

Implementacija BPSO algoritma za optimalnu rekonfiguraciju distributivne mreže

Bojan Erceg, Čedomir Zeljković

Katedra za elektroenergetiku

Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet,

Banja Luka, Republika Srpska, BiH

bojan.erceg@tf.unibl.org

Sažetak—U radu je analizirana mogućnost primjene metaheurističkog metoda zasnovanog na Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) za određivanje optimalne konfiguracije distributivne mreže u cilju minimizacije gubitaka aktivne snage. Algoritam je testiran na IEEE mrežama sa 33 i 69 sabirница. U cilju pokazivanja efikasnosti algoritma, rezultati dobijeni primjenom BPSO algoritma upoređeni su sa rezultatima rekonfiguracija test mreža dobijenih drugim heurističkim i metaheurističkim metodama iz literature i sa rezultatima rekonfiguracije odgovarajućeg modula programske pakete DIGSILENT.

Ključne riječi-BPSO; rekonfiguracija; distributivna mreža; smanjenje gubitaka; DIGSILENT;

I. UVOD

Rekonfiguracija distributivne mreže predstavlja jednu od najvažnijih upravljačkih funkcija u procesu planiranja pogona distributivnih mreža. Definiše se kao promjena topološke strukture pojedinih distributivnih fidera promjenom stanja otvoren / zatvoren sekcionih (normalno zatvorenih) i poveznih (normalno otvorenih) prekidača [1]. Cilj upravljačke funkcije je određivanje optimalne konfiguracije distributivne mreže sa aspekta korisnički specificiranog optimizacionog kriterijuma, koji može biti smanjivanje gubitaka aktivne snage [1]–[3], minimizacija prekidačkih operacija [4], poboljšanje pokazatelja pouzdanosti i sigurnosti mreže [5], otklanjanje preopterećenja elemenata, balansiranje potrošnje [6], [7], smanjenje troškova nastalih uslijed propada napona [8]. Optimizacioni kriterijum za rekonfiguraciju distributivne mreže bira se u zavisnosti od topologije distributivne mreže, pri čemu ista mreža može imati različite optimizacione kriterijume u zavisnosti od radnog režima (stepena opterećenosti, napona u prenosnoj mreži, itd.).

Rekonfiguracija distributivne mreže obično se radi na nivou sezone (ljeto / zima) ili godine. Međutim, kako opterećenje u distributivnoj mreži kontinualno varira, rekonfiguracija na godišnjem ili sezonskom nivou je suviše gruba i nedovoljna da bi se uvidjeli puni efekti ove upravljačke funkcije. Razvojem i primjenom SCADA (eng. *Supervisory Control And Data Acquisition*) i distributivnog menadžment sistema otvorila se široka osnova za primjenu rekonfiguracije u realnom vremenu. Pri tom treba imati u vidu da svaka izmjena topologije distributivne mreže zahtijeva promjenu stanja sekcionih i poveznih prekidača, što skraćuje njihov životni vijek. Na osnovu navedenog zaključuje se da pri malom poboljšanju uslova rada rekonfiguracija distributivne mreže gubi smisao.

Problem određivanja optimalnog uklopnog stanja mreže je kompleksan, kombinatoran, nelinearan i diskretan optimizacioni problem. Pored toga, uvažavanjem tehničkih ograničenja i različitih optimizacionih kriterijuma određivanje optimalne konfiguracije mreže se značajno usložnjava. U zavisnosti od matematičkog modela i primjenjene tehnike rješavanja, metode za rekonfiguraciju distributivne mreže sa aspekta korisnički specificiranog optimizacionog kriterijuma globalno se mogu podijeliti u tri grupe [9]: matematički optimizacione, heurističke i metaheurističke metode.

Matematičke optimizacione metode za rješavanje problema rekonfiguracije distributivne mreže koriste metode nelinearnog programiranja [10], linearнog programiranja [11], dinamičkog programiranja [12], itd. Primjena ovog metoda za određivanje optimalnog uklopnog stanja distributivne mreže u praksi se rijetko koristi zbog izuzetno dugog vremena trajanja simulacije i nemogućnosti uvažavanja svih relevantnih ograničenja.

Heurističke metode do optimalnog uklopnog stanja mreže dolaze poznавanjem fizike problema, odnosno upotrebljom karakteristika sistema. Dijele se u dvije grupe metoda: metode sa postupnim otvaranjem kontura (tzv. algoritmi „najmanjih struja“) [13] i metode sa pojedinačnim razmatranjem kontura (tzv. algoritmi „izmjene grana“) [14]. Prednost algoritma „najmanjih struja“ je što optimalna konfiguracija mreže ne zavisi od početnog rješenja, dok je nedostatak veoma dugo vrijeme trajanja simulacije za mreže sa velikim brojem sabirница. Za razliku od algoritma „najmanjih struja“ optimalna konfiguracija distributivne mreže kod algoritama „izmjene grana“ zavisi od početnog rješenja i to predstavlja njegov osnovni nedostatak. Prednost ovog algoritma ogleda se u efikasnosti, jer ne zahtijeva proračun cijelokupnog radnog režima nakon promjene statusa uključenosti razmatranih sekcionih i poveznih prekidača, pa se može koristiti u procesu rekonfiguracije u realnom vremenu.

Metaheurističke metode za rješavanje problema rekonfiguracije distributivne mreže koriste modele inspirisane prirodnim procesima prilagođenim za rješavanje ovog problema. Dijele se u dvije velike grupe [9]: evolutivni algoritmi i algoritmi zasnovani na grupnoj inteligenciji skupa samoorganizujućih jedinki. Evolutivnim algoritmima pripadaju genetski algoritmi (eng. *Genetic Algorithm - GA*) [4], [8] i evolutivno programiranje (eng. *Evolutionary Programming - EP*) [15]. Metodi zasnovani na grupnoj inteligenciji skupa samoorganizujućih jedinki dijele se u četiri podgrupe: metode mravljih kolonija (eng. *Ant Colony Optimization - ACO*) [16], metode pčelinjih kolonija

(eng. *Artificial Bee Colony* - ABC) [9], optimizacija rojem čestica (eng. *Particle Swarm Optimization* - PSO) [17] i *harmony search* algoritmi [9]. Metaheuristički metodi koriste specifičan način pretrage rješenja, koji započinje iz neke početne tačke (ili iz skupa početnih tačaka), prostora rješenja zadatog problema i navođenja početne tačke pomoću nekih pravila u cilju izbjegavanja lokalnih optimuma [18]. Prednost ovih metoda je što oni daju optimalno uklopno stanje distributivne mreže nezavisno od početne konfiguracije. Nedostatak im je što zahtijevaju relativno dugo vrijeme trajanja simulacije, pa se ne mogu koristiti za rekonfiguraciju distributivne mreže u realnom vremenu.

Određivanje optimalne konfiguracije distributivne mreže sa ciljem smanjivanja gubitaka aktivne snage u radu je izvršeno pomoću BPSO algoritma. Ovaj algoritam izabran je za rekonfiguraciju jer ne zahtijeva preveliko vrijeme trajanja simulacije i veliki broj iteracija, što je pokazano u ovom radu. U radu će biti pokazano da se primjenom rekonfiguracije distributivne mreže mogu smanjiti gubici, popraviti naponske prilike i rastretiti vodovi sa istom kriterijumskom funkcijom. Takođe, biće pokazano da su rezultati rekonfiguracije test mreža dobijeni primjenom TOPO (eng. *Tie Open Point Optimization*) modula programskog paketa DiGILENT lošiji u odnosu na rezultate BPSO algoritma.

Matematička formulacija i definisanje problema rekonfiguracije sa ciljem smanjivanja gubitaka aktivne snage će biti opisane u poglavlju dva. U poglavlju tri će biti opisani PSO metod i njegova modifikacija za rješavanje diskretnih optimizacionih problema BPSO metod koji je iskorišćen u radu. Opis test mreža, rezultati simulacija prije i poslije rekonfiguracije BPSO metodom biće navedeni u poglavlju četiri. U poglavlju pet će biti data verifikacija dobijenih rezultata, a u poglavlju šest zaključak.

II. FORMULACIJA PROBLEMA

Problem određivanja optimalne konfiguracije distributivne mreže svodi se na pronađazak radikalne konfiguracije mreže iz skupa mogućih konfiguracija za koju će se imati minimum kriterijumske funkcije (minimalni gubici aktivne snage), uz uvažavanje tehničkih ograničenja i drugih optimizacionih kriterijuma. Ukupni gubici aktivne snage u distributivnoj mreži mogu se dobiti na osnovu razlike ukupne aktivne proizvodnje i potrošnje u mreži, sumiranjem aktivnih snaga injektiranja u svim čvorovima mreže ili sumiranjem gubitaka aktivne snage po svim granama mreže. Matematička formulacija problema optimalne rekonfiguracije distributivne mreže sa ciljem određivanja minimalnih gubitaka aktivne snage u radu, definisana je sa relacijom (1) [6]:

$$\min f_{obj} = \min \sum_{i=1}^{n_{gr}} \alpha_i R_i |I_i|^2, \quad (1)$$

gdje je α_i promjenljiva koja predstavlja status i -te grane ($\alpha_i = 1$ uključena, a $\alpha_i = 0$ isključena i -ta grana), I_i struja i -te grane, R_i rezistansa i -te grane, a n_{gr} broj grana u distributivnoj mreži.

Pri određivanju minimuma kriterijumske funkcije (f_{obj}), mora se voditi računa o tehničkim ograničenjima:

1) *Radikalna konfiguracija mreže*: u svakom trenutku konfiguracija mreže mora biti radikalna, dakle svaki čvor u mreži osim napojnog čvora ima samo jednu tačku napajanja.

2) *Naponsko ograničenje*: moduo fazora napona čvorova ($|U_{cv}|$) mora biti u okviru dozvoljenog opsega:

$$|U_{\min}| \leq |U_{cv}| \leq |U_{\max}|. \quad (2)$$

Standardna vrijednost za U_{\min} je 0,95 r.j. a za U_{\max} 1,05 r.j.

3) *Strujno ograničenje*: struja po grani mreže ne smije da pređe maksimalno dozvoljenu struju grane:

$$|I_i| \leq I_i^{\max}, \quad i \in \{1, 2, 3, \dots\}, \quad (3)$$

gdje je I_i^{\max} maksimalna struja po grani i .

III. BINARNA OPTIMIZACIJA ROJEM ČESTICA

PSO je metaheuristički optimizacioni metod zasnovan na roju (populaciji). Originalno je dizajniran od strane Russell Eberhart-a i James Kennedy-ja 1995. godine [17]. Algoritam je baziran na inteligenciji roja, inspirisan socijalnim ponašanjem životinja koje se kreću u velikim grupama (ptice, ribe, itd.). Inicijalizuje se skupom slučajno generisanih čestica u dozvoljenim granicama koje čine inicijalnu populaciju, gdje svaka jedinka predstavlja potencijalno rješenje problema. Svaka čestica u roju u svakom trenutku predstavljena je svojom pozicijom i brzinom. Kako je pozicija svake čestice u roju potencijalno rješenje, najbolja pozicija koju svaka čestica postigne tokom procesa optimizacije se pamti. Pri tome se u svakom koraku algoritma pozicija i brzina svake čestice ažurira sa dvije najbolje vrijednosti: najbolje lično rješenje koje je čestica postigla dosad (eng. *personal best solution*) i najbolje rješenje koje je postigla bilo koja čestica u populaciji ikada (eng. *global best solution*). Određivanjem ove dvije vrijednosti, mogu se izračunati ažurirana brzina (v) i pozicija (x) i -te čestice u d -dimenzionalnom prostoru rješenja u k -toj iteraciji prema relacijama (4) i (5), redom [2]:

$$v_i^{k+1} = \omega \cdot v_i^k + c_p r_p (pbest_i^k - x_i^k) + c_g r_g (gbest_d^k - x_i^k), \quad (4)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1}, \quad (5)$$

gdje su $pbest$ najbolja lična pozicija čestice, $gbest$ najbolja pozicija čestice u cijeloj populaciji, c_p koeficijent kognitivnog 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 opsega $[0, 1]$, a ω faktor inercije koji održava jato na okupu (kontroliše uticaj prethodnih brzina čestice na trenutnu brzinu).

Inicijalno, faktor inercije ω postavlja se na vrijednost približno 1, a sa povećanjem broja iteracija (t) vrijednost se smanjuje prema nekoj minimalnoj vrijednosti. Ako sa ω_{\max} i ω_{\min} označimo redom, željenu minimalnu i maksimalnu vrijednost faktora inercije, a sa T_{\max} (maksimalan broj iteracija) iteraciju u kojoj faktor inercije treba dostići vrijednost ω_{\min} , za ažuriranje faktora inercije koristi se relacija (6) [2]:

$$\omega(t) = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \cdot t/T_{\max} . \quad (6)$$

U simulacijama, maksimalna vrijednost faktora inercije iznosi $\omega_{\max} = 0,9$ a minimalna $\omega_{\max} = 0,2$.

Nova pozicija (x) i -te čestice u d -dimenzionalnom prostoru rješenja u k -toj iteraciji izračunata prema (5), u opštem slučaju nije cijeli broj, što znači da se originalni PSO algoritam [17] ne može primjenjivati za rješavanje diskretnih problema. U tu svrhu dizajniran je BPSO algoritam [19], koji predstavlja modifikaciju originalnog PSO algoritma, koja se ogleda kroz normalizaciju brzine čestice na dатoj poziciji u intervalu $[0, 1]$, korišćenjem $Sigmoid(x)$ funkcije, koja je definisana sa (7):

$$Sigmoid(v_i^{k+1}) = \frac{1}{1 + e^{-v_i^{k+1}}}, \quad (7)$$

gdje se brzina (v) i -te čestice u d -dimenzionalnom prostoru rješenja u k -toj iteraciji izračunava prema relaciji (4), a pozicija prema relaciji (8):

$$x_i^{k+1} = \begin{cases} 1, & rand() < Sigmoid(v_i^{k+1}) \\ 0, & rand() \geq Sigmoid(v_i^{k+1}) \end{cases}. \quad (8)$$

U relaciji (8) sa $rand()$ označen je slučajni broj iz opsega $[0, 1]$. Na ovaj način dobijaju se binarne vrijednosti za pozicije čestice (0 ili 1), što se u problemu rekonfiguracije distributivne mreže može iskoristiti kod statusa grane, relacija (1).

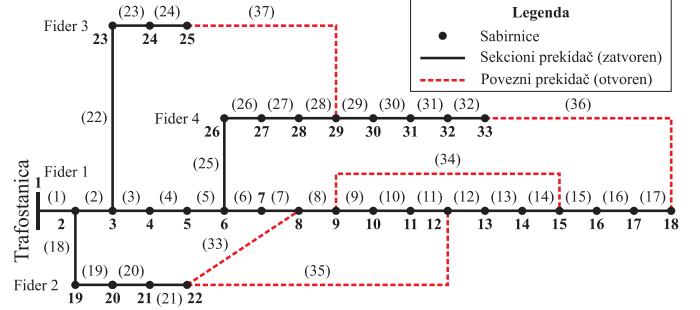
Određivanje optimalne konfiguracije distributivne mreže sa ciljem minimizacije gubitaka aktivne snage primjenom BPSO algoritma [2] započinje inicijalizacijom BPSO parametara (veličina populacije, dimenzija prostora rješenja, početna populacija, početne vrijednosti $pbest$ i $gbest$, maksimalan broj iteracija i kriterijum zaustavljanja). Što se tiče veličine populacije (broja čestica), u većini literature zadovoljavajući rezultati dobijaju se za populacije čija se veličina kreće između 50 i 100 jedinki [6]. Tokom simulacija korišćena je veličina populacije u iznosu od 100 čestica. Početna populacija bira se proizvoljno iz prostora mogućih rješenja i dimenzije je (veličina populacije) \times (dimenzija prostora rješenja). Prema [1] i [6], dovoljan (maksimalan) broj iteracija za dobijanje zadovoljavajućeg rješenja kreće se između 50 i 100. Maksimalan broj iteracija pri određivanju optimalnog uklopnog stanja test mreža iznosi je 75. Nakon inicijalizacije, izračunavaju se vektori brzina promjene pozicije za svaku pojedinačnu česticu korišćenjem relacije (4), bez ograničenja brzine, nakon čega se vrši ažuriranje podataka svake pojedinačne čestice relacijom (8). Zatim se za svaku česticu izračuna vrijednost kriterijumske funkcije, relacija (1), na trenutnoj poziciji, potom se provjeri za svaku česticu da li je do tada njen najbolje rješenje bolje od novog pronađenog rješenja. Ako je novo rješenje bolje, pamti se kao novo najbolje rješenje čestice (ažurira se $pbest$). U cijeloj populaciji pronade se najbolje rješenje (globalno rješenje), i ako je prethodno globalno rješenje lošije od novog rješenja, ažurira se $gbest$. Prethodno opisani proces se nastavlja sve dok se ne dostigne maksimalan broj iteracija, koji u ovom slučaju predstavlja kriterijum zaustavljanja [1], [6].

IV. PRIMJENA BPSO ALGORITMA

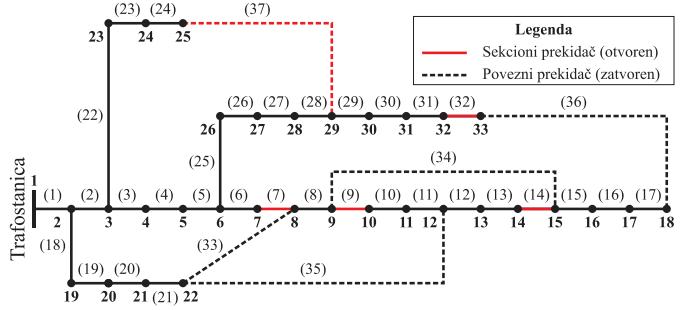
U ovom poglavlju će biti izvršeno testiranje BPSO algoritma na dvije IEEE test mreže sa 33 i 69 sabirnicama. Konfiguracija mreža, podaci rezistansi i reaktansi grana, aktivna i reaktivna snaga potrošnje, preuzeti su iz [7]. Za obje test mreže porediće se dva stanja, bazno stanje mreža (stanje prije rekonfiguracije – povezni prekidači otvoreni), i uklopno stanje mreža dobijeno primjenom BPSO algoritma. U simulacijama, moduo napona u čvorovima mreže bio je ograničen na vrijednosti između 0,90 r.j. i 1,00 r.j. [1]. Bazna snaga i bazni napon korišćeni tokom proračuna su 10 MVA i 12,66 kV, redom.

A. IEEE mreža sa 33 sabirnice

IEEE mreža sa 33 sabirnice sastoji se od četiri fidera na koje su priključena odgovarajuća opterećenja [7]. U mreži ima ukupno 37 grana (vodova), 32 sekcionala i 5 poveznih prekidača, kao što je prikazano na Sl. 1. Nominalni napon mreže je 12,66 kV, dok je ukupno opterećenje u mreži 3,715 MW i 2,300 MVAr. U baznom stanju, otvoreni povezni prekidači 33, 34, 35, 36 i 37, ukupni gubici aktivne snage u mreži iznose 202,6771 kW. Poslije rekonfiguracije gubici aktivne snage se smanjuju za 31,1460 % i iznose 139,5513 kW. Konfiguracija mreže pri kojoj se imaju smanjeni gubici prikazana je na Sl. 2, a dobijena je zatvaranjem poveznih prekidača 33, 34, 35, 36 i otvaranjem sekcionalnih prekidača 7, 9, 14 i 32. Povezni prekidač 37 nakon rekonfiguracije ne mijenja stanje.

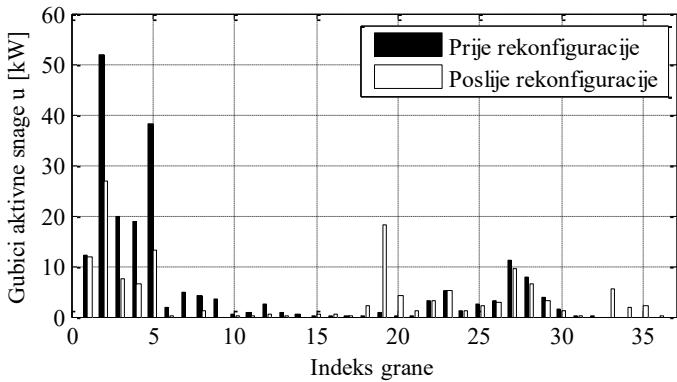


Slika 1. IEEE mreža sa 33 sabirnice. Prije rekonfiguracije.

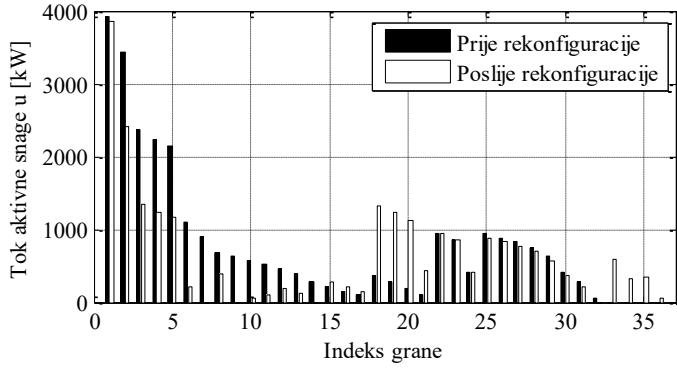


Slika 2. IEEE mreža sa 33 sabirnice. Poslije rekonfiguracije.

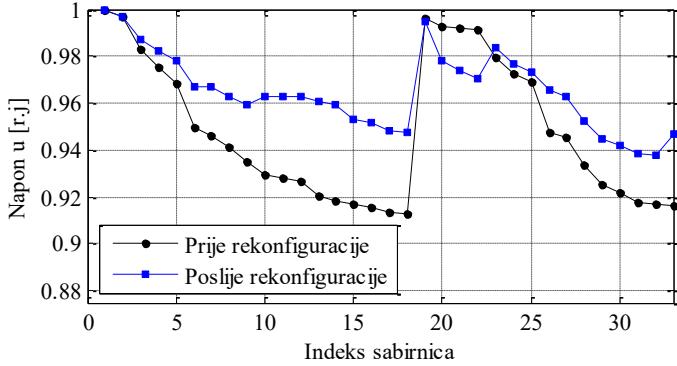
Vrijednost gubitaka aktivne snage pojedinačno za svaku granu prije i poslije rekonfiguracije mreže prikazana je na Sl. 3. Primjećuje se da su gubici na granama globalno manji poslije rekonfiguracije. Na pojedinim granama dolazi do blagog povećanja gubitaka iz razloga što se opterećenja sa fidera 1 prebacuju na fidere 2 i 4, pa su te grane opterećenije u odnosu na bazno stanje. Najveće smanjenje gubitaka imamo na granama 2 i 5 i ono iznosi 24,9978 kW i 25,0590 kW, redom.



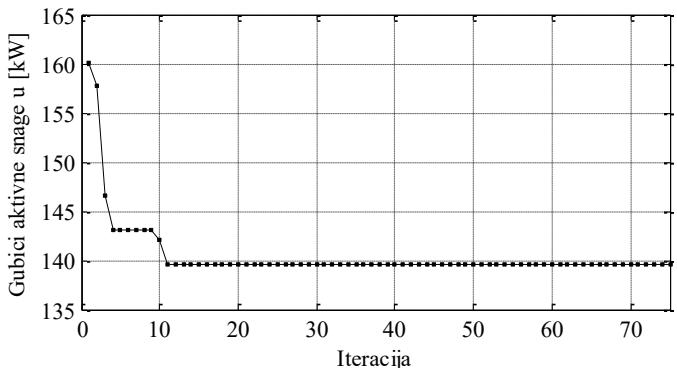
Slika 3. Gubici aktivne snage po granama mreže sa 33 sabirnice.



Slika 4. Tokovi aktivne snage po granama mreže sa 33 sabirnice.



Slika 5. Naponski profil mreže sa 33 sabirnice.



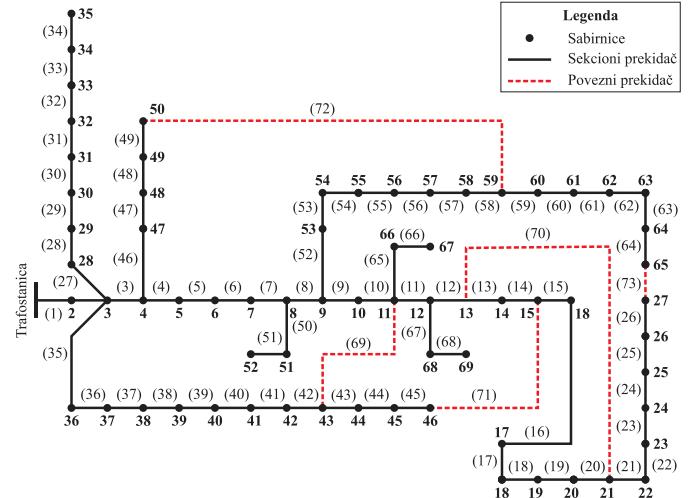
Slika 6. Konvergencija BPSO algoritma za mrežu sa 33 sabirnice.

Na Sl. 4 prikazane su vrijednosti tokova aktivnih snaga pojedinačno za svaku granu prije i poslije rekonfiguracije mreže. Sa Sl. 4 vidimo da poslije rekonfiguracije mreže imamo smanjenje opterećenja vodova. To znači da se istim vodovima nakon rekonfiguracije može prenijeti više snage. Na Sl. 5 prikazane su vrijednosti napona po sabirnicama prije i poslije rekonfiguracije mreže. Minimalna vrijednost napona u baznom stanju iznosi 0,9131 r.j. a poslije rekonfiguracije 0,9378 r.j. Zaključujemo da primjenom rekonfiguracije BPSO metodom, kriterijumska funkcija (1), osim smanjenja ukupnih gubitaka aktivne snage u mreži imamo popravljanje naponskog profila mreže i smanjenje opterećenje vodova.

Konvergencija BPSO algoritma u funkciji promjene ukupnih gubitaka aktivne snage prikazana je na Sl. 6. Optimalno uklopljeno stanje mreže postiže nakon 11 iteracija. Vrijeme trajanja simulacije iznosi 72,45 sekundi.

B. IEEE mreža sa 69 sabirnica

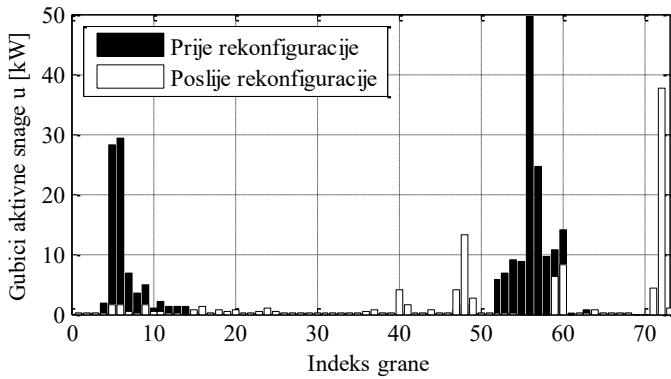
Druga mreža na kojoj je testiran BPSO algoritam je IEEE mreža koja se sastoji od 69 sabirnica, 73 grane, 68 sekcionih i 5 poveznih prekidača, raspoređenih na 8 fidera sa odgovarajućim opterećenjem [7], kao što je prikazano na Sl. 7. Ukupno opterećenje u mreži iznosi 3,8022 MW i 2,6946 MVar, dok je nominalni napon mreže 12,66 kV.



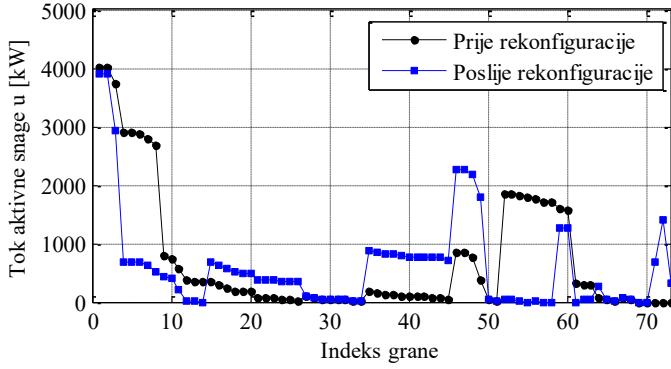
Slika 7. IEEE mreža sa 69 sabirnica. Bazno stanje.

Gubici aktivne snage u baznom stanju iznose 225,0028 kW. Poslije rekonfiguracije mreže gubici se smanjuju za 56,1757 % i iznose 98,6060 kW. Prekidačke operacije koje je potrebno izvršiti da bi se dobila optimalna konfiguracija mreže podrazumijeva promjenu stanja poveznih prekidača 71, 72 i 73 i sekcionih prekidača 14, 58 i 61. Profil gubitaka i tokova aktivne snage pojedinačno po granama mreže prikazani su na Sl. 8 i Sl. 9, redom. Vidimo da poslije rekonfiguracije dolazi do značajnog smanjenja gubitaka po granama na kojima su gubici prije rekonfiguracije imali velike vrijednosti.

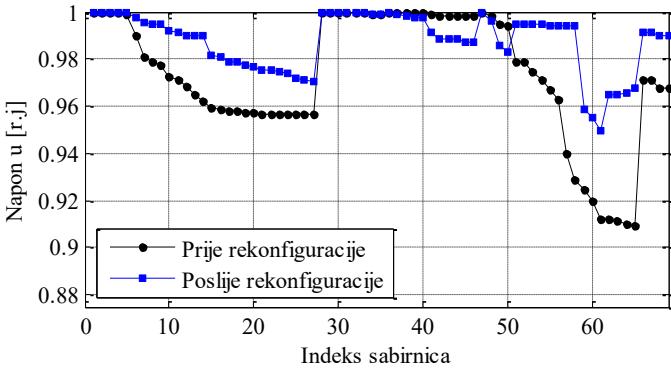
Posmatrajući naponski profil mreže (Sl. 10) prije i poslije rekonfiguracije, vidimo da poslije rekonfiguracije dolazi do porasta napona na skoro svim sabirnicama. Minimalna vrijednost napona prije rekonfiguracije u mreži je bila 0,9092 r.j. a poslije rekonfiguracije je 0,9495 r.j.



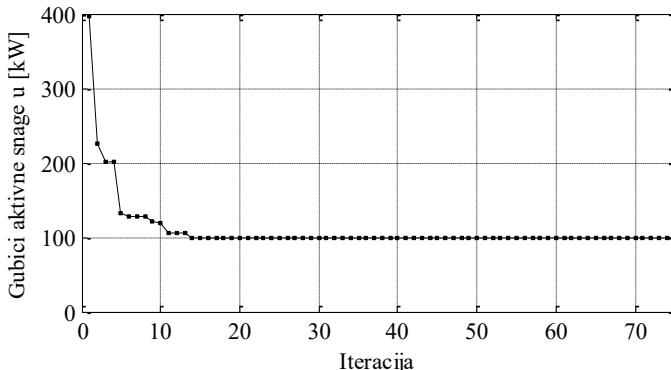
Slika 8. Gubici aktivne snage po granama mreže sa 69 sabirnicama.



Slika 9. Tokovi aktivne snage po granama mreže sa 69 sabirnicama.



Slika 10. Naponski profil mreže sa 69 sabirnicama.



Slika 11. Konvergencija BPSO algoritma za mrežu sa 69 sabirnicama.

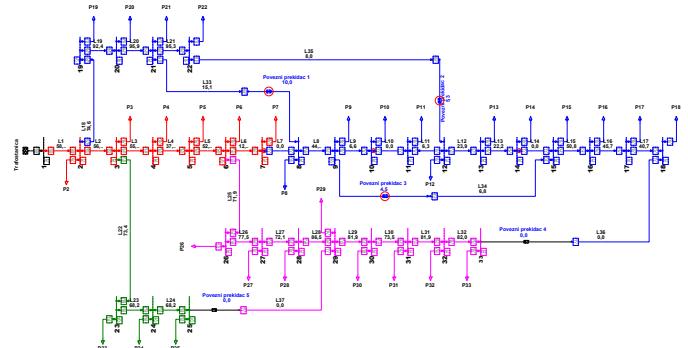
Konvergencija BPSO algoritma u funkciji promjene ukupnih gubitaka aktivne snage za mrežu sa 69 sabirnicama prikazana je na Sl. 11. Vidimo da se optimalna konfiguracija mreže postiže nakon 23 iteracija. Vrijeme trajanja simulacije iznosi 105,62 sekundi.

V. VERIFIKACIJA DOBIJENIH REZULTATA

U ovom poglavlju izvršiće se verifikacija rezultata rekonfiguracija mreža dobijenih primjenom BPSO algoritma. Verifikacija će biti izvršena poređenjem dobijenih rezultata BPSO algoritmom sa rezultatima rekonfiguracije dobijenim u programskom paketu DIgSILENT pomoću odgovarajućeg TOPO modula i sa rezultatima metoda iz literature. DIgSILENT je izabran kao referenca za testiranje BPSO algoritma jer on predstavlja jedan od najpoznatijih programa za analizu, planiranje i optimizaciju rada elektroenergetskih sistema. Kao takav, DIgSILENT nudi veliki broj raznovrsnih modula za analiziranje, modelovanje i testiranje elektroenergetskih mreža i sistema [20].

Gubici aktivne snage u prvoj test mreži u literaturi poslije rekonfiguracije iznose redom 139,5 kW [1], 141,54 kW [3], 139,55 kW [7], 139,6 kW [10] i 139,532 kW [12]. Na osnovu vrijednosti gubitaka zaključujemo da najveće poboljšanje BPSO algoritam ima u odnosu na Shirmohammadi-ja [3] i ono iznosi 1,41 %. Primjenom TOPO modula u programskom paketu DIgSILENT na istu mrežu dobijaju se gubici u iznosu od 142,682 kW. Poboljšanje BPSO algoritma su odnosu na DIgSILENT sa stanovišta ukupnih gubitaka aktivne snage je 2,19 %. Pri tom treba napomenuti, da je vrijeme izvršavanja rekonfiguracije u DIgSILENTU reda 1 sekunde, što znači da TOPO optimizacioni metod svjesno žrtvuje rezultate optimizacije par procenata, u cilju znatno bržeg rada zbog marketinga.

Na Sl. 12 prikazana je optimalna konfiguracija prve test mreže dobijena primjenom TOPO modula u DIgSILENT-u. Vidimo da je za dobijanje optimalne konfiguracije potrebno promijeniti 6 stanja prekidača, 3 povezna (33, 34, 35) i 3 sekpciona prekidača (7, 10 i 14). Minimalna vrijednost napona nakon rekonfiguracije iznosi 0,9336 r.j.



Slika 12. IEEE mreža sa 33 sabirnice u programskom paketu DIgSILENT. Stanje poslije rekonfiguracije.

Nakon rekonfiguracije druge test mreže dobijaju se gubici 203,1 kW [4] i 98,6174 kW [7]. Primjena BPSO algoritma i na drugu test mrežu daje poboljšanje u odnosu na metode iz literature u vidu dobijanja manjih gubitaka aktivne snage. Ukupni gubici aktivne snage i minimalna vrijednost napona u

drugoj test mreži nakon rekonfiguracija pomoću TOPO modula programskog paketa DIgSILENT iznose redom 99,5740 kW i 0,9428 r.j. Poboljšanje BPSO algoritma u odnosu na TOPO modul sa stanovišta ukupnih gubitaka aktivne snage je 0,97 %, uz napomenu da je vrijeme izvršavanja rekonfiguracije u DIgSILENT-u reda 2 sekunde.

Osim poboljšanja u vidu manjih gubitaka za obje test mreže, BPSO algoritam u odnosu na DIgSILENT daje poboljšanje i u većoj minimalnoj vrijednosti napona u mreži nakon rekonfiguracije.

VI. ZAKLJUČAK

Na osnovu dobijenih rezultata potvrđeno je da rekonfiguracijom mreže možemo izvršiti značajna poboljšanja kao što su smanjenje ukupnih gubitaka u mreži, smanjenje opterećenja vodova, popravljanje naponskog profila mreže, itd. Poređenjem rezultata rekonfiguracije dobijenih BPSO algoritmom i programskim paketom DIgSILENT zaključujemo da se primjenom BPSO algoritma dobijaju manji ukupni gubici aktivne snage. Pri tom se mora imati u vidu da svaka izmjena topologije mreže zahtijeva promjenu stanja prekidača, što skraćuje njihov životni vijek, odakle se zaključuje da nema smisla vršiti rekonfiguraciju ukoliko je ostvarljivo poboljšanje malo.

LITERATURA

- [1] 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.
- [2] 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, December 2014.
- [3] D. Shirmohammadi, H. W. Hong, "Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 2, p. 1492 – 1498, April 1989.
- [4] H. D. de M. Braz, B. A. de Souza, "Distribution Network Reconfiguration Using Genetic Algorithms With Sequential Encoding: Subtractive and Additive Approaches," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 2, p. 582 – 593, May 2011.
- [5] J. C. López, M. Lavorato, M. J. Rider, "Optimal reconfiguration of electrical distribution systems considering reliability indices improvement," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 78, pp. 837-845, June 2016.
- [6] 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.
- [7] S. A. Taher, M. H. Karimi, "Optimal reconfiguration and DG allocation in balanced and unbalanced distribution systems," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 5, no. 3, p. 735 – 749, September 2014.
- [8] 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.
- [9] O. Badran, S. Mekhilef, W. Dahalan, "Optimal reconfiguration of distribution system connected with distributed generations: A review of different methodologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, p. 854–867, June 2017.
- [10] A. A. Zazou, E. Grolleau, E. Chevrier, P. Richard, J. P. Gaubert, L. Bellatreche, "Power distribution network reconfiguration based on min-cost flow problem," in *2016 IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Poitiers, France, 19-21 July 2016.
- [11] 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, p. 137 – 145, July 2012.
- [12] X. Meng, L. Zhang, P. Cong, W. Tang, X. Zhang, D. Yang, "Dynamic reconfiguration of distribution network considering scheduling of DG active power outputs," in *2014 International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, Chengdu, China, 20-22 October 2014.
- [13] 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," *IEEE Transactions On Power Systems*, vol. 27, no. 2, p. 968–974, May 2012.
- [14] N. Gupta, A. Swarnkar, K. R. Niazi, "A modified branch-exchange heuristic algorithm for large-scale distribution networks reconfiguration," in *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, CA, USA , 22-26 July 2012.
- [15] E. M. Carreno, R. Romero; A. P. Feltrin, "An Efficient Codification to Solve Distribution Network Reconfiguration for Loss Reduction Problem," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 4, p. 1542 – 1551, September 2008.
- [16] L. C. Daniel, I. H. Khan, S. Ravichandran, "Distribution Network Reconfiguration For Loss Reduction Using Ant Colony System Algorithm," in *2005 Annual IEEE INDICON*, Chennai, India, India , 11-13 December 2005.
- [17] J. Kennedy, R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *IEEE International Conference on Neural Networks, 1995*, Perth, WA, Australia, 27 November-1 December 1995.
- [18] D. Šošić, V. Bećejac, "Rekonfiguracija distributivne mreže primjenom metode jednostrukog zatvaranja petlji," in *INFOTEX 2016, Jahorina, Bosna i Hercegovina, March 2016*
- [19] 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 , 12-15 October 1997.
- [20] DIgSILENT Power Factory 15 User Manual, DIgSILENT GmbH, Gomaringen Germany, 2014.

ABSTRACT

The paper analyzes the possibility of application of Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) algorithm for determining the optimal distribution network configuration with the aim of active power minimization. The algorithm is tested on the IEEE standard 33-bus and 69-bus radial distribution networks. In order to verify the efficiency of the algorithm, the results obtained by using BPSO method are compared to the results achievable by other heuristic and metaheuristic methods as well as the results generated by DIgSILENT software module for optimal reconfiguration.

IMPLEMENTATION OF BPSO ALGORITHM FOR OPTIMAL RECONFIGURATION OF THE DISTRIBUTION NETWORK

Bojan Erceg, Čedomir Zeljković