

Primjena modifikovanog BPSO metoda za rekonfiguraciju distributivne mreže

Bojan Erceg^{a,b}, Nikola Rajaković^a, Čedomir Zeljković^b

^a Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija

^b Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, Republika Srpska, Bosna i Hercegovina
bojan.erceg@etf.unibl.org, rajakovic@etf.rs, cedomir.zeljkovic@etf.unibl.org

Sažetak—U radu je analizirana mogućnost primjene modifikovanog metoda zasnovanog na optimizaciji rojem čestica za određivanje optimalne konfiguracije distributivne mreže. Modifikacija je urađena u cilju bržeg dobijanja optimalnog uklopnog stanja distributivne mreže, uz zadržavanje stabilnosti konvergencije algoritma. Navedena su tehnička ograničenja koja treba da se poštuju prilikom rekonfiguracije distributivne mreže. Predloženi metod je testiran na IEEE mreži sa 33 sabirnice. U cilju pokazivanja efikasnosti predloženog algoritma, rezultati dobijeni predloženim metodom upoređeni su sa rezultatima rekonfiguracije test mreže dobijenih standardnim Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) metodom.

Ključne riječi—metaheuristička metoda; optimizacija rojem čestica; rekonfiguracija; smanjenje gubitaka; distributivna mreža;

I. UVOD

Dugi niz godina topologije distributivnih mreža bile su sa ograničenim mogućnostima promjene strukture, zbog niskog stepena automatizacije i ograničenih mogućnosti daljinskog upravljanja [1]. Međutim, posljednjih godina sve intenzivnije ulaganje u osavremenjavanje, odnosno automatizaciju distributivne mreže omogućilo je rekonfiguraciju distributivne mreže sa ciljem što ekonomičnijeg, pouzdanijeg i sigurnijeg rada [1], [2]. Rekonfiguracija distributivne mreže se radi u normalnim radnim stanjima mreže, sa ciljem smanjivanja gubitaka aktivne snage [3]–[9], popravljavanje naponskog profila [3], ujednačenja opterećenja po fiderima [10], poboljšanje pokazatelja pouzdanosti i sigurnosti mreže [11] itd, uz poštovanje sigurnosnih aspekata i ograničenja (npr. radijalna konfiguracija mreže). U praksi rekonfiguracija distributivne mreže obično se radi na sezonskom nivou [1] (prelazak sa ljetnje na zimsku sezonu), pod pretpostavkom da su konzumi tako profilisani.

Prema tome, rekonfiguracija distributivne mreže predstavlja jednu od najvažnijih upravljačkih funkcija u procesu planiranja / eksploatacije pogona distributivnih mreža. Definiše se kao promjena topološke strukture pojedinih distributivnih fidera (izvoda) promjenom stanja otvoren / zatvoren sekcioni (normalno zatvoreni) i poveznih (normalno otvoreni) prekidača [12]. Cilj rekonfiguracije je određivanje optimalnog uklopnog stanja distributivne mreže sa aspekta korisnički specificiranog optimizacionog kriterijuma. Optimizacioni kriterijum bira se u zavisnosti od topologije distributivne mreže (gradska, prigradska, ruralna i industrijska mreža), pri čemu ista mreža može imati različite optimizacione kriterijume u zavisnosti od

radnog režima (opterećenja vodova, naponskih prilika u prenosnoj mreži, itd) [1], [2]. Kriterijumska funkcija može biti i kombinacija više optimizacionih kriterijuma [11].

Problem određivanja optimalne konfiguracije distributivne mreže je kompleksan, kombinatoran, nelinearan i diskretan optimizacioni problem. Pored toga, uvažavanjem tehničkih ograničenja i različitih optimizacionih kriterijuma, određivanje optimalnog uklopnog stanja mreže se značajno usložnjava [12]. Primjena metoda pretraživanja [13], prilikom određivanja optimalne konfiguracije realne distributivne mreže, ne preporučuje se iz razloga što je on vremenski veoma zahtjevan. Naime, realne distributivne mreže mogu imati preko 1000 čvorova, a kako ovim metodom imamo 2^n mogućih kombinacija, gdje n predstavlja broj čvorova u mreži, simulacije prilikom određivanja optimalnog uklopnog stanja mreže bi trajale danima, mjesecima pa čak i godinama. Iz tog razloga, za rješavanje problema rekonfiguracije realnih distributivnih mreža razvijeni su optimizacioni metodi, koji podrazumijevaju napredne tehnike pretraživanja, u cilju što bržeg pronalaska optimalne konfiguracije mreže koja će zadovoljiti specificirani optimizacioni kriterijum. U zavisnosti od matematičkog modela i primijenjene tehnike pretraživanja, metode za rekonfiguraciju distributivne mreže globalno se mogu podijeliti u tri grupe metoda [2]: matematičke metode optimizacije, heurističke i metaheurističke metode.

Matematičke metode optimizacije za rješavanje problema rekonfiguracije distributivnih mreža koriste metode linearnog, nelinearnog, kvadratnog i dinamičkog programiranja. Primjena ovih metoda za određivanje optimalnog uklopnog stanja realnih distributivnih mreža pokazala se nepraktična iz više razloga. Jedan od razloga je što su realne distributivne mreže velikih dimenzija, pa određivanje optimalnog uklopnog stanja mreže može trajati veoma dugo. Definisane tehničke ograničenja, kao što je uslov radijalne konfiguracije mreže je teško matematički eksplicitno iskazati, što takođe predstavlja razlog nepraktičnosti ove grupe optimizacionih metoda. Osim toga, veliki problem ovih metoda ogleda se u činjenici da pojedine metode uopšte ne konvergiraju [2].

Heurističke metode su metode koje se najčešće koriste za određivanje optimalnog uklopnog stanja distributivne mreže, zbog sposobnosti da relativno brzo generišu rješenje sa zadovoljavajućom tačnošću [2]. Do optimalnog uklopnog stanja mreže dolaze poznavanjem fizike problema, odnosno upotrebom karakteristika sistema. Dije se u dvije grupe metoda: metode

sa postupnim otvaranjem kontura (eng. *loop-cutting algorithm*) i metode sa pojedinačnim razmatranjem kontura (eng. *branch-exchange algorithm*). Prednost metoda sa postupnim otvaranjem kontura je što optimalna konfiguracija mreže ne zavisi od početnog rješenja. Osnovni nedostatak mu je što je prvenstveno namijenjen za određivanje optimalne konfiguracije radialne distributivne mreže sa ciljem minimizacije gubitaka aktivne snage, pa ako se želi primijeniti na neki drugi optimizacioni kriterijum, potrebno je izvršiti modifikaciju modela mreže. Drugi nedostatak mu je veoma dugo vrijeme trajanja pronalaska optimalnog rješenja za mreže sa velikim brojem čvorova, što rezultuje time da se ne može koristiti prilikom rekonfiguracije u realnom vremenu. Prednost metoda sa pojedinačnim razmatranjem kontura ogleda se u efikasnosti, jer se ne zahtijeva proračun cjelokupnog radnog režima nakon promjene statusa uključenosti razmatranih rasklopnih uređaja, pa se može koristiti u procesu rekonfiguracije distributivne mreže u realnom vremenu. Nedostatak mu je što optimalna konfiguracija distributivne mreže zavisi od početnog rješenja [2].

Metaheurističke metode su metode koje koriste modele zasnovane na prirodnim procesima, vještačkoj inteligenciji i stohastičkom pretraživanju za rješavanje nelinearnih diskretnih optimizacionih problema velike dimenzionalnosti [2], kakvi su problemi rekonfiguracije realnih distributivnih mreža [3]–[13]. Kod ovih metoda iterativni proces započinje iz proizvoljno uzete početne tačke iz prostora mogućih rješenja. Zatim, to rješenje iz iteracije u iteraciju pomoću određenih pravila izbjegava lokalne optimume i napreduje ka globalnom rješenju. Prednost ovih metoda je što optimalna konfiguracija mreže ne zavisi od početnog rješenja. Nedostatak im se ogleda u relativno velikom vremenu trajanja pronalaska optimalnog uklopnog stanja mreže, pa se ne mogu koristiti u procesu rekonfiguracije distributivnih mreža u realnom vremenu. Prema [14] metaheurističke metode se mogu podijeliti u dvije grupe metaheuristika: metaheurističke metode zasnovane na jednom rješenju i metaheurističke metode zasnovane na populaciji rješenja. Najpoznatije metode koje spadaju u prvu grupu metaheuristika, a koje se koriste za rješavanje problema rekonfiguracije distributivne mreže, su: simulirano kaljenje (eng. *simulated annealing*) i tabu pretraživanju (eng. *tabu search*) [3]. Metaheurističke metode zasnovane na populaciji, predstavljaju metaheuristike kod kojih su algoritmi pretraživanja prostora rješenja zasnovani na ponašanju prirodnih procesa prilagođenih za rješavanje problema rekonfiguracije distributivnih mreža. Zajedničko im je da rade sa populacijom rješenja. Najpoznatije metode zasnovane na populaciji rješenja, koje se koriste za određivanje optimalnog uklopnog stanja distributivne mreže, su: genetski algoritmi, evolutivno programiranje, metode mravljih kolonija (eng. *ant colony optimization* - ACO) [4], optimizacija rojem čestica (eng. *particle swarm optimization* - PSO) [5]–[12], *harmony search* algoritmi [3] i metode pčelinjih kolonija (eng. *Artificial Bee Colony* - ABC).

U ovom radu će biti prikazana metaheuristička metoda zasnovana na optimizaciji rojem čestica sa ciljem minimizacije ukupnih gubitaka aktivne snage u mreži. Minimizacija gubitaka aktivne snage, kao kriterijum, izabrana je iz razloga što se od ukupne proizvedene električne energije desetak pa i više procenta troši na gubitke u distributivnoj mreži [1], što znači da gubici električne energije imaju važnu ulogu kako kod planira-

nja bilansa energije, tako i tokom eksploatacije elektroenergetskih sistema i mreža. Želi se pokazati, da se pravilnim izborom uklopnog stanja mreže, pri nepromijenjenom opterećenju u mreži, mogu poboljšati uslovi rada, prebacivanjem opterećenja sa više opterećenih fidera na manje opterećene fidere.

U drugoj glavi biće definisan problem određivanja optimalne konfiguracije distributivne mreže sa ciljem minimizacije ukupnih gubitaka aktivne snage. Izvešće se matematička formulacija i definisaće se tehnička ograničenja koja treba da budu ispunjena prilikom određivanja optimalne konfiguracije distributivne mreže. Izabrani metaheuristički metod, koji je testiran od strane autora u [12], i predložena modifikacija istog biće opisani u glavi tri. U četvrtoj glavi biće opisana IEEE mreža na kojoj će biti izvršeno testiranje predloženog BPSO metoda, te će se predstaviti dobijeni rezultati. Zaključak rada biće dat u glavi pet.

II. FORMULISANJE PROBLEMA REKONFIGURACIJE

Rekonfiguracija distributivne mreže sa ciljem minimizacije ukupnih gubitaka aktivne snage u mreži prema teoriji grafova svodi se na pronalazak optimalne konfiguracije mreže, odnosno pronalazak razapinjućeg stabla grafa za koji je specificirani optimizacioni kriterijum ispunjen. Pod razapinjućem stablom (eng. *spanning trees*) podrazumijevamo podgraf koji se dobija iz grafa uklanjanjem određenog broja grana iz grafa, a da pri tom graf ostane povezan sa istim brojem čvorova [2]. Matematička formulacija navedenog problema svodi se na pronalazak minimuma kriterijumske funkcije (1):

$$\min f_{obj} = \min \sum_{b=1}^{N_B} \alpha_b r_b |i_b|^2, \quad (1)$$

gdje je sa α_b označena promjenljiva koja predstavlja status b -te grane ($\alpha_b = 1$ uključena, $\alpha_b = 0$ isključena b -ta grana), i_b fazor struje b -te grane izražen u r.j, r_b rezistansa b -te grane izražena u r.j, a sa N_B ukupan broj grana u distributivnoj mreži.

Relacija (1) izvedena je pod pretpostavkom da su grane distributivne mreže modelovane samo rednom impedansom i da u svakoj grani postoji rasklopni uređaji koji omogućuje uključenje ili isključenje b -te grane. Prilikom određivanja vrijednosti f_{obj} , potrebno je voditi računa o sljedećim tehničkim ograničenjima u distributivnoj mreži [1], [2], [4]:

1) *Ograničenje modula fazora napona u čvorovima mreže:*

$$u_{\min} \leq |u_i| \leq u_{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, N_N, \quad (2)$$

gdje je u_i fazor napona i -tog čvora, u_{\min} i u_{\max} dozvoljena minimalna i maksimalna vrijednost modula fazora napona i -tog čvora, a N_N ukupan broj čvorova u distributivnoj mreži.

2) *Bilans aktivnih i reaktivnih snaga u čvorovima mreže:*

$$P_{Gi} - P_{Pi} = \sum_{j \in f_i} P_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, N_N, \quad (3)$$

$$q_{Gi} - q_{Pi} = \sum_{j \in f_i} q_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, N_N, \quad (4)$$

gdje je p_{Gi} i p_{Pi} aktivna snaga proizvodnje i potrošnje u čvoru i , q_{Gi} i q_{Pi} reaktivna snaga proizvodnje i potrošnje u čvoru i , a f_i skup svih čvorova j incidentnih sa čvorom i .

3) *Ograničenje tokova snaga po granama mreže:*

$$\sqrt{p_{ij}^2 + q_{ij}^2} \leq s_b^{\max}, \quad b = 1, 2, \dots, N_B, \quad (5)$$

gdje je s_b^{\max} vrijednost maksimalne dozvoljene snage koja se može prenijeti granom b .

Ograničenje (5) može se zamijeniti ograničenjem *struja po granama distributivne mreže*, relacija (6):

$$|i_b| \leq |i_b^{\max}|, \quad b = 1, 2, \dots, N_B, \quad (6)$$

gdje je $|i_b^{\max}|$ dozvoljena maksimalna vrijednost modula struje b -te grane.

4) *Radijalna konfiguracija distributivne mreže:*

$$\sum_{b=1}^{N_B} \alpha_b = N_N - 1, \quad (7)$$

Relacija (7) izvedena je pod pretpostavkom da je distributivna mreža napajana iz jednog čvora. To podrazumijeva da u distributivnoj mreži ne postoje distribuirani izvori značajne proizvodnje koji bi se mogli smatrati dodatnim napojnim čvorovima u mreži i ovo ograničenje predstavlja potreban, ali ne i dovoljan uslov da je distributivna mreža radijalna. Po definiciji, distributivna mreža je radijalna ukoliko u mreži nema formiranih petlji (7), i ukoliko je svaki čvor sadržan u razapinjućem stablu, odnosno direktno ili indirektno napajan iz napojnog čvora što nam garantuju ograničenja (3) i (4). Prethodno navedeni uslov radijalnosti distributivne mreže može se objediniti ograničenjima (8) i (9) [4]:

$$\det(\mathbf{A}) = 1 \text{ ili } \det(\mathbf{A}) = -1 \Rightarrow \text{mreža je radijalna}, \quad (8)$$

$$\det(\mathbf{A}) = 0 \Rightarrow \text{mreža nije radijalna}, \quad (9)$$

gdje \mathbf{A} predstavlja matricu povezanosti čvorova. Matrica povezanosti čvorova je kvadratna matrica dimenzije $N_N \times N_N$, čiji su dijagonalni elementi jednaki 1, a vandijagonalni 0 ili -1. Način formiranja matrice povezanosti čvorova objašnjen je [15].

III. OPTIMIZACIJA ROJEM ČESTICA

PSO spada u grupu metaheurističkih metoda koji za rješavanje optimizacionih problema koristi modele inspirisane prirodnim procesima zasnovanim na populaciji, odnosno roju (eng. *swarm*). Originalno je dizajniran od strane Eberhart-a i Kennedy-ja 1995. godine [12]. Algoritam je baziran na inteligenciji roja (eng. *swarm intelligence*), odnosno socijalnim ponašanjem životinja koje se kreću u velikim grupama, kao što je na primjer kretanje jata ptica, jata riba, itd. Osnovna ideja algoritma je opis sociološkog sistema jednostavnih jedinki (čestica) koje reaguju i komuniciraju sa drugim jedinkama i sa okruženjem. Inicijalizacija sistema vrši se skupom slučajno generisanih čestica (eng. *particles*), odnosno populacijom

slučajnih rješenja u dozvoljenim granicama koje se nazivaju roj ili jato. Populacija (eng. *population*) se sastoji iz niza čestica koje se kreću kroz višedimenzionalni prostor rješenja (eng. *search space*) koji pretražuju i pri tom mijenjaju svoj pravac i položaj na osnovu vlastitog iskustva i iskustva čestica iz populacije. Svaka čestica u populaciji u svakom trenutku predstavljena je svojom pozicijom i brzinom. Imajući u vidu da je pozicija svake čestice u populaciji potencijalno rješenje problema, najbolja pozicija koju svaka čestica postigne tokom procesa optimizacije se pamti. Pri tome se u svakom koraku PSO algoritma pozicija i brzina svake čestice ažuriraju sa dvije najbolje vrijednosti: najboljim ličnim rješenjem koje je čestica postigla do tada (eng. *personal best solution*) i najboljim rješenjem koje je postigla bilo koja čestica u populaciji ikad (eng. *global best solution*). Određivanjem najboljeg ličnog rješenja čestice i najboljeg rješenja populacije, mogu se izračunati ažurirana brzina (v) i pozicija (x) i -te čestice u d -dimenzionalnom prostoru rješenja u $k+1$ iteraciji prema (10) i (11), redom [17]:

$$v_{i,d}^{k+1} = \omega \cdot v_{i,d}^k + c_p r_p (pbest_{i,d}^k - x_{i,d}^k) + c_g r_g (gbest_d^k - x_{i,d}^k), \quad (10)$$

$$x_{i,d}^{k+1} = x_{i,d}^k + v_{i,d}^{k+1}, \quad (11)$$

gdje je $pbest_{i,d}^k$ najbolje lično rješenje i -te čestice u d -dimenzionalnom prostoru rješenja u k -toj iteraciji, $gbest_d^k$ najbolje rješenje koje je postigla populacija čestica ikad u d -dimenzionalnom prostoru rješenja u k -toj iteraciji, c_p koeficijent kognitivnog (saznajnog) učenja (uticaj iskustva čestice), c_g koeficijent socijalnog učenja (uticaj iskustva populacije), r_p i r_g pseudo-slučajni brojevi izvučeni iz uniformne raspodjele iz intervala brojeva [0, 1], a ω faktor inercije (eng. *inertia weight*).

Prvi sabirak u (10) predstavlja trenutnu brzinu čestice (inerciona ili individualna komponenta brzine čestice) modulisanu sa faktorom inercije, drugi sabirak predstavlja kognitivnu komponentu brzine čestice modulisanu koeficijentima c_p i r_p , dok treći sabirak predstavlja socijalnu komponentu brzine čestice modulisanu koeficijentima c_g i r_g . Dominantnost kognitivne komponente daje akcenat najboljem rješenju koje je postigla pojedinačna čestica, čime se osigurava „široko” pretraživanje prostora rješenja. Nasuprot tome, dominantnost socijalne komponente daje akcenat najboljem rješenju koje je cijela populacija pronašla ikad, čime se osigurava detaljnije pretraživanje okoline tog rješenja. Na ovaj način PSO algoritam kombinuje globalno pretraživanje prostora rješenja i lokalno pretraživanje kojim se obavlja fino podešavanje rješenja.

Koeficijenti učenja c_p i c_g definišu naklonost čestice prema lokalnom (vlastitom) ili prema globalnom (zajedničkom) uspjehu pri određivanju rješenja problema, odnosno koeficijentima učenja definiše se brzina kretanja čestice prema optimalnom rješenju i koliki uticaj na to rješenje imaju $pbest$ i $gbest$. Obično se u literaturi [5]–[12] za koeficijente učenja uzima da su to konstante čije su vrijednosti približno jednake 2.

Faktorom inercije moduliše se inerciona komponenta brzine čestice, čime se kontroliše uticaj prethodnih brzina čestica na trenutnu brzinu, održava se jato čestica na okupu. Inicijalno, vrijednost faktora inercije postavlja se na vrijednost približno jednaku jedan, dok se sa povećanjem broja iteracija (k) smanjuje ka minimalnoj vrijednosti. Prema [7], kod rješavanja

problema rekonfiguracije distributivne mreže, za faktor inercije uzima se da se on linearno smanjuje u funkciji iteracija prema relaciji (12):

$$\omega(k) = \begin{cases} \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \cdot \frac{k}{K_{\max}}, & k \leq K_{\max} \\ \omega_{\min}, & k > K_{\max} \end{cases}, \quad (12)$$

gdje je ω_{\max} maksimalna vrijednost faktora inercije, ω_{\min} minimalna vrijednost faktora inercije, a K_{\max} iteracija u kojoj faktor inercije dostiže svoju minimalnu vrijednost.

Pozicija i -te čestice u d -dimenzionalnom prostoru rješenja izračunata u $k+1$ iteraciji prema (11) u opštem slučaju nije cijeli broj, što znači da se PSO algoritam [16], [17] ne može primjenjivati za rješavanje diskretnih optimizacionih problema. U tu svrhu 1997. godine Eberhart i Kennedy predstavili su binarnu verziju PSO algoritma [18], koja predstavlja modifikaciju PSO algoritma za rješavanje diskretnih optimizacionih problema. Modifikacija se ogleda kroz normalizaciju brzine čestice na datoj poziciji u intervalu [0, 1], korišćenjem *Sigmoid* funkcije, relacija (13) [5], [6], [12]:

$$S(v_{i d}^{k+1}) = \frac{1}{1 + e^{-v_{i d}^{k+1}}}. \quad (13)$$

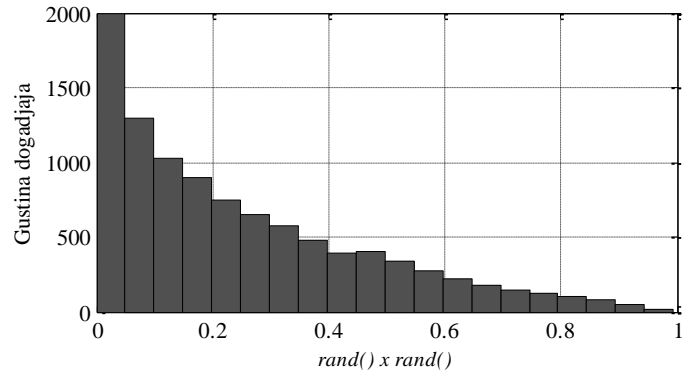
Brzina i -te čestice u d -dimenzionalnom prostoru rješenja u $k+1$ iteraciji u relaciji (13) izračunava se prema relaciji (10), a pozicija prema relaciji (14):

$$x_{i d}^{k+1} = \begin{cases} 1, & rand() < S(v_{i d}^{k+1}) \\ 0, & rand() \geq S(v_{i d}^{k+1}) \end{cases}, \quad (14)$$

U (14) sa $rand()$ označen je pseudo slučajni broj izvučen iz uniformne raspodjele iz intervala brojeva [0, 1]. Na ovaj način dobijaju se binarne vrijednosti za pozicije čestice (0 ili 1), što se u problemu rekonfiguracije distributivne mreže iskorištava kod statusa rasklopnog uređaja u b -toj grani [12].

U literaturi [5]–[12] sreću se razne modifikacije BPSO algoritma. Velika većina modifikacija odnosi se na različite varijante ažuriranja vrijednosti faktora inercije [5]–[8], jer inerciona komponenta brzine čestice ima značajan uticaj na globalno i lokalno pretraživanje prostora rješenja, zatim PSO algoritam sa binarnim kodovanjem [9], itd. Sve modifikacije odnose se ili na poboljšanje stabilnosti algoritma ili na što brži pronalazak optimalne konfiguracije distributivne mreže sa ciljem ispunjavanja specificiranog optimizacionog kriterijuma.

U ovom radu predložena je modifikacija BPSO algoritma koja se odnosi na drugačije izvlačenje vrijednosti brojeva r_p i r_g , u odnosu na analiziranu literaturu, u cilju bržeg određivanja optimalne konfiguracije distributivne mreže. Naime, eksperimentalnim putem utvrđeno je ukoliko se za brojeve r_p i r_g uzme da su jednaki proizvodu dva pseudo-slučajna broja izvučena iz uniformne raspodjele iz intervala brojeva [0, 1], postiže se brže dobijanje optimalne konfiguracije distributivne mreže u odnosu na rezultate dobijene standardnim BPSO metodom [12].



Slika 1. Histogram proizvoda dva pseudo-slučajna broja izvučena iz uniformne raspodjele iz intervala brojeva [0, 1].

Histogram proizvoda dva pseudo-slučajna broja izvučena iz uniformne raspodjele iz intervala brojeva [0, 1] prikazan je na Sl. 1. Sa Sl. 1 vidimo da je znatno veća vjerovatnoća izvlačenja malih u odnosu na veće brojeve iz intervala [0, 1]. Uzimanjem koeficijenta r_p i r_g na ovaj način osigurava se finije pretraživanje unutar lociranih područja dobijenih globalnom pretragom prostora rješenja pri značajnijim vrijednostima faktora inercije, što omogućava brže dobijanje optimalne konfiguracije mreže.

Algoritam za rekonfiguraciju distributivne mreže započinje učitavanjem ulaznih podataka za mrežu, tj. učitavanjem podataka o granama i čvorovima distributivne mreže. Nakon toga, potrebno je izvršiti inicijalizaciju BPSO parametara: definisati veličinu populacije i dimenziju prostora rješenja, dodijeliti svakoj čestici slučajno odabranu poziciju i brzinu, postaviti početne vrijednosti za $pbest$ i $gbest$, unijeti moguće petlje u distributivnoj mreži i definisati kriterijum zaustavljanja. Po završetku inicijalizacije slijedi glavni dio BPSO algoritma koji se ponavlja sve dok se ne zadovolji kriterijum zaustavljanja, nakon čega se dobija optimalno uklopno stanje distributivne mreže sa minimalnim gubicima aktivne snage. Kriterijum zaustavljanja u ovom konkretnom slučaju je dostizanje maksimalnog broja iteracija. Maksimalni broj iteracija određen je eksperimentalnim putem, naime izvršen je određen broj simulacija i ustanovilo se koji broj iteracija daje zadovoljavajuće rezultate za analiziranu IEEE test mrežu. Parametri BPSO algoritma korišćeni prilikom određivanja optimalnog uklopnog stanja test mreže prikazani su u tabeli I.

TABELA I. PARAMETRI BPSO METODA

Parametri	Vrijednost parametra
Veličina populacije	70
Dimenzija prostora rješenja	5
Maksimalni broj iteracija	50
Maksimalna vrijednost faktora inercije (ω_{\max})	0,90
Minimalna vrijednost faktora inercije (ω_{\min})	0,20
Iteracija pri kojoj ω dostiže ω_{\min} (K_{\max})	40
Koeficijent kognitivnog učenja (c_p)	2,00
Koeficijent socijalnog učenja (c_g)	2,00
Koeficijent r_p	$rand() \times rand()$
Koeficijent r_g	$rand() \times rand()$

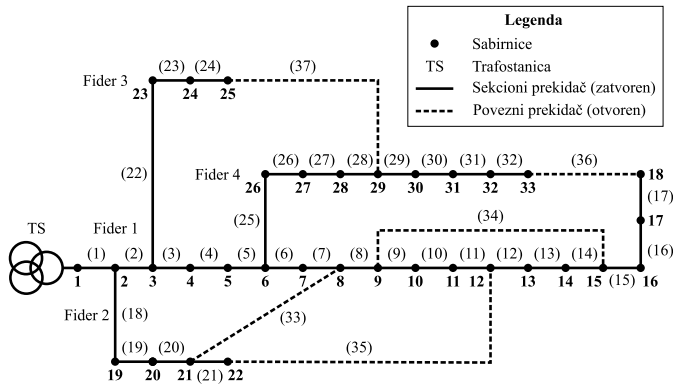
IV. REZULTATI TESTIRANJA

U ovoj glavi biće predstavljena IEEE mreže sa 33 sabirnice [8], koja će biti iskorišćena prilikom testiranja modifikovanog i standardnog BPSO metoda. Nakon toga, prikazaće se rezultati testiranja IEEE mreže u vidu poređenja konvergencije metoda, tj. brzine određivanja optimalne konfiguracije test mreže.

A. IEEE mreža 33 sabirnice

IEEE mreža sa 33 sabirnice sastoji se od 37 grana raspoređenih na četiri fidera sa odgovarajućim opterećenjem kao što je prikazano na Sl. 2. Ukupno aktivno i reaktivno opterećenje u mreži iznosi 3,715 MW i 2,300 MVar, dok je nominalni napon mreže 12,66 kV.

Moduli napona čvorova prilikom rekonfiguracije test mreže bili su ograničeni na vrijednost između 0,90 i 1,00 r.j.



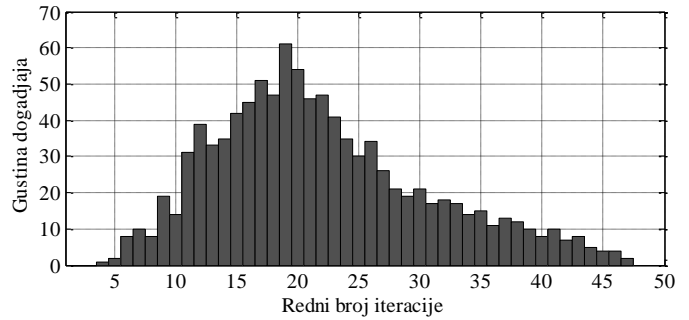
Slika 2. IEEE mreža sa 33 sabirnice. Bazno stanje. [12]

B. Rezultati testiranja

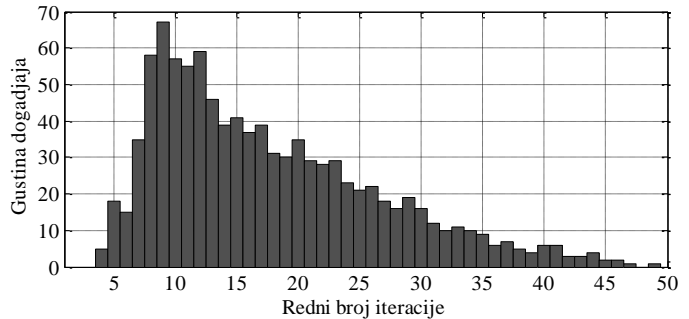
U ovom poglavlju biće predstavljeni rezultati testiranja modifikovanog i standardnog BPSO metoda, sa akcentom na konvergenciji metoda. Ukupni gubici aktivne snage, gubici aktivne snage i tokovi aktivne snage po granama mreže, te naponski profil prije i poslije rekonfiguracije su identični rezultatima dobijenim u [12], te iz tog razloga neće biti prikazani u ovom radu.

Zbog slučajnih vrijednosti u kognitivnoj i socijalnoj komponenti brzine čestice, oba člana imaju stohastički uticaj na ažuriranje brzine čestice (10). Posljedica toga je da je kretanje svake čestice u populaciji i pozicija svake čestice u prostoru mogućih rješenja određena sa odgovarajućom stohastikom. Iz tog razloga, u cilju poređenja konvergencije predloženog i standardnog BPSO metoda određivanje optimalnog uklopnog stanja IEEE test mreže ponovljeno je 1000 puta za oba metoda. Rezultati testiranja prikazani su u vidu histograma, pri čemu je na ordinati prikazan redni broj iteracije pri kojoj se postiže optimalno uklopno stanje IEEE test mreže sa ciljem minimizacije ukupnih gubitaka, dok je na apscisi prikazana gustina ponavljanja optimalnih uklopnih stanja.

Histogram konvergencije standardnog BPSO metoda nakon 1000 ponovljenih simulacija prikazan je na Sl. 3. Analizirajući Sl. 3, zaključujemo da se sa najvećom vjerovatnoćom optimalno uklopno stanje test mreže sa ciljem minimizacije ukupnih gubitaka aktivne snage postiže nakon 19 iteracija.



Slika 3. Histogram konvergencija standardnog BPSO metoda.



Slika 4. Histogram konvergencije modifikovanog BPSO metoda.

Histogram konvergencije modifikovanog BPSO metoda prikazan je na Sl. 4, sa koje vidimo da se sa najvećom vjerovatnoćom optimalno uklopno stanje test mreže, modifikovanim BPSO metodom, postiže nakon devet iteracija.

Na osnovu dobijenih rezultata konvergencije, vidimo da se modifikovanim BPSO metodom postiže brže optimalno uklopno stanje test mreže sa ciljem minimizacije ukupnih gubitaka aktivne snage. Vrijeme potrebno za izvršavanje 1000 simulacija iznosilo je približno 11 časova i 48 minuta u oba slučajja.

V. ZAKLJUČAK

U radu je poređenjem dobijenih rezultata pokazano da se predloženom modifikovanim BPSO metodom dobijaju brže optimalna uklopna stanja test mreže u odnosu na standardnu BPSO metodu. Brže dobijanje optimalnih uklopnih stanja omogućeno je finijim pretraživanjem prostora rješenja, nakon globalne pretrage, koje je posljedica drugačijeg izbora koeficijenata kojima se modulišu kognitivna i socijalna komponenta brzine čestice, a što je predloženo u ovom radu.

Pravilnim izborom uklopnog stanja distributivne mreže moguće je poboljšati uslove rada u mreži prebacivanjem opterećenja sa jako opterećenih fidera na slabije opterećene fidere. Najznačajnija poboljšanja uslova rada odnose se na smanjenje ukupnih gubitaka aktivne snage i popravljavanje naponskih profila distributivne mreže.

LITERATURA

- [1] J. M. Gers, Distribution system analysis and automation, London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 2014.
- [2] J. Zhu, Optimization of power system operation, New Jersey: John Wiley & Sons, 2015.
- [3] 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.
- [4] A. Y. Abdelaziz, R. A. Osama, Salem M. Elkhodary, "Distribution Systems Reconfiguration Using Ant Colony Optimization and Harmony Search Algorithms," *Electric Power Components and Systems*, vol. 41, no. 5, pp. 537-554, May 2013.
- [5] 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.
- [6] A. Arya, Y. Kumar, M. Dubey, "Reconfiguration of Electric Distribution Network using Modified Particle Swarm Optimization," *International Journal of Computer Applications*, vol. 34, no. 6, pp. 54-62, November 2011.
- [7] M. N. M. Nasir, N. M. Shahrin, Z. H. Bohari, M. F. Sulaima, M. Y. Hassan, "A Distribution Network Reconfiguration based on PSO: Considering DGs sizing and allocation evaluation for voltage profile improvement," in *2014 IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED)*, Batu Ferringhi, Malaysia , 16-17 December 2014.
- [8] I. I. Atteya, H. A. Ashour, N. Fahmi, D. Strickland, "Distribution Network Reconfiguration in Smart Grid System Using Modified Particle Swarm Optimization," in *5th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA) 2016*, Birmingham, UK, November 2016.
- [9] W. C. Wu, M. S. Tsai, "Feeder Reconfiguration Using Binary Coding Particle Swarm," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 6, no. 4, p. 488 – 494, August 2008.
- [10] X. Jin, J. Zhao, Y. Sun, K. Li, B. Zhang, "Distribution network reconfiguration for load balancing using binary particle swarm optimization," in *2004 International Conference on Power System Technology*, Singapore, November 2004.
- [11] N. Gupta, A. Swarnkar, K. R. Niazi, "Distribution network reconfiguration for power quality and reliability improvement using Genetic Algorithms," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 54, pp. 664-671, January 2014.
- [12] B. Erceg, Č. Zeljković, „Implementacija BPSO algoritma za optimalnu rekonfiguraciju distributivne mreže," *INFOTEH 2018*, Jahorina, Bosna i Hercegovina, Mart 2018.
- [13] A. Merlin, H. Buck, "Search for a Minimal-Loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system," in *5th Power System Computation Conference (PSCC)*, Cambridge, U.K., September 1975.
- [14] C. Blum, A. Roli, "Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison," *ACM Computing Surveys*, vol. 35, no. 3, pp. 268-308, September 2003.
- [15] 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 Transaction on Power Systems*, vol. 27, no. 4, pp. 1841-1849, November 2014.
- [16] J. Kennedy, R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *IEEE International Conference on Neural Networks, 1995*, Perth, WA, Australia, 27 November-1 December 1995.
- [17] Y. Shi, R. Eberhart, "A modified particle swarm optimizer," in *1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings*, Anchorage, AK, USA, USA, May 1998.
- [18] J. Kennedy, R.C. Eberhart, "A discrete binary version of the particle swarm algorithm," in *1997 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 1997. Computational Cybernetics and Simulation*, Orlando, FL, USA, USA , 12-15 October 1997.

ABSTRACT

The paper analyzes the possibility of applying a modified form of binary particle swarm optimization (BPSO) to identify the optimal configuration of the distribution network. The original BPSO algorithm is modified in order to obtain a faster optimal configuration of the distribution network while maintaining the stability of the convergence of the algorithm. The technical limitations to be observed when reconfiguring the distribution network are specified. The algorithm is tested on the standard IEEE 33-busbar radial distribution networks. The efficiency of the proposed algorithm is demonstrated by comparing its results with the results obtained by the standard BPSO method.

APPLICATION OF A MODIFIED BPSO METHOD FOR RECONFIGURATION THE DISTRIBUTION NETWORK

Bojan Erceg, Nikola Rajaković, Čedomir Zeljković