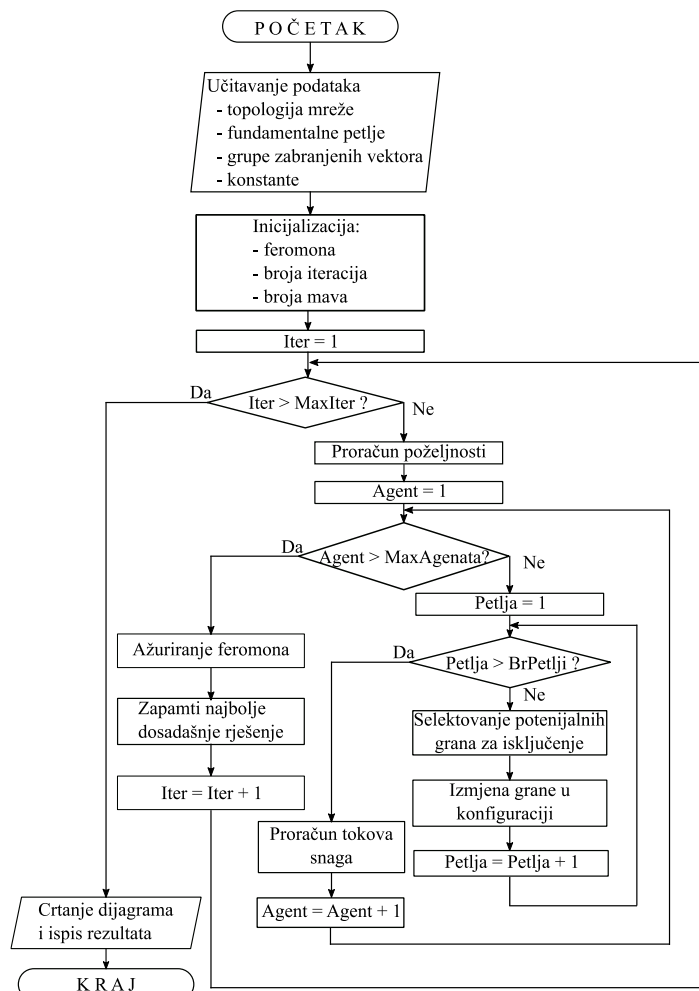
Zaustavljanje simulacije se obično vrši iz dva razloga. Ako se dostigne maksimalan unaprijed definisan broj iteracija ili ako svi agenti u okviru populacije biraju isto rješenje [18]. U ovom radu, kao kriterijum zaustavljanja koristi se maksimalan broj iteracija.

IV. ALGORITAM ZA REKONFIGURACIJU

Rekonfiguracija distributivnih mreža metodom algoritma kolonije mrava u ovom radu se vrši prema dijagramu toka prikazanom na slici 5. Prvo se vrši učitavanje podataka o mreži, kao što su topologija mreže, opterećenja priključena u čvorove, fundamentalne petlje, grupe zabranjenih vektora i početna konfiguracija mreže. Zatim se vrši inicijalizacija konstanti koje su potrebne za simulaciju. Inicijalizuje se početna vrijednost feromona na granama, koeficijent isparavanja feromona, vjerovatnoća izbora najboljeg rješenja, maksimalan broj iteracija, populacija mrava i težinski koeficijenti α i β . Nakon učitavanja parametara i podataka o mreži dolazi se do glavne petlje u kojoj svaki agent (mrav) bira svoj vektor grana koje će isključiti, dakle generiše radijalnu konfiguraciju. Kako bi se obezbijedilo da je konfiguracija moguća, tj. da svi čvorovi budu pod naponom, prelazak mrava sa jedne grane na drugu se vrši uz tri pravila data u II poglavlju ovog rada. Kada svaki od mrava izabere grane koje je potrebno isključiti vrši se proračun tokova snaga koristeći modifikovani *Newton-ov* metod. Na kraju kada svi mravi iz populacije izaberu grane koje je potrebno isključiti i kada se proračunaju tokovi snaga vrši se ažuriranje feromona i određivanje najboljeg rješenja koje je do tada generisano. Algoritam završava kada se dostigne maksimalan broj iteracija. Prije završetka računarskog programa vrši se ispis rezultata na ekran i crtanje dijagrama.

V. REZULTATI SIMULACIJA

Algoritam koji je izložen u ovom radu biće testiran na IEEE test mrežama sa 33 i 69 čvorova. Za mreže su prikazani gubici aktivne snage i profil napona prije i poslije rekonfiguracije. Pored pokazatelja rekonfiguracije koji se odnose na mrežu dat je i dijagram konvergencije algoritma za svaku od navedenih mreža.



Slika 5. Algoritam računarskog programa za rekonfiguraciju distributivne mreže metodom kolonije mrava.

A. Rekonfiguracija IEEE test mreže sa 33 čvora

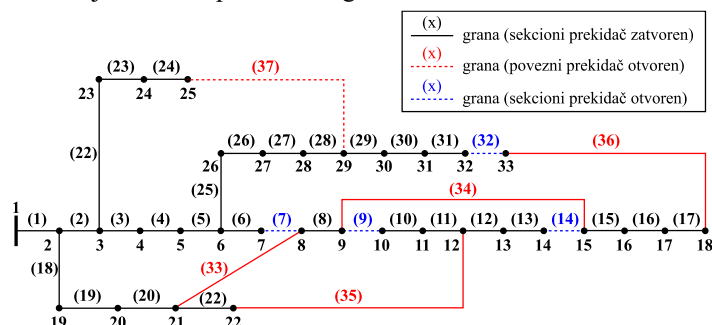
IEEE mreža sa 33 čvora sastoji se od četiri fidera koji preko 37 grana napajaju 32 potrošača ukupne snage 3,715 MW i 2,30 MVAR, dok je nominalni napon mreže 12,66 kV. U baznom stanju, stanje prije rekonfiguracije, isključeni su povezni prekidači u granama 33, 34, 35, 36 i 37. Gubici aktivne snage u tom slučaju iznose 202,68 kW. Osnovni parametri simulacije koji su korišćeni pri rekonfiguraciji ove mreže su dati u tabeli 1.

Tabela 1. Osnovni parametri simulacije

Veličina	Vrijednost
Maksimalan broj iteracija	30
Populacija agenata (mrava)	20
Početna vrijednost feromona na granama	0,5
α	1
β	3
ρ	0,08
q_0	0,6

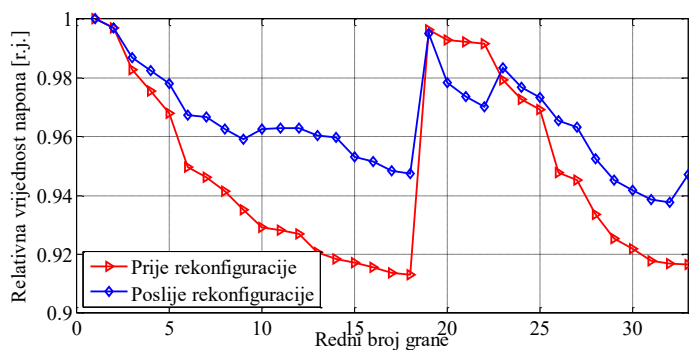
Poslije rekonfiguracije, gubici aktivne snage smanjuju se za 31,14 % i iznose 139,55 kW. Konfiguracija mreže se mijenja

tako što se zatvaraju povezni prekidači u granama 33, 34, 35 i 36, a otvaraju sekcioni prekidači u granama 7, 9, 14 i 32, slika 6.

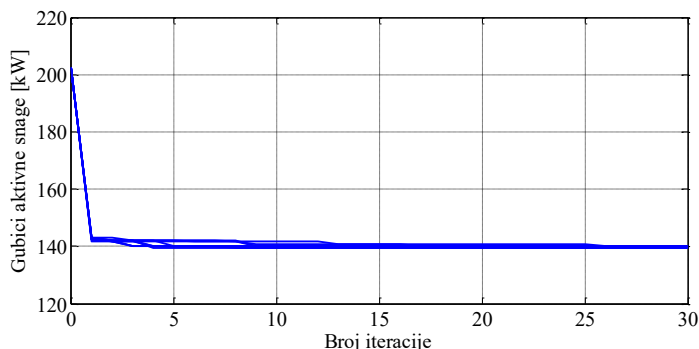


Slika 6. IEEE test mreža sa 33 čvora poslije rekonfiguracije.

Relativne vrijednosti napona prije i poslije rekonfiguracije prikazane su na slici 7. Prije rekonfiguracije najniža vrijednost napona u mreži je bila 0,9131 r.j., a nakon rekonfiguracije 0,9378 r.j. Na osnovu prikazane slike može se zaključiti da nakon rekonfiguracije, pored smanjenja gubitaka aktivne snage, dolazi i do popravljavanja naponskih prilika u mreži. Konvergencija algoritma, odnosno smanjenje ukupnih gubitaka aktivne snage u toku deset uzastopnih simulacija prikazana je na slici 8. Sa slike se može vidjeti da algoritam ne konvergira uvijek za isti broj iteracija zbog primjenjene stohastike pri izboru grane koja će biti isključena u okviru fundamentalne petlje.



Slika 7. Profil napona u IEEE mreži sa 33 čvora.

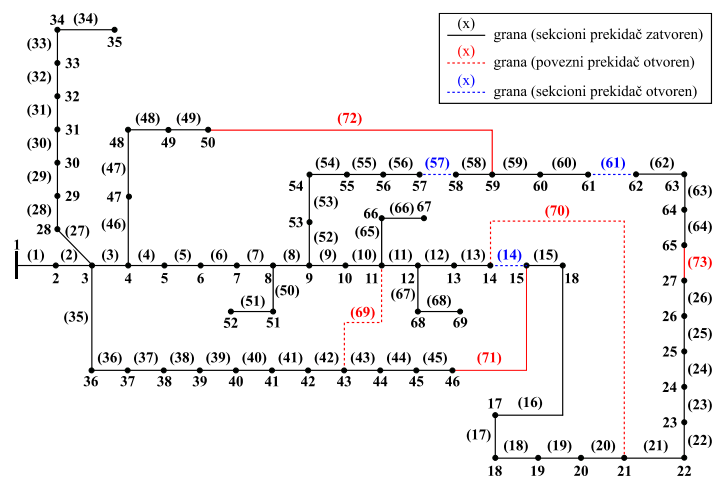


Slika 8. Promjena aktivne snage iz iteracije u iteraciju za IEEE test mrežu sa 33 čvora prilikom 10 uzastopnih simulacija.

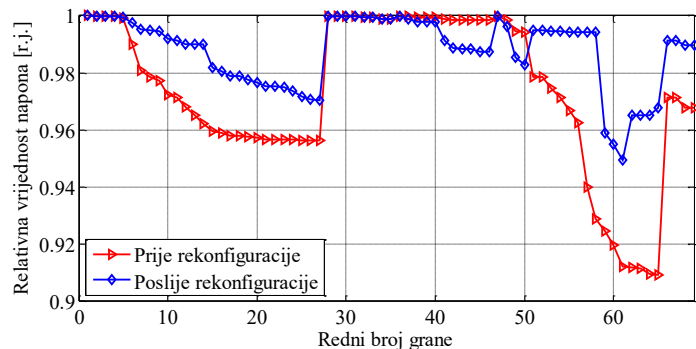
B. Rekonfiguracija IEEE test mreže sa 69 čvorova

Druga mreža na kojoj je testiran izloženi algoritam je IEEE mreža sa 69 čvorova, 73 grane, 68 sekcioni i 5 poveznih prekidača. Nominalni napon mreže je 12,66 kV, a ukupno opterećenje je 3,80 MW i 2,69 MVar. U odnosu na parametre

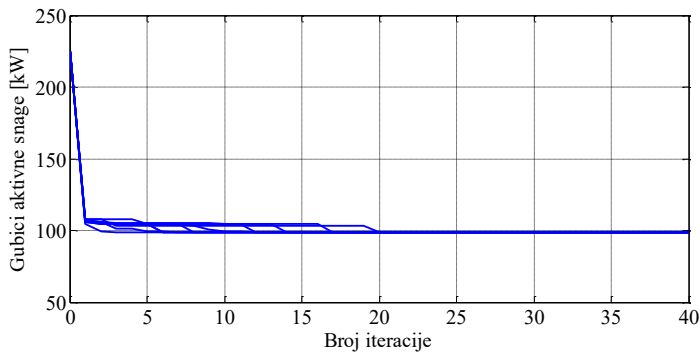
simulacije date u tabeli 1 jedino je broj iteracija povećan na 40. Optimalna konfiguracija mreže se dobija isključenjem sekcioni prekidača u granama 14, 57, 61 i uključenjem poveznih prekidača u granama 71, 72 i 73, slika 9. Profili napona prije i poslije rekonfiguracije su prikazani na slici 10. Najniža vrijednost napona prije rekonfiguracije je u čvoru 65 i iznosi 0,9090 r.j. Nakon rekonfiguracije se popravljaju naponske prilike u mreži, pa se najniža vrijednost napona javlja u čvoru 61 i iznosi 0,9495 r.j. Ukupni gubici aktivne snage prije rekonfiguracije su iznosili 225 kW, dok se poslije rekonfiguracije smanjuju na 98,6 kW. Konvergencija algoritma za deset uzastopno pokrenutih simulacija je prikazana na slici 11. Naravno, na slici se vidi da zbog primjenjene stohastike u algoritmu, algoritam ne konvergira uvijek za isti broj iteracija. Srednji broj iteracija potreban za određivanje minimuma gubitaka aktivne snage dobijen na osnovu ovih deset simulacija je 8.



Slika 9. IEEE test mreža sa 69 čvorova poslije rekonfiguracije.



Slika 10. Profil napona u IEEE mreži sa 69 čvorova.



Slika 11. Promjena aktivne snage iz iteracije u iteraciju za IEEE test mrežu sa 69 čvorova prilikom 10 uzastopnih simulacija.

VI. ZAKLJUČAK

U ovom radu je implementiran algoritam kolonije mrava za rekonfiguraciju distributivne mreže. Predložen je proračun poželjnosti isključenja grana zasnovan na odnosu tokova snaga po granama fundamentalne petlje. Izloženi algoritam je testiran na IEEE test mrežama sa 33 i 69 čvorova. Rezultati simulacija su pokazali da izloženi algoritam uspješno nalazi konfiguraciju za koju se imaju minimalni gubici aktivne snage. Takođe, rezultati rekonfiguracije su upoređeni sa nekoliko algoritama za rekonfiguraciju distributivnih mreža koji se mogu naći u literaturi. Pored ovoga, za potvrdu globalnog minimuma gubitaka aktivne snage izvršeno je pretraživanje cijelog skupa mogućih rješenja.

C. Poređenje rezultata rekonfiguracija

U ovom poglavlju su upoređeni rezultati simulacija dobijeni izloženim algoritmom kolonije mrava sa nekoliko algoritama dostupnih u literaturi. Takođe, izvršeno je i pretraživanje svih mogućih rješenja. U tabeli 2 su prikazani rezultati rekonfiguracije za IEEE test mrežu sa 33 čvora. Iz date tabele se može vidjeti da izloženi algoritam uspješno nalazi globalni minimum gubitaka aktivne snage.

Tabela 2. Rezultati rekonfiguracija za IEEE 33 test mrežu

Algoritam / Izvor	Otvoreni prekidači u granama	Ukupni gubici aktivne snage	Minimalna vrijednost napona
Stanje prije rekonfiguracije	33, 34, 35, 36, 37	202,67 kW	0,9131 r.j.
Izloženi ACO [18], [22], [27]	7, 9, 14, 32, 37	139,55 kW	0,9378 r.j.
[28]	7, 9, 14, 32, 37	139,55 kW	0,9378 r.j.
[28]	7, 10, 14, 32, 37	140,28 kW	0,9378 r.j.
Optimum*	7, 9, 14, 32, 37	139,55 kW	0,9378 r.j.

*Dobijen pretraživanjem svih mogućih konfiguracija.

Za drugu test mrežu sa 69 čvorova rezultati rekonfiguracija su prikazani u tabeli 3. Takođe, se može vidjeti da izloženi algoritam kolonije mrava konvergira ka globalnom minimumu. Ovdje je zanimljivo da se iste vrijednosti, gubitaka aktivne snage dobija za četiri različita uklopna stanja. Pri tome su i najniži naponi u mreži isti, pa se ne može odrediti optimalna konfiguracija, nego su sve četiri ravnopravne. Pored izloženog algoritma, u tabeli su prikazani rezultati rekonfiguracija još nekoliko metaheurističkih metoda.

Tabela 3. Rezultati rekonfiguracija za IEEE 69 test mrežu

Algoritam / Izvor	Otvoreni prekidači u granama	Ukupni gubici aktivne snage	Minimalna vrijednost napona
Stanje prije rekonfiguracije	69, 70, 71, 72, 73	225,00 kW	0,9092 r.j.
Izloženi ACO [29]	14, 57, 61, 69, 70	99,6060 kW	0,9495 r.j.
[30]	/	99,62 kW	0,9428 r.j.
[31]	/	106,28 kW	0,9266 r.j.
[31]	/	118,00 kW	/
Optimum*	14, 55, 61, 69, 70	98,6060 kW	0,9495 r.j.
	14, 56, 61, 69, 70		
	14, 57, 61, 69, 70		
	14, 58, 61, 69, 70		

*Pretraživanjem svih mogućih kombinacija dobijen je isti rezultat za više uklopna stanja.

LITERATURA

- [1] J. M. Gers, *Distribution System Analysis and Automation*, London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 2014.
- [2] N. Rajaković, D. Tasić, *Distributivne i industrijske mreže*, drugo izdanje, Akademska misao, Beograd, 2008.
- [3] A. Merlin, H. Buck, "Search for a Minimal-Loss Operating Spanning Tree Configuration in an Urban Power Distribution System," 5th Power System Computation Conference (PSCC), Cambridge, U.K., September 1975.
- [4] D. Popović, D. Bekut, V. Treskanica, *Specijalizovani DMS algoritmi*, Novi Sad: DMS Group, Jun 2004.
- [5] F. L. Iborra, J. R. Santos, E. R. Ramos, "Mixed-Integer Linear Programming Model for Solving Reconfiguration Problems in Large-Scale Distribution Systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 88, pp. 137-145, July 2012.
- [6] A. Augugliaro, L. Dusonchet, S. Mangione, "Optimal Re-configuration of Distribution Network or Loss Reduction Using Non-linear Programming," *European Transactions on Electrical Power*, vol. 1, no. 6, pp. 317-324, 1991.
- [7] R. A. Jabr, R. Singh, B.C. Pal, "Minimum Loss Network Reconfiguration Using Mixed-Integer Convex Programming," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 3, pp. 1106-1115, December 2012.
- [8] J. Y. Fan, L. Zhang, J. D. McDonald, "Distribution Network Reconfiguration: Single Loop Optimization," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 3, pp. 1643-1647, August 1996.
- [9] A. A. M. Zin, A. K. Ferdavani, A. B. Khaiduddin, M. M. Naeini, "Reconfiguration of Radial Electrical Distribution Network Through Minimum-Current Circular-Updating- Mechanism Method," vol. 27, no. 2, p. 968-974, May, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 2, pp. 968-974, May 2012.
- [10] B. Stojanović, "Branch Exchange Approach to Power Loss Reduction in Reconfiguration Problem of Balanced Distribution Networks," *International Journal of Mechanical Engineering and Automation*, vol. 2, no. 3, pp. 142-149, December 2014.
- [11] C. Blum, A. Roli, "Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison," *ACM Computing Surveys*, vol. 35, no. 3, pp. 268-308, September 2003.
- [12] Y. J. Jeon, J. C. Kim, J.O. Kim, J. R. Shin, K. Y. Lee, "An Efficient Simulated Annealing Algorithm for Network Reconfiguration in Large-Scale Distribution Systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, no. 4, pp. 1070-1078, October 2002.
- [13] A. Y. Abdelaziz, F. M. Mohamed, S. F. Mekhamer, M. A. L. Badr, "Distribution System Reconfiguration Using a Modified Tabu Search Algorithm," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, no. 8, pp. 943-953, August 2010.
- [14] S. Bahadoorsingh, J. V. Milanovic, Y. Zhang, C. P. Gupta, J. Dragovic, "Minimization of Voltage Sag Costs by Optimal Reconfiguration of Distribution Network Using Genetic Algorithms," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 2, no. 4, p. 2271 - 2278, October 2007.
- [15] Y. H. Song, G. S. Wang, A. T. Johns, P. Y. Wang, "Distribution Network Reconfiguration for Loss Reduction Using Fuzzy Controlled Evolutionary

- Programming," *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, Jul 1997.
- [16] C. T. Su, C. F. Chang, J. P. Chiouc, "Distribution Network Reconfiguration for Loss Reduction by Ant Colony Search Algorithm," *Electric Power Systems Research*, vol. 75, no. 2-3, pp. 190-199, August 2005.
- [17] A. Y. Abdelaziz, F. M. Mohammed, S. F. Mekhamer, M. A. L. Badr, "Distribution Systems Reconfiguration Using a Modified Particle Swarm Optimization Algorithm," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 11, p. 1521 – 1530, November 2009.
- [18] A. Swarnkar, N. Gupta, K.R. Niazi, "Adapted Ant Colony Optimization for Efficient Reconfiguration of Balanced and Unbalanced Distribution Systems for Loss Minimization", *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 1, no. 3, pp. 129-137, September 2011.
- [19] F. S. Pereira, K. Vittori, G. R. M. da Costa, "Ant Colony Based Method for Reconfiguration of Power Distribution System to Reduce Losses," *2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, 13-15.
- [20] M. Dorigo, M. Birattari, T. Stützle, "Ant colony optimization: artificial ants as a computational intelligence technique.," *IEEE Computational Intelligence Magazine*, vol. 1, no. 4, p. 28-39.
- [21] A. Ahuja, A. Pahwa, "Using Ant Colony Optimization for Loss Minimization in Distribution Networks," *Proceedings of the 37th Annual North American Power Symposium*, Ames, IA, USA, USA, October 2005.
- [22] M.A. Ghorbani, S.H. Hosseinian, B. Vahidi, " Application of Ant Colony System Algorithm to Distribution Networks Reconfiguration for Loss Reduction," *2008 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, Brasov, Romania, May 2008.
- [23] M. Dorigo and T. Stützle, *Ant Colony Optimization*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 2004.
- [24] Christine Solmon, *Ant Colony Optimization and Constraint Programming*, John Wiley & Sons, 2010.
- [25] J. Mendoza, R. López, D. Morales, E. López, P. Dessante, R. Moraga, "Minimal Loss Reconfiguration Using Genetic Algorithms With Restricted Population and Addressed Operators: Real Application", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 948-954, May 2006.
- [26] E. G. Talbi, *Metaheuristics from Design to Implementation*, New Jersey, Canada: John Wiley & Sons, 2009.
- [27] A. A. M. Zin, A. K. Ferdavani, A. B. Khaiduddin, M. M. Naeini, "Reconfiguration of Radial Electrical Distribution Network Through Minimum-Current Circular-Updating- Mechanism Method," , vol. 27, no. 2, p. 968–974, May," *IEEE Transactions On Power Systems*, vol. 27, no. 2, pp. 968-974, May 2012.
- [28] D. Shirmohammadi and H. W. Hong, "Reconfiguration of Electric Distribution Networks for Resistive Line Loss Reduction," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 2, pp. 1492-1498, Apr. 1989.
- [29] J. Chen, F. Zhang, Y. Zhang, "Distribution Network Reconfiguration Based on Simulated Annealing Immune Algorithm," *Energy Procedia*, vol. 12, pp. 271-277, September 2011.
- [30] M. Zhigang, "Study on Distribution Network Reconfiguration Based on Genetic Simulated Annealing Algorithm," *CICED 2008, China International Conference on Electricity Distribution*, Guangzhou, China, 11-13 December 2008.
- [31] N. Xiong, H. Cheng, L. Yao, M. Bazargan, "Switch Group Based Tabu Search Algorithm for Distribution Network Reconfiguration," *Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, Nanjing, China, 6-9 April 2008.

AUTORI

Predrag Mršić – Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet; Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet, predrag.mrsic@etf.unibl.org (kontakt)

Nikola Rajaković – Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, rajakovic@etf.bg.ac.rs