

UPOREDNA ANALIZA HEURISTIČKIH METODA REKONFIGURACIJE DISTRIBUTIVNIH MREŽA

D. ŠOŠIĆ, Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, Srbija
P. STEFANOV, Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, Srbija

SAŽETAK

U procesu implementacije inteligentnih merenja u eksploataciji distributivnih mreža postepeno sve veći broj različitih podataka postaje dostupan. Takođe se, kroz automatizaciju uvodi i sve veći broj daljinski kontrolisanih rasklopnih uređaja koji mogu da se koriste za obezbeđivanje rezervnog napajanja potrošača u slučaju kvara na komponentama mreže ili za optimalnu rekonfiguraciju distributivne mreže u normalnim radnim uslovima. Da bi se zahtevana rekonfiguracija uspešno obavljala u realnom vremenu potrebno je izabrati dovoljno brz algoritam koji efikasno prevodi uklopno stanje sistema u stanje blisko optimalnom prema usvojenom optimizacionom kriterijumu sa što manje zahteva za prekidačkim operacijama. Predlog različitih algoritama je u literaturi prikazan kroz analizu adekvatnih kriterijuma, korišćenjem različitih heurističkih i metaheurističkih optimizacionih procedura. U ovom radu je u cilju što boljeg sagledavanja stanja primenjivanih metoda i analize njihovog daljeg prilagođavanja zahtevima eksploatacije savremenih distributivnih mreža izvršeno upoređivanje više heurističkih metoda koje se bave rekonfiguracijom simetričnih distributivnih mreža sa ciljem redukcije gubitaka aktivne snage. Svi algoritmi su testirani na standardnoj simetričnoj IEEE 33 test distributivnoj mreži kojoj je dodat manji broj grana u cilju formiranja slabo-upetljane mreže.

Ključne reči: rekonfiguracija, distributivne mreže, smanjenje gubitaka, heurističke metode.

UVOD

Većina distributivnih mreža se projektuje da rade kao radijalne mreže, a sve zbog zahteva efikasne koordinacije zaštite pojedinih elemenata mreže. Distributivni izvodi pored ostalih elemenata sadrže i određeni broj normalno zatvorenih (sekcionih) i normalno otvorenih (poveznih) prekidača. U prisustvu kvara, neki od sekcionih prekidača će se otvoriti u cilju izolovanja dela izvoda koji je obuhvaćen kvarom. U isto vreme, određeni broj poveznih prekidača će se zatvoriti u cilju prebacivanja dela ili celokupne izolovane potrošnje na druge izvode ili na druge grane istog izvoda. Zahtevani algoritmi rekonfiguracije u ovom slučaju treba da obezbede maksimalnu restauraciju napajanja, uz obezbeđenje tehnički izvodljivog i ekonomski prihvatljivog rada distributivne mreže. Posle otklanjanja kvara svi prekidači će se vratiti u svoje normalno radno stanje.

U normalnim radnim režimima ovi prekidači se mogu koristiti za periodičnu rekonfiguraciju distributivne mreže u cilju povećanja pouzdanosti mreže, smanjivanja gubitaka aktivne snage ili za balansiranje potrošnje. Procenjeno je da se od ukupne proizvodnje električne energije, ne računajući ilegalno preuzimanje električne energije, od 5% do

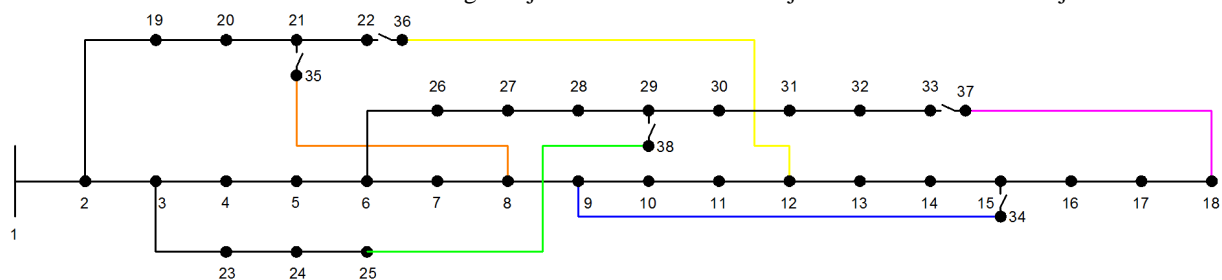
13% troši na gubitke u distributivnoj mreži [1], tako da problem rekonfiguracije i danas ima istaknuti značaj u eksploataciji distributivnih mreža.

Kao rezultat rekonfiguracije može se desiti da se celokupna potrošnja izvoda, ili jedan njen deo, prebaci na drugi izvod pomoću zatvaranja odgovarajućih poveznih prekidača i otvaranja odgovarajućih sekcionih prekidača. Međutim, prema navedenim zahtevima relejne zaštite, odnosno ograničenja opteretivosti elemenata mreže pri potencijalnim kvarovima, manipulacije ovih prekidača moraju da budu usklađene tako da se očuva radijalna struktura distributivne mreže.

Sa druge strane, čak i za relativno male distributivne mreže broj nezavisnih prekidačkih operacija je toliko veliki da bi sprovođenje proračuna tokova snaga za svaku izvodljivu kombinaciju postalo nepraktično i neprihvatljivo i za primene u postupku planiranja. U stručnoj literaturi postoji više heurističkih metoda koje se koriste za rekonfiguraciju distributivne mreže [2-10]. Heurističke tehnike su zapravo optimizacioni procesi za nalaženje rešenja upotrebom karakteristika sistema, koje mogu biti definisane pomoću odgovarajućih koeficijenata. Ovi koeficijenti mogu da budu jednostavni (dobijeni na osnovu slobodnog nahođenja ili iskustva autora) ili sa druge strane mogu da se zasnivaju na rešavanju složenih problema pomoću analize osetljivosti potpunog ili uprošćenog matematičkog modela. Detaljna obrazloženja algoritama [2-7] su data u drugom poglavlju, dok je u [8] zajedno sa problemom rekonfiguracije rešavan i problem simetriranja potrošnje. Rekonfiguracija primenom metode u kojoj se postepeno zatvaraju povezni prekidači i otvaraju oni sekcioni prekidači u posmatranoj petlji koji doprinose najvećem smanjivanju gubitaka je predstavljen u [9]. Glavna mana ove metode je potreba za velikim brojem proračuna tokova snaga. Ahmadi i Marti su u [10] rešavali problem rekonfiguracije primenom tehnike minimalnog povezanog grafa.

Poslednjih godina upotreba veštačke inteligencije (neuralne mreže, fuzzy pristup, metaheurističke metode optimizacije) je našla sve veću primenu u rešavanju problema rekonfiguracije distributivnih mreža. Neuralne mreže su potencijalni kandidat za primenu u realnom vremenu zbog velike brzine generisanja rešenja. Međutim, glavni nedostatak ovog pristupa je potreba za velikim brojem „tačnih“ podataka da bi se izvršio dobar trening neuralne mreže, pri čemu moraju da se obuhvate i sve moguće promene koje mogu nastati u posmatranoj distributivnoj mreže. Jedna od mogućih primena neuralnih mreža je lokalno upravljanje poveznim prekidačima u cilju smanjivanja gubitaka [11]. Fuzzy pristup je našao primenu i u heurističkim [12] i u metaheurističkim [13] metodama kada je potrebno uvažiti nepouzdanost podataka. Optimizacione metode mogu da generišu rešenja koja nisu zavisna od početnog uklopnog stanja distributivne mreže. Neki od predstavnika ove grupe su genetic algorithm [14], particle swarm optimization [15], tabu search [16]. Jedan od većih nedostataka ovog pristupa je veoma dugo vreme izvršavanja proračuna što ograničava primenu ovih metoda samo na planerski deo.

U ovom radu će na mreži od 38 čvorova slika 1, standardna IEEE 33 distributivna mreža sa dodatnim granama, biti testirano više heurističkih metoda za rekonfiguraciju distributivne mreže koje su analizirane u stručnoj literaturi.



Slika 1. IEEE 33 simetrična distributivna mreža

OPIS METODA

Sušтина heurističkih algoritama je da se maksimalnim poznavanjem fizike problema na najkraći način dođe do kvalitetnih radijalnih konfiguracija. Heuristički algoritmi se mogu podeliti u tri grupe:

1. Algoritmi postepenog dodavanja grana,
2. Algoritmi otvaranja petlji,
3. Algoritmi izmene grana.

Metoda postepenog dodavanja grana

U cilju pronalaženja konfiguracije distributivne mreže koja će imati najmanje gubitke Bayat je u [7] razvio metodu koja se zasniva na postepenom dodavanju grana. Pre opisa samog algoritma potrebno je dati definicije pojmova koji će se koristiti u samom algoritmu:

- Primarni čvor predstavlja čvor iz koga se vrši napajanje ostatka distributivne mreže.
- Glavni čvorovi – u ovu grupu spadaju čvorovi koji su već ušli u podstablo posmatrane distributivne mreže.
- Čvorovi kandidati su oni čvorovi koji su direktno povezani sa glavnim čvorovima.
- Podstablo, pod ovim pojmom se podrazumeva deo cele distributivne mreže koji sadrži primarni čvor, sve glavne čvorove, čvorove kandidate kao i grane koje ih spajaju.
- Čvorovi blizanci, tokom postepenog proširenja podstabla distributivne mreže, kada se formira petlja pojaviće se dva identična čvora u skupu čvorova kandidata. Pojavljivanje ovih čvorova u skupu čvorova kandidata će biti signal kada treba otvoriti neki prekidač.

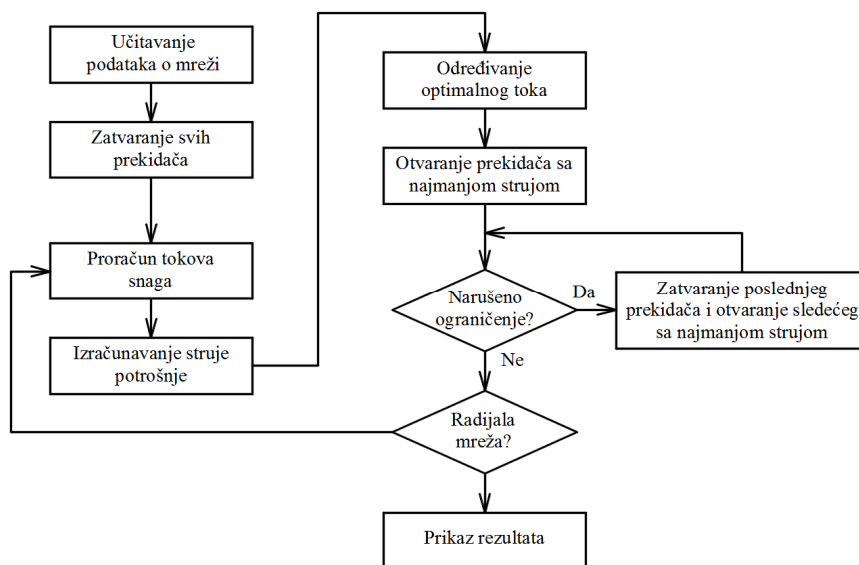
Algoritma kreće od jednog čvora koji je ujedno i glavni čvor. Dalji tok algoritma je dat u nastavku:

1. Potrebno je učitati podatke primarnog podstabla.
2. Uraditi proračun tokova snaga za posmatranu mrežu definisanu trenutnim podstablom. **Ako postoje čvorovi blizanci**, između dva čvora blizanca zadržava se onaj sa većim modulom napona. Dugim rečima grana na čijem se kraju nalazi blizanac čvor sa manjim modulom napona se otvara u cilju zadržavanja radijalne strukture distributivne mreže. Izbačenu granu je potrebno sačuvati u posebnom registru. Takođe je potrebno u posebnom registru sačuvati susedne grane sa obe strane izbačene grane usmerene ka primarnom čvoru. **U suprotnom** preći na sledeći korak.
3. Pronaći čvor iz skupa kandidata sa najvećim naponom, (neka je to čvor m).
4. Dodati čvor m u skup glavnih čvorova.
5. U skup kandidata je potrebno dodati one čvorove koji se direktno napajaju iz čvora m .
6. Ako postoji otvoreni prekidač u posmatranom podstابلu, tj. ako je postojala petlja, izvršiti zamenu grana. Menjaju se samo one grane koje su smeštene u posebne registre. Cilj ove provere je nalaženje konfiguracije sa manjim gubicima. U slučaju da se pomenutom zamenom grana javi stanje distributivne mreže sa manjim gubicima potrebno je ažurirati odgovarajuće skupove. U suprotnom, ako se razmenom grana ne postiže nikakvo poboljšanje potrebno je odmah preći na naredni korak.
7. Ako ima još čvorova koji nisu obrađeni vratiti se na drugi korak algoritma, u suprotnom izvršiti proračun tokova snaga i završiti ceo postupak.

Algoritam otvaranja petlji

Najmanja struja. Ovo je najstarija metoda koja process rekonfiguracije započinje sa upetljanom mrežom. Autori su u [4] za predstavljanje potrošnje usvojili model konstantne snage. Proces započinje zatvaranjem svih prekidača, kako sekcioni tako i povezanih, i formiranja slabo-upetljane mreže. Za ovakvu mrežu neophodno je izvršiti AC proračun tokova snaga da bi se dobili naponski profili u mreži. Sa ovako izračunatim naponima potrebno je izračunati struje injektiranja u čvorovima u kojima se nalaze potrošači. Nakon ovoga je neophodno zanemariti reaktivne elemente i ponoviti proračun tokova snaga sa poznatim strujama injektiranja i rezistivnim elementima mreže. Grana kroz koju teče najmanja struja izračunata na ovaj način predstavlja kandidata za otvaranje petlje. U slučaju da je neko od ograničenja narušeno otvaranjem razmatranog prekidača, taj prekidač je potrebno zatvoriti a otvara se sledeći prekidač preko koga teče najmanja struja. Celokupan opisani postupak se ponavlja sve dok se ne formira radijalna struktura distributivne mreže. Detaljan tok algoritma je prikazan na slici 2.

Najmanji pad napona. Ova metoda pripada grupi algoritma kod koje proces rekonfiguracije započinje zatvaranjem svih sekcioni prekidača [6]. Algoritam se dalje nastavlja sa ovako izračunatim tokom struja po granama distributivne mreže. Drugim rečima, nije potrebno ponovno izračunavanje struja po granama kada u mreži postoje samo rezistivni elementi kao što je bio slučaj sa prethodnom metodom. Potrebno je izračunati padove napona na svim granama petlji, i ona grana koja ima najmanji pad napona, odnosno najmanje $|R_b J_b|$ (gde su R_b aktivna otpornost posmatrane grane, a J_b struja koja teče po posmatranoj grani), postaje kandidat za otvaranje. U slučaju narušavanja nekog ograničenja, kao što su termalna ograničenja, poslednji otvoreni prekidač se zatvara a otvara se onaj prekidač koji se nalazi na grani sa sledećim najmanjim padom napona. Opisani proces se nastavlja sve dok distributivna mreža ne postane radijalna.



Slika 2. Metoda otvaranja petlje

Indeks odluke. Za razliku od prethodne dve opisane metode koje su za kriterijum po kome će se otvoriti neki sekcioni prekidač koristili fizičku veličinu (struju po grani petlje ili pad napona u posmatranoj petlji) u [5] autori su kreirali indeks prekidanja koji se izračunava za svaku granu petlje. Odluka o izboru grane koja će se isključiti donosi se na osnovu poznavanja naponskih profila u mreži kao i na osnovu vrednosti impedansi samih grana distributivne mreže. Za svaku granu petlje prvo je potrebno izračunati naponski indeks (μ_v) koji se računa pomoću izraza (1).

$$\mu_v(n) = \exp\left(-\omega(\Delta V_n)^2 / \Delta V_{sr}^2\right), \quad (1)$$

gde su ΔV_n pad napona na grani n koja spaja čvorove i i j , ΔV_{sr}^2 srednji kvadratni pad napona svih grana odabrane petlje dok je ω težinski faktor čije će izračunavanje biti objašnjeno kasnije. Drugi indeks koji je potrebno izračunati za svaku granu petlje je omski indeks koji se dobija upotrebom izraza (2).

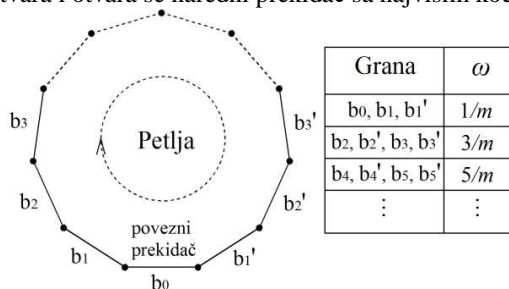
$$\mu_L(n) = \exp\left(-\omega R_n |Y_n|^2 / R_{sr} |Y_{sr}|^2\right), \quad (2)$$

gde su R_n i R_{sr} aktivna otpornost grane i srednja vrednost otpornosti grana petlje. $|Y_n|$ je moduo admitanse posmatrane grane dok je $|Y_{sr}|$ moduo srednje vrednosti admitanse cele petlje. I u ovom izrazu ω predstavlja težinski faktor čije se određivanje najlakše može objasniti pomoću slike 3. Zatvaranjem poveznog prekidača za svaki sekcioni prekidač se računaju posebni težinski faktori u zavisnosti od međusobne udaljenosti posmatranog sekcionog prekidača i poveznog prekidača. Ako postoji m prekidača u petlji težinski faktor poveznog i dva susedna sekciona prekidača iznosi $1/m$. Težinski faktor za naredne dve grane sa obe strane poveznog prekidača (b_2, b_2', b_3 i b_3') je isti i iznosi $3/m$. Opisani postupak dodeljivanja težinskih faktora se nastavlja dokle god ima grana u petlji.

Na kraju se izračunava indeks na osnovu koga se donosi konačna odluka. Ovaj indeks se dobija množenjem prethodna dva indeksa, odnosno

$$\mu_D(n) = \mu_v(n) \cdot \mu_L(n). \quad (3)$$

Sekcioni prekidač koji ima najveću vrednost indeksa odluke (μ_D) će se otvoriti. I kod ovog algoritma je potrebno vršiti proveru da li odabrana prekidačka akcija narušava neko ograničenje. U slučaju povrede nekog ograničenja poslednji otvoreni prekidač se zatvara i otvara se naredni prekidač sa najvišim koeficijentom μ_D .



Slika 3. Težinski faktori u petlji

Metode razmene grana

Kompenzaciona metoda. Goswami i Basu su u [2] problem rekonfiguracije rešavali postepenom razmenom grana. Cilj algoritma je da radi samo sa radijalnom mrežom, dok se primenom kompenzacione metode nalaze struje i naponi u upetljanoj mreži. Rezultati algoritma veoma zavise od načina izbora povezanih prekidača koji će se zatvoriti. Detaljna analiza za više kriterijuma odabira povezanih prekidača je prikazana u [17]. Najbolji rezultati su se postizali kada je izbor vršen na osnovu maksimalne visine napona na krajevima povezanih prekidača. U daljem tekstu je opisan tok algoritma:

1. Izvršiti proračun tokova snaga u radijalnoj mreži.
2. Odrediti koji će se od normalno otvorenih prekidača zatvoriti da bi se formirala petlja.
3. Uvažiti promene u tokovima snaga koje su nastale usled zatvaranja poveznog prekidača. Usvojen je model potrošnje sa konstantnom snagom, što praktično znači da se mogu iskoristiti struje injektiranja iz poslednje iteracije backward/forward proračuna sa suprotnim znakom. Struja kroz tek zatvorenu granu (prekidač) se računa iterativno. Za izračunavanje ove struje potrebno je poznavati impedansu posmatrane petlje.

- Struja grane ij se računa pomoću sledećeg izraza

$$I_{ij} = (V_i - V_j) / Z_{petlja} \quad (4)$$

- Izračunavanje struje po granama petlje od napojnog čvora do čvora i , je dato izrazom

$$I_{q0-i} = I_{q0-i \text{ staro}} - I_{ij} \quad (5)$$

- Izračunavanje struje po granama petlje od napojnog čvora do čvora j , je dato izrazom

$$I_{m-j} = I_{m-j \text{ staro}} - I_{ij} \quad (6)$$

$I_{q0-i \text{ staro}}$ i $I_{m-j \text{ staro}}$ u prvoj iteraciji su struje po odgovarajućim granama koje su izračunate pomoću proračuna tokova snaga

- Sa ovako izračunatim strujama potrebno je izračunati napone u čvorovima duž petlje uz pretpostavku da je napon u napojnom čvoru ostao nepromenjen. Napon u čvoru i je potrebno izračunati sa obe strane (V_i' i V_i''). Ako je razlika ova dva napona manja od unapred definisane vrednosti zaustavlja se proračun, u suprotnom se ide na sledeću tačku.
- Izračunati inkrementalnu struju koja se dodaje struji I_{ij}

$$\Delta I_{ij} = (V_i' - V_i'') / Z_{petlja} \quad (7)$$

Posle ovoga proračun se vraća na prvu tačku i iteracije se nastavljaju dokle god se ne zadovolji kriterijum konvergencije iz prethodne tačke.

4. Izračunavanje struja kroz bočne grane pomoću novih napona.

- Određivanje napona na drugom kraju ogranka. Za primer sa slike 4 a) važi sledeći izraz:

$$U_{q5} = U_{q0} - J_{q5-q0} \cdot Z_{q5-q0} \quad (8)$$

- Određivanje struje potrošnje za novu vrednost napona:

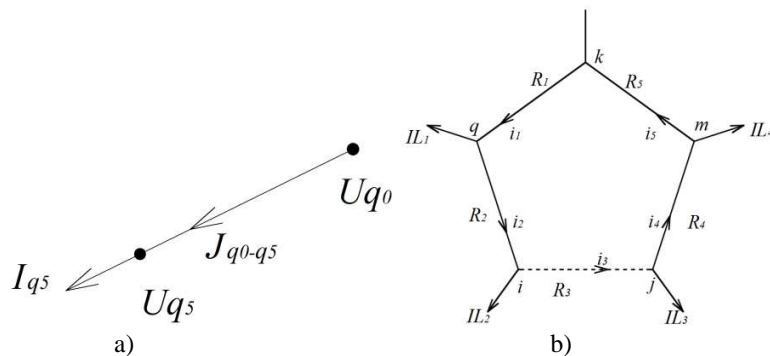
$$I_{q5} = (S_{q5}^{spec} / U_{q5})^* \quad (9)$$

pri čemu je sada S_{q5}^{spec} snaga potrošnje a ne snaga injektiranja.

- Određivanje struje po grani $q5-q0$.

$$J_{q5-q0} = I_{q5} \quad (10)$$

Ova jednačina važi kada je čvor $q5$ poslednji u nizu, ali ako ovaj čvor napaja još neke čvorove tada je potrebno



Slika 4 a) Ogranak mreže, b) Petlja

uvažiti i struje grana koje potiču iz tog čvora pri čemu se usvaja da ove struje ostaju nepromenjene.

- Izračunavanje promene napona u čvoru $q0$.

$$U'_{q0} = U_{q5} + J_{q0-q5} \cdot Z_{q5-q0}. \quad (11)$$

- Ako je $U'_{q0} - U_{q0} < \varepsilon$ postupak se završava, u suprotnom se vraća na prvu tačku.
5. Određivanje optimalnih tokova snaga pomoću I i II Kirhofovog zakona. Na slici 4 b) su struje po granama označene malim slovima (i_1, \dots, i_5), dok su sa IL_1, \dots, IL_4 označene struje odcepa na koje se dodaju vrednosti struja potrošnje čvorova petlje. Nakon izračunavanja struja i pomoću izraza (12) otvara se grana kroz koju teče najmanja struja i .

$$\begin{bmatrix} R_1 & R_2 & R_3 & R_4 & R_5 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ IL_1 \\ IL_2 \\ IL_3 \\ IL_4 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

6. Uraditi proračun tokova snaga za novu konfiguraciju distributivne mreže da bi u narednoj iteraciji postupak kompenzacije bio tačniji. Zatvoriti narednu petlju i vratiti se na korak 3. U slučaju da su ispitane sve petlje ili ako zatvaranje/otvaranje novih prekidača dovodi do povećanja gubitaka završiti proračun.

Aproksimativno smanjivanje gubitaka. Ovaj algoritam takođe spada u III grupu i baziran je na aproksimativnim relacijama kojima se procenjuje promena vrednosti kriterijumske funkcije kada dva rasklopna uređaja, jedan povezni i jedan sekcioni prekidač, promene statusa uključenosti [3]. Osnovna prednost ovog algoritma je u njegovoj efikasnosti, koja je bazirana na činjenici da nije potrebno računati celokupni režim nakon promene statusa uključenosti razmatranog para prekidača. Osnovni nedostatak ovih algoritama je da se njihovom primenom dobija konačno rešenje koje zavisi od početnog radnog režima distributivne mreže, odnosno, kao rešenje se dobija lokalni minimum. Algoritma se zasniva na upotrebi jednačine:

$$\Delta P_g = 2 \cdot \operatorname{Re} \left\{ (J_p)^* \cdot (\Delta V_i - \Delta V_j) \right\} - |J_p|^2 \cdot R_{petlje}, \quad (13)$$

gde je R_{petlje} aktivna otpornost petlje koja se formira zatvaranjem posmatranog poveznog prekidača. ΔV_i i ΔV_j su naponi na krajevima prekidača u radikalnoj konfiguraciji, a izračunavaju se kao suma proizvoda otpornosti i struje grana posmatrane polupetlje. J_p je struja grane dela polupetlje čije se prebacivanje razmatra. Ako bi se posmatralo prebacivanje čvor i sa leve polupetlje na desnu, slika 4 b), u izrazu (13) struja J_p bi bila i_2 . Sledi opis toka algoritma:

1. Učitati bazno stanje posmatrane mreže.
2. Za svaki povezni prekidač izračunati sve moguće promene kriterijumske funkcije prouzrokovane otvaranjem spregnutih sekcionih prekidača. Pod spregnutim prekidačima podrazumeva se onaj par poveznog i sekcionog prekidača čijom se izmenom mesta zadržava radikalna struktura i napajanje svih čvorova u mreži.
3. Pronaći onu kombinaciju koja doprinosi najvećem poboljšanju kriterijumske funkcije. Ako postoji takva prekidačka akcija ići na sledeći korak, u suprotnom ići na korak 6.
4. Izvršiti promenu uklopnog stanja distributivne mreže.
5. Izvršiti proračun tokova snaga i vratiti se na korak 2.
6. Završiti proračun.

REZULTATI

Opisani algoritmi su testirani na standardnoj IEEE 33 simetričnoj distributivnoj mreži [8]. Svi programi su urađeni u MATLAB-u na $i5$ procesorskom računaru sa 4 GB memorije.

Kod prve i treće grupe algoritama posmatra se samo radikalna struktura distributivne mreže i kod ovih metoda je izbegnut rad sa slabo-upetljanom mrežom. Gubici aktivne snage za bazno stanje mreže iznose 202,68 kW. Sve metode iz druge grupe polaze od pretpostavke da je mreža upetljana, tj. da su sve grane u pogonu. U ovakvom režimu bi se imali najmanji gubici u mreži, 123,29 kW, međutim ovakvo stanje mreže, kao što je ranije navedeno, nije prihvatljivo.

U tabeli 1 su prikazani rezultati algoritama iz prve dve grupe. Pored toka promene gubitaka u tabeli 1 su prikazane i prekidačke opcije koje su prouzrokovale ovu promenu. Zbog samog toka algoritma dodavanja grana gubici

TABELA 1 – REZULTATI ALGORITAMA PRVE I DRUGE GRUPE

Dodavanje grana			Najmanja struja			Najmanji pad napona			Indeks odluke		
P_{gub} (kW)	Otvorene grane	t (s)	P_{gub} (kW)	Otvorene grane	t (s)	P_{gub} (kW)	Otvorene grane	t (s)	P_{gub} (kW)	Otvorene grane	t (s)
139,55	7-8	2,69 (0,79)	123,26	10-11	1,73	123,26	10-11	2,40	123,68	32-33	1,97
	9-10		123,84	15-14		123,65	32-33		137,69	21-22	
	14-15		124,24	32-33		214,24	14-51		151,91	6-7	
	25-29		125,28	7-8		131,53	6-7		152,11	14-15	
	32-33		140,28	25-38		162,16	6-26		164,58	25-38	

TABELA 2 – REZULTATI ALGORITAMA TREĆE GRUPE

Kompenzaciona metoda				Aproksimativno smanjivanje gubitaka			
P_{gub} (kW)	Zatvorene grane	Otvorene grane	t (s)	P_{gub} (kW)	Zatvorene grane	Otvorene grane	t (s)
156,78	36-22	12-11	1,02	153,49	36-22	8-9	0,49
152,66	38-29	27-26		147,02	34-21	6-7	
				145,04	8-9	12-11	
				144,41	37-33	32-33	

postepeno rastu sa svakom dodatom granom. Zbog većeg broja podataka za ovu metodu su dati samo konačni gubici aktivne snage. Kao što se može videti jedino kod ove metode postoje dva vremena izvršenja proračuna. Veće vreme (2,69 s) predstavlja vreme izvršavanja algoritma bez ikakvih modifikacija. Vreme u zagradi (0,79 s) odnosi se na isti algoritam ali sa uvedenom izmenom. Izbacivanjem šestog koraka iz algoritma više nije potrebno vršiti dodatne proračune tokova snaga radi provere stanja mreže posle izmene grana. Uvažavanjem ove ispravke dobili su se isti rezultati ali za znatno kraće vreme izvršavanja samog proračuna.

Jedna od najstarijih metoda je metoda najmanjih struja pomoću koje se dobijaju dovoljno dobri rezultati u poređenju sa prvom metodom. Druge dve metode iz druge grupe algoritama, koje su opisane u ovom radu, su znatno mlađe i inspiraciju su našle u metodi najmanjih struja. Međutim iz priloženih rezultata se jasno vidi da oba algoritma daju lokalni minimum koji je lošiji od rezultata prve metode.

U tabeli 2 su dati rezultati metoda iz treće grupe. Za razliku od prethodnih metoda kod kojih su postepeno dodavane grane mreže ili koje su kretale od upetljane strukture, ove metode rade sa zadatim uklopnim stanjem distributivne mreže. U cilju izbegavanja složenih proračuna sa upetljenim mrežama prva metoda pribegava kompenzaciji posmatranog stanja, dok se kod druge metode izbor grane koja će se otvoriti donosi na osnovu aproksimativnih koeficijenata, izraz (13). Zbog odabranog kriterijuma za odabir poveznih prekidača, maksimalna razlika napona na krajevima poveznog prekidača, kompenzacioni algoritam nije u stanju da nađe bolje rešenje posle druge iteracije pošto bi svaka dalja razmena grana dovela do povećanja gubitaka. Iz rezultata druge metode se može videti da se zbog trenutnog stanja u mreži prvo izbacuje grana između čvorova 8 i 9, da bi se kasnije zbog drugih promena koje su nastale vratila pošto je pronađeno bolje uklopno stanje. Ova metoda je dala rešenje koje je veoma blisko, sa stanovišta gubitaka aktivne snage, metodi postepenog dodavanja grana koja se pokazala kao najbolja. I druga metoda iz treće grupe se zaustavlja kada više ne postoji mogućnost smanjivanja gubitaka aktivne snage razmenom grana.

Posmatranjem priloženih rezultata može se uočiti da izmenjena verzija metode postepenog dodavanja grana daje najbolja rešenja za prihvatljivo vreme izračunavanja. Ako bi se iskoristili podaci dobijeni iz poslednjeg proračuna tokova snaga za novonastalo uklopno stanje posle dodavanja grane umesto kretanja proračuna od početka (flat start) pomenuti algoritam bi brže stizao do konačnog rešenja.

ZAKLJUČAK

Rekonfiguracija distributivne mreže može da doprinese značajnim uštedama kroz smanjivanje gubitaka aktivne snage. Usled prisustva sve većeg broja merenja u distributivnoj mreži javlja se potreba za efikasnom metodom rekonfiguracije u realnom vremenu. Zbog svoje prirode neuralne mreže bi se nametnule kao prirodno rešenje ali je za njihovo pravilno treniranje potreban veliki broj tačnih podataka za sva moguća uklopna stanja koja mogu nastati, u suprotnom bi se dobila neprihvatljiva rešenja. Dobre optimizacione metode mogu da nađu globalno rešenje ali se ne mogu primeniti u realnom vremenu zbog velike dužine izračunavanja. Zbog toga se kao najefikasnije nameću heurističke metode. U ovom radu je vršeno upoređivanje više heurističkih metoda rekonfiguracije na standardnoj

simetričnoj IEEE 33 test mreži u cilju smanjivanja ukupnih gubitaka aktivne snage. Rezultati su pokazali da se metoda koja se bazira na postepenom dodavanju grana, sa malim izmenama, može koristiti u realnom vremenu. Pronalaženje heurističke metode rekonfiguracije (simetrične distributivne mreže) koja daje najbolja rešenja u pogledu gubitaka aktivne snage uz prihvatljivo vreme izvršavanja proračuna je bio cilj ovog istraživanja. Dalji istraživanje u ovoj oblasti će biti usmereno ka primeni algoritma postepenog dodavanja grana na neuravnoteženu nesimetričnu distributivnu mrežu.

ZAHVALNICA

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

LITERATURA

- [1] Wagner T P, Chikhani A Y and Hackam R, 1991, "Feeder reconfiguration for loss reduction an application of distribution automation", "IEEE Transactions on Power Systems", "6", 1922-1933
- [2] Goswami S K and Basu S K, 1992, "A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization", "IEEE Transactions on Power Delivery", "7", 1484-1491
- [3] Popović D, Bekut D and Treskanica V, 2004, "Specijalizovani DMS algoritmi", "DMS Group "
- [4] Shirmohammadi D and Hong H W, 1989, "Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction", "IEEE Transactions on Power Delivery", "4", 1492-1498
- [5] Lin W-M and Chin H-C, 1998, "A New Approach for Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction and Service Restoration", "IEEE Transactions on Power Delivery", "13", 870-875
- [6] Hosseinzadeh F, Alinejad B and Pakfar K, 8-11 June 2009, "A new technique in Distribution Network reconfiguration for loss reduction and optimum operation", "presented at the 2009. CIRED 2009. 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution", Prague, Czech Republic
- [7] Bayat A, 2013, "Uniform voltage distribution based constructive algorithm for optimal reconfiguration of electric distribution networks", "Electric Power Systems Research", "104", 146– 155
- [8] Baran M E and Wu F F, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing", "IEEE Transactions on Power Delivery", "4", 1401-1407
- [9] Horvat M, Voršič J and Škerbinek G, 11-16 April 1999, "Reduction of active losses with reconfiguration of electricity distribution networks", "presented at the 1999 IEEE Transmission and Distribution Conference", New Orleans, USA
- [10] Ahmadi H and Martí J R, 2015, "Minimum-loss network reconfiguration: A minimum spanning tree problem", "Sustainable Energy, Grids and Networks", "1", 1–9
- [11] Augugliaro A, Dusonchet L, Ippolito M G and Sanseverino E R, 2003, "Minimum Losses Reconfiguration of MV Distribution Networks Through Local Control of Tie-Switches", "IEEE Transactions on Power Delivery", "18", 762–771
- [12] Bernardon D P, Garcia V J, Ferreira A S Q and Canha L N, 2010, "Multicriteria Distribution Network Reconfiguration Considering Subtransmission Analysis", "IEEE Transactions on Power Delivery", "25", 2684–2691
- [13] Syahputra R, Robandi I and Ashari M, 8 November 2014, "Optimal Distribution Network Reconfiguration with Penetration of Distributed Energy Resources", "presented at the 2014 1st International Conference on Information Technology, Computer and Electrical Engineering (ICITACEE)", Semarang, Indonesia
- [14] Bahadoorsingh S, Milanović J V, Zhang Y, Gupta C P and Dragović J, 2007, "Minimization of Voltage Sag Costs by Optimal Reconfiguration of Distribution Network Using Genetic Algorithms", "IEEE Transactions on Power Delivery", "22", 2271–2278
- [15] Tuladhar S R, Singh J G and Ongsakul W T, 19-21 March 2014, "A Multi-objective Network Reconfiguration of Distribution Network with Solar and Wind Distributed Generation using NSPSO", "presented at the 2014 International Conference and Utility Exhibition on Green Energy for Sustainable Development (ICUE)", Pattaya, Thailand
- [16] Xu X, Wang C and Feng X, 23-24 May 2009, "A Tabu Search Approach for Distribution Network Reconfiguration Based on GIS", "presented at the 2009 International Workshop on Intelligent Systems and Applications", Wuhan, China
- [17] Šošić D i Bečejac V, 16-18 Mart 2016, "Rekonfiguracija distributivne mreže primenom metode jednostrukog zatvaranja petlji", "presented at the INFOTEH 2016", Jahorina, Bosna i Hercegovina, 51-56