

NOVI PRISTUP REKONFIGURACIJI TROFAZNIH SIMETRIČNIH RADIJALNIH DISTRIBUTIVNIH MREŽA, PRIMENOM METODE SIMULIRANOG KALJENJA (SIMULATED ANNEALING), U SVRHU SMANJENJA GUBITAKA AKTIVNE SNAGE

BRANKO STOJANOVIĆ, TEHNIČKI OPITNI CENTAR, SRBIJA
TOMISLAV RAJIĆ, ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET, SRBIJA

KRATAK SADRŽAJ

Rekonfiguracija mreže se vrši promenom statusa komutacione opreme (prekidači i rastavljači) uglavnom iz dva razloga: smanjenja gubitaka aktivne snage i simetriranja opterećenja vodova i privlači pažnju distributivnih inženjera već duže vremena. U ovom radu prikazana je metoda za smanjenje gubitaka aktivne snage. Pretraživanje izgenerisanih konfiguracija mreže vrši se algoritmom simuliranog kaljenja. Kao pomoć pretraživanju program za proveru povezanosti energetskog sistema sa nametnutim ograničenjem radijalnosti je razvijen i pojačan novim efikasnim algoritmom tokova snaga. Primenjeni efikasni algoritam tokova snaga je efikasan i brz ali može poslužiti samo kao indikacija zbog nedovoljne tačnosti metode. Na kraju algoritma potrebno je pustiti precizni efikasni algoritam tokova snaga da bi se tačno odredili gubici. Analiziran je numerički primer Barana i Wua. Razvijeni metod konvergira ka globalnom optimumu za numerički primer. Vreme egzekucije programa je reda sati i ne zavisi od brzine unošenja podataka za efikasni algoritam tokova snaga. Ova prednost čini metodu privlačnom kako u fazi planiranja tako i kod primene u realnom vremenu. Glavni doprinos ove metode je novi pristup koji koristi najviše sledeće mehanizme: matricu za proveru povezanosti sistema, kriterijum Lavorato et al. za nametanje ograničenja radijalnosti i novi efikasni algoritam tokova snaga kombinovan sa preciznim za tačno sračunavanje gubitaka.

Ključne reči: konfiguracija mreže, gubici aktivne snage, povezanost, radijalna konfiguracija, efikasni algoritam tokova snaga, simulirano kaljenje

SUMMARY

The network reconfiguration is done by changing the status of the switches, mainly for two reasons: an active power loss reduction and load balancing attracting the attention of distribution engineers for quite a long period of time. In this article solving method for the active power loss reduction is given. Searching for the relevant radial configurations is done by a simulated annealing technique. To aid the search, a programme for checking the connectivity of the power system, with imposed radiality constraint, is presented enhanced by a new approximate power flow method. The applied power flow programme is very efficient and fast but can be used only as an indication for the loss estimation because of the insufficient method accuracy. At the end of algorithm it is necessary to run efficient power flow programme to determine the real situation concerning the loss reduction. A numerical example for Baran and Wu network is analyzed. The developed method converges to the global optimum given in a numerical example. The time duration of the used method is of an hour order and does not depend on the fast manipulation of incoming data files. This advantage makes the method interesting in the planning stage as well as the application in real time.

Main contribution of this paper is a novel approach which exploits mostly the following mechanisms: network connectivity checking matrix, Lavorato et al. criterion for imposing radiality constraint and efficient power flow algorithm combined with precise power flow for exact loss calculation.

Key words: network configuration, active power loss, connectivity, radial configuration, power flow algorithm, simulated annealing

UVOD

Rekonfiguracija mreže iznalazi najbolju kombinaciju grana, po jednu iz svake petlje, koje treba isključiti tako da novoformirana radijalna mreža ima minimalne aktivne gubitke. Ovo se postiže promenom statusa sekcionih (normalno zatvorenih) i spojnih (normalno otvorenih) prekidača. S obzirom da je njihov status binaran (otvoreno ili zatvoreno), prostor rešenja je diskontinualan. Zbog diskontinualne i diskretne prirode problema, klasične tehnike su nepodesne i potrebno je primeniti novu globalnu tehniku pretraživanja.

Rekonfiguracija mreže pripada problemima „minimalno razgranatog stabla“ (mreža liči na razgranato stablo) poznatim kao NP kombinatorni optimizacioni problemi. Algoritam treba da ponade konfiguraciju sa minimalnim gubicima uz zadovoljenje sistemskih ograničenja.

Brojne metode postoje u literaturi vezane za rekonfiguraciju radijalnih distributivnih mreža u svrhu smanjenja gubitaka aktivne snage. Algoritam zamene grana je predložen u Civanlar et al. (1) gde je data formula za određivanje promene vrednosti gubitaka zbog zamene grana. U Baran i Wu (2) se izlaže drugačija metoda za zamenu grana korišćenjem heurističnog postupka. Većina ovih metoda počiva na heuristici. Drugo ograničenje ovih algoritama je da oni iznalaze lokalni minimum a ne globalni.

Shirmohammadi i Hong (3) startuju od mreže gde su svi prekidači zatvoreni a onda ih sukcesivno otvaraju da bi izbegli petlje odlučujući koji će prekidač otvoriti nakon primene optimalnog algoritma tokova snaga. Korišćenjem programa DISTOP autori dolaze do interesantnog i tačnog zaključka da su upetljane konfiguracije sa najmanjim gubicima. Upotrebljeni efikasni algoritam tokova snaga zahteva renumeraciju čvorova po nivoima što se netačno rešava kada je broj mogućih konfiguracija veliki.

Glamočanin (4) razvija novi algoritam koji ne zahteva matrice operacije već samo izgradnju mreže od polazne konfiguracije sa nula grana. Analiziraju se mreže sa jednim izvornim čvorom. Iznalaženje optimuma je direktno, održana je radijalna konfiguracija tokom celog procesa izgradnje mreže, naponska i strujna ograničenja se lako ispunjavaju, početna podobna konfiguracija nije potrebna a optimum koji se pronalazi je globalan.

Heuristična metoda je opisana u Borozan et al. (5) za dobijanje optimalne konfiguracije. Usvojen je pristup Merlin-a i Back-a. Brzi i pouzdani novi efikasni algoritam tokova snaga je primenjen za pretraživanje podobnih konfiguracija podesan za realne mreže.

U (6) Borozan i Rajaković predlažu sistematičnu metodu za rešavanje problema rekonfiguracije u svrhu smanjenja gubitaka aktivne snage. Izneta je metodologija u tri dela. Procena opterećenja u realnom vremenu, izgradnja konfiguracije sa minimalnim gubicima i procena troška i koristi. Autori su zaključili da rekonfiguracija na dnevnom nivou u svrhu smanjenja gubitaka aktivne snage nije ekomski opravdana. Ona je opravdana na sezonskom nivou sa malim korekcijama svaki mesec. Planiranjem na ovaj način moguće je mnogo uštedeti na ceni.

Simulirano kaljenje prvi put je primenjeno na rekonfiguraciju u radovima Chiang i Jumeau (7, 8). U njima je ona predstavljena kao nediferencijabilna višestruka funkcija cilja kombinatorijske optimizacije sa ograničenjima.

I autori Jiang i Baldick (9) primenjuju simulirano kaljenje za rešavanje problema rekonfiguracije a diskretni optimizacioni algoritam za postavljanje kondenzatorskih baterija.

Su i Lee (10) koriste simulirano kaljenje i za rekonfiguraciju mreže i za postavljanje kondenzatorskih baterija.

Jeon et al. (11) primenjuju sofisticirani algoritam simuliranog kaljenja (sa posebnim mehanizmom hlađenja i perturbacije) za problem rekonfiguracije složenih mreža. Jeon i Kim (12) koriste kombinovani metod simuliranog kaljenja sa tabu pretraživanjem za minimizaciju gubitaka u distributivnoj mreži.

Rekonfiguracija mreže radi smanjenja gubitaka u hiper konusnom mravljem okruženju (Hyper-Cube Ant Colony Optimization framework) je prezentovana u Carpaneto i Chicco (13).

Skorijih godina razvijaju se evolucionari algoritmi kao što je genetički algoritam (GA) Stojanović M. et al. (14) i predlažu za rešenje problema rekonfiguracije u svrhu smanjenja gubitaka aktivne snage. Struktura izgenerisanih hromozoma mora zadovoljiti radijalnost mreže bez njenog odvajanja (islanding). Problem je utoliko veći jer je vrlo verovatno da genetski operatori mogu narušiti radijalnu prirodu hromozoma.

Samo dva rada Borozan et al. (15) i Zimmerman (16) analiziraju nesimetrične mreže. Borozan razmatra nesimetričnu Skopsku mrežu i primenjuje heuristiku a Zimmerman analizira nesimetričnu mrežu sa 144 grane, 9 normalno otvorenih i 3 spojne metodom simuliranog kaljenja.

U svoj navedenoj literaturi primenjen je softver koji nije prezentovan i to na brzim računarima (Pentium-IV ili jači), naročito kod poslednjih referenci.

Kao kamen temeljac ovog članka upotrebljen je rad Nahmana i Perića (17). Kriterijum provere konektivnosti (dat u delu 2) koji je usavršen i efikasni algoritam tokova snaga koji je modifikovan sledeći osnovne ideje iz (17). Fundamenti algoritma simuliranog kaljenja su pozajmljeni iz magistarskog rada Stojanović B. (18).

Rad je organizovan na sledeći način: u delu 3 ukratko je iznet novi modifikovani efikasni algoritam tokova snaga nazvan Nahman i Perić (za trofazne simetrične distributivne mreže). Napominjemo da je analizirana mreža bez međutransformatora (jednog naponskog nivoa) i sa jednim balansnim čvorom (slack node). U primerima iz literature analiziraju se samo takve mreže (1, 2, 7 i 8). Takođe su zanemarene i otačne admitanse, matrica admitansi nezavisnih čvorova je singularna Heydt (19) što je takođe uobičajeni slučaj iz literature.

Algoritam koji je primenjen i blok dijagram su dati u delu 4.

Numerički rezultati su dati u delu 5. Deo 6 je diskusija sa zaključcima.

Glavni doprinos ovog rada je novi pristup rekonfiguraciji trofaznih simetričnih radijalnih distributivnih mreža koji najviše koristi sledeće mehanizme:

- matricu za proveru konektivnosti mreže,
- kriterijum Lavorato et al. (20) za ispunjenje zahteva radijalnosti,
- efikasni algoritam tokova snaga koji prostom matičnom jednačinom sračunava napone mreže i kombinovan je sa preciznim algoritmom tokova snaga sa renumeracijom čvorova po nivoima,
- generator slučajnih brojeva koji generiše onoliko različitih brojeva koliko ima petlji u mreži (spojnih prekidača),
- homogeni algoritam simuliranog kaljenja sa epohom (18) kao kriterijumom završetka Markovljevog lanca koji je pojačan stopom prihvatanja i klasičnim kriterijumom dužine lanaca i korišćenje grubog pretraživanja što je rezultovalo u primenljivom hibridnom algoritmu.

PROVERA KONEKTIVNOSTI MREŽE

Energetska mreža je povezana ako postoji putanja između bilo koja dva njena čvora. To znači da su svi čvorovi povezani sa izvornim i da se mogu iz njega napajati. Povezanost mreže se lako može proveriti pomoću matrice (NC) definisane kao (19):

$$(NC) = (B)^{(n-1)} \quad (2.1)$$

Gde je n broj čvorova mreže a (B) je $n \times n$ matrica konektivnosti sistema sa elementima $B(i,j)$ jednakim 1 ako postoji vod između čvorova i i j , a 0 u protivnom. Kada je $i=j$ u skladu sa konvencijom u (19) $B(i,j)$ je jednako 1. Mreža je povezana ako su svi elementi matrice (NC) jednaki 1 (19). Aritmetičke operacije u (2.1) su Bulove, što znači:

$$0 + 0 = 0;$$

$$0 + 1 = 1 + 1 = 1;$$

$$0 \cdot 0 = 0;$$

$$1 \cdot 1 = 1.$$

Jedna od primena matrice B je provera da li je distributivni sistem povezan Rajić i Stojanović (21).

Topologija distributivnog sistema se može predstaviti grafom sa m grana i n čvorova (sabirnica) (20). Može se tvrditi da je distributivna mreža radijalna ako ispunjava sledeća dva uslova (20):

1) konfiguracija mora imati ($n-1$) granu;

2) konfiguracija mora biti konektovana.

MODIFIKOVANI EFIKASNI ALGORITAM TOKOVA SNAGA NAHMAN I PERIĆ (17, Stojanović B. et al. 22)

Mnogi problemi vezani za primenu distributivnih mreža kao što su optimizacija, postavljanje kondenzatorskih baterija, regulacija napona, planiranje, restauracija, procena stanja i dr. zahtevaju efikasni algoritam tokova snaga za proračun napona čvorova mreže (struja grana) i gubitaka.

Široko primenjivani je algoritam sa zamenom unazad/unapred gde je prisutno naporno numerisanje čvorova po nivoima. Za svaku novu konfiguraciju potrebno je ponovo renumerisati mrežu i uneti nove ulazne podatke tako da ova metoda nije podesna za dinamičke probleme mreže kao što su rekonfiguracija i ekspanziono planiranje.

Algoritam predložen u ovom članku je novi i klasičan.

On zahteva izgradnju matrice admitansi nezavisnih čvorova mreže što je jedini ulazni podatak koji se menja sa rekonfiguracijom dok svi ostali ulazni podaci ostaju nepromenjeni a renumeracija čvorova nije potrebna. Analizirana mreža može biti radijalna ili slabo upetljana. Na kraju za tačno sračunavanje gubitaka potrebno je primeniti tačni algoritam tokova snaga Stojanović B. (23) jer je algoritam neprecizan najverovatnije zbog forsirane konvergencije napona u ulaznom čvoru, u kome napon mora biti fiksiran po modulu i argumentu (slack node).

Glavna modifikacija u odnosu na originalni algoritam jeste manipulisanje sa modulima napona a ne padovima napona u odnosu na referentni čvor kako je to urađeno u metodi Nahmana i Perića.

Primena novorazvijenog algoritma data je u referenci (22).

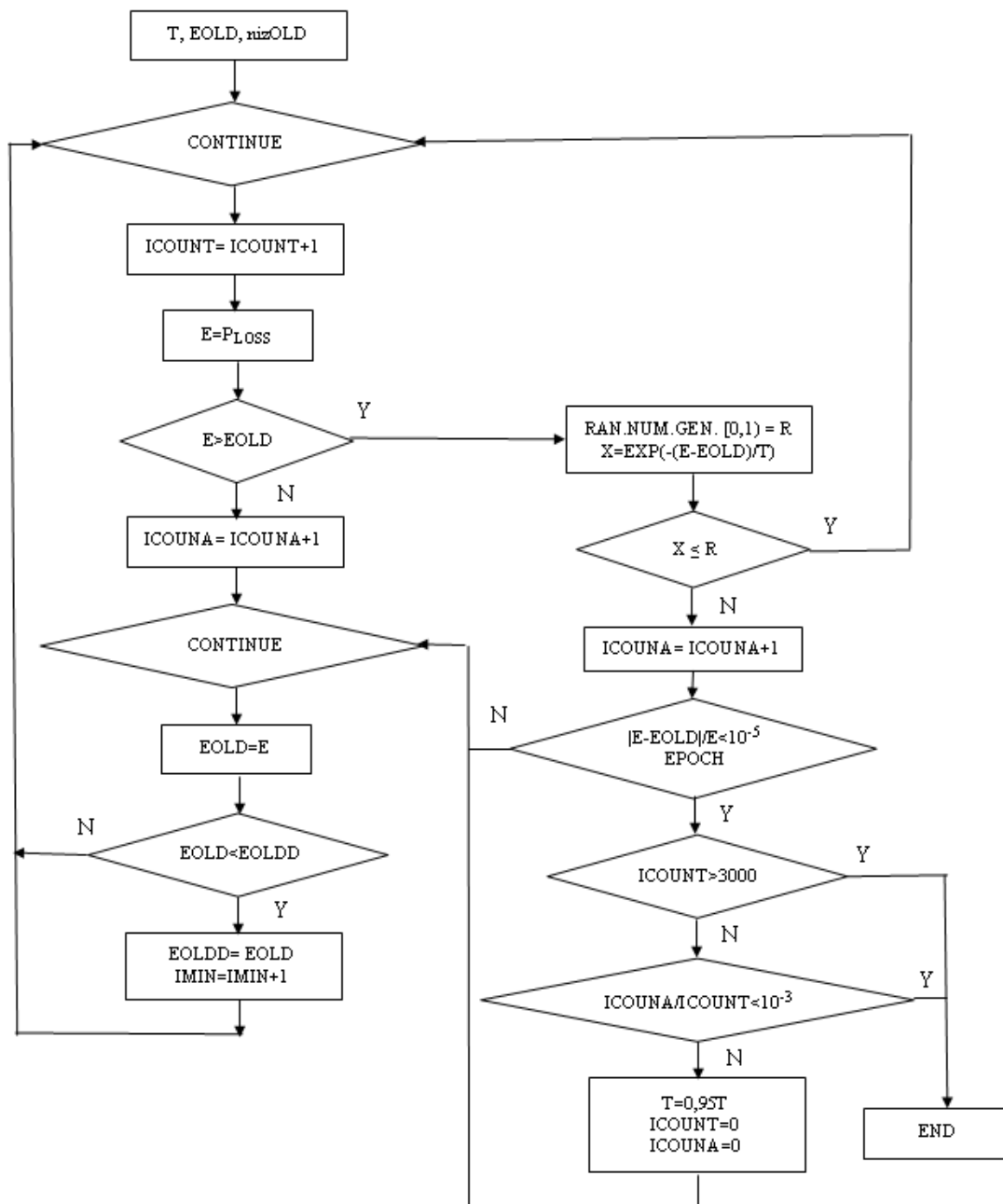
Razvijeni algoritam tokova snaga nije jedini fleksibilan. U vreme izrade članka autori su primenili i algoritam programiran u programu MATPOWER u MATLAB okruženju Zimmerman i Carlos (24) koji ima prednost nad razvijenim modifikovanim algoritmom Nahmah i Perić što je tačan a ne zahteva renumeraciju čvorova mreže po nivoima.

ALGORITAM REŠENJA I BLOK DIJAGRAM

Algoritam rešenja

Primenjeni algoritam rešenja prikazan je u referenci Stojanović B. i Rajić (25).

Blok dijagram (Slika 1)



Slika 1 - Blok dijagram algoritma

Korišćene su sledeće oznake:

T- temperatura (početna 5000),

E- gubici za tekuću konfiguraciju (kW),

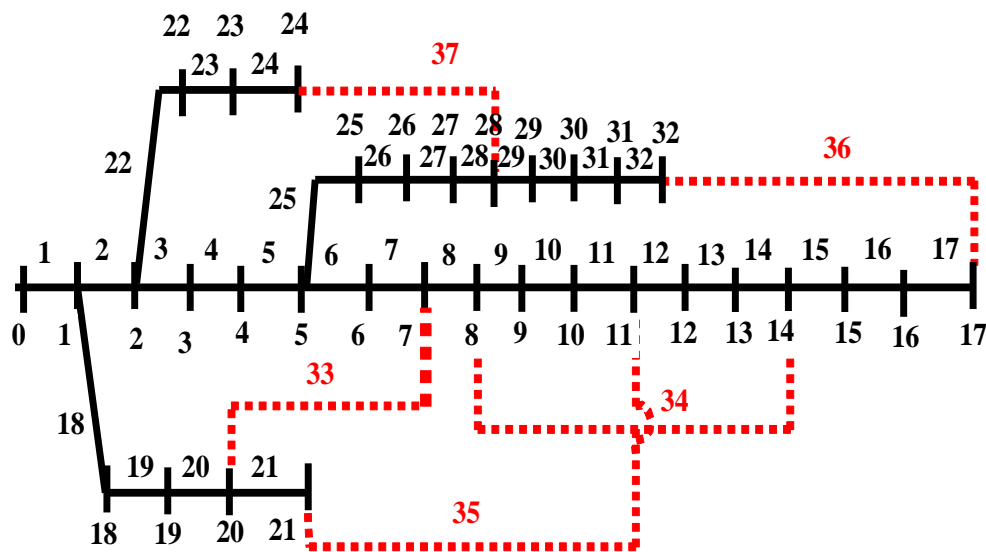
EOLD- gubici za prihvaćenu konfiguraciju (kW), kreće se sa inicijalnom konfiguracijom,
 EOLDD- minimalni gubici tokom izvršenja algoritma (grubo pretraživanje svih izgenerisanih konfiguracija) u kW,
 niz- vektor koji označava otvorene grane za tekuću konfiguraciju,
 nizOLD- vektor koji označava otvorene grane za prihvaćenu konfiguraciju,
 nizOLDD- vektor koji označava otvorene grane vezane za konfiguraciju sa EOLDD gubicima,
 IMIN- broj izgenerisanih minimalnih konfiguracija (monitorisanjem grubog pretraživanja) u opadajućem nizu.
 Na Slici 1 prikazan je homogeni algoritam za razliku od nehomogenog kod koga se temperatura smanjuje pre svake perturbacije koja zahteva generisanje slučajnog broja u intervalu $[0,1)$, $T=0.95T$.

NUMERIČKI REZULTATI

Testirani sistem je hipotetična mreža od 12.66 kV predstavljena na Slici 2 koja se sastoji od 32 grane i 5 spojnih prekidača koji formiraju 5 različitih petlji kada se zatvore (2). Podaci o mreži su dati u tabelama 1 i 2. Totalno aktivno i reaktivno opterećenje iznosi 3715 kW i 2300 kVar respektivno. Ukupni gubici aktivne snage za testiranu mrežu iznose 202.675 kW što je 5.5 % aktivne potrošnje.

Najniži napon polazne konfiguracije je 0.9131 p.u. Takođe je pretpostavljeno da se svaka od 37 grana može isključiti ili uključiti.

Predložena metoda je programirana u MATLAB 7 (Pentium IV PC; 2,4 GHz; 512 MB), MATLAB 2010a (HP 650 lap top; 1,7 GHz; 6,00 GB (2,66 GB upotrebljivo)) i Fortranu 77 (Pentium II PC; 533 MHz; 256 MB). Program u MATLAB-u je korišćen za dobijanje optimalne konfiguracije kad je primenjeni algoritam tokova snaga bio Nahman i Perić ili MATPOWER a FORTRAN 77 je korišćen za efikasni algoritam tokova snaga sa renumeracijom čvorova po nivoima.



Slika 2 – Testirana hipotetična mreža 12.66 kV Baran i Wu

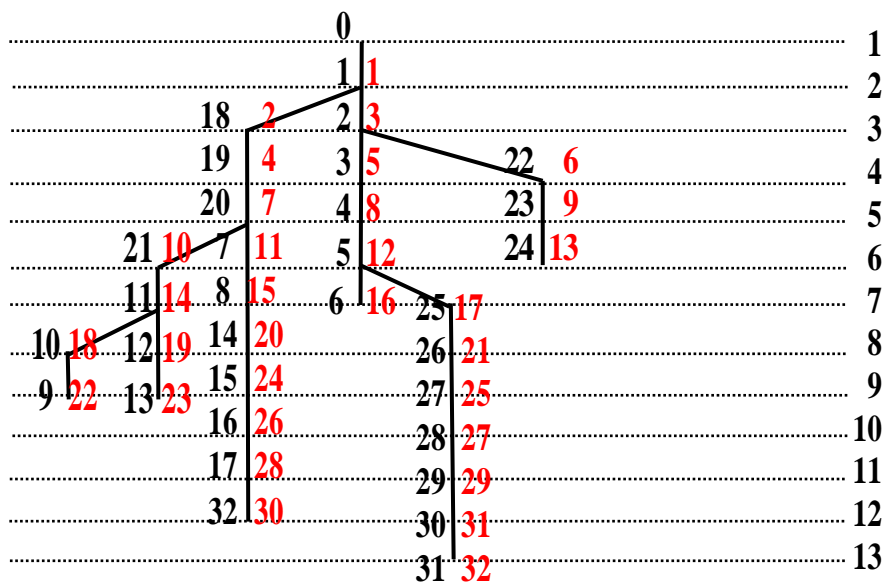
Tabele 1 i 2 predstavljaju ulazne podatke i rezultate tačnog algoritma tokova snaga za ciljnu optimalnu i najbolju podoptimalnu programom dostignutu konfiguraciju (nule u A, kW i kVar kolonama označavaju otvorene grane). Zasenčene cifre u $|V|$ p.u. koloni označavaju najniži napon sabirnice. Zasenčene cifre u koloni Ibranch module označavaju struje grana koje su veće nego kod polazne konfiguracije. Zasenčene cifre u koloni branch Ploss označavaju gubitke u granama koji su veći nego kod polazne konfiguracije.

Tabela 1 – Ciljna optimalna konfiguracija, otvorene grane 7, 9, 14, 32 i 37;
Ploss=139,5 kW (Slika 3)

branch	R (Ω)	X (Ω)	PLoad (kW)	QLoad (kVar)	V p.u.	Ibranch module (A)	branch Ploss (kW)	branch Qloss (kVar)
0-1	0.0922	0.0470	100.00	60.00	0.9970	358.7	11.8	6.0
1-2	0.4930	0.2511	90.00	40.00	0.9869	233.1	26.7	13.6
2-3	0.3660	0.1864	120.00	80.00	0.9824	143.6	7.5	3.8
3-4	0.3811	0.1941	60.00	30.00	0.9781	132.1	6.6	3.3
4-5	0.8190	0.7070	60.00	20.00	0.9673	126.9	13.1	11.3
5-6	0.1872	0.6188	200.00	100.00	0.9666	18.2	0.06	0.20
6-7	0.7114	0.2351	200.00	100.00	0.9626	0	0	0
7-8	1.0300	0.7400	60.00	20.00	0.9592	34.7	1.2	0.8
8-9	1.0440	0.7400	60.00	20.00	0.9627	0	0	0
9-10	0.1966	0.0650	45.00	30.00	0.9627	5.1	0.005	0.001
10-11	0.3744	0.1238	60.00	35.00	0.9630	9.5	0.03	0.01
11-12	1.4680	1.1550	60.00	35.00	0.9604	17.5	0.4	0.3
12-13	0.5416	0.7129	120.00	80.00	0.9597	11.8	0.07	0.1
13-14	0.5910	0.5260	60.00	10.00	0.9531	0	0	0
14-15	0.7463	0.5450	60.00	20.00	0.9514	24.6	0.4	0.3
15-16	1.2890	1.7210	60.00	20.00	0.9485	19.3	0.4	0.6
16-17	0.7320	0.5740	90.00	40.00	0.9474	14.1	0.14	0.11
1-18	0.1640	0.1565	90.00	40.00	0.9950	117.3	2.2	2.1
18-19	1.5042	1.3554	90.00	40.00	0.9782	109.5	18.0	16.2
19-20	0.4095	0.4784	90.00	40.00	0.9736	101.6	4.22	4.9
20-21	0.7089	0.9373	90.00	40.00	0.9701	40.7	1.1	1.5
2-22	0.4512	0.3083	90.00	50.00	0.9834	83.6	3.1	2.1
22-23	0.8980	0.7091	420.00	200.00	0.9767	75.3	5.1	4.0
23-24	0.8960	0.7011	420.00	200.00	0.9734	37.7	1.2	0.9
5-25	0.2030	0.1034	60.00	25.00	0.9655	104.8	2.2	1.1
25-26	0.2842	0.1447	60.00	25.00	0.9631	100.01	2.8	1.4
26-27	1.0590	0.9337	60.00	20.00	0.9526	95.2	9.6	8.4
27-28	0.8042	0.7006	120.00	70.00	0.9451	90.7	6.6	5.7
28-29	0.5075	0.2585	200.00	600.00	0.9419	79.9	3.2	1.6
29-30	0.9744	0.9630	150.00	70.00	0.9384	33.5	1.09	1.08
30-31	0.3105	0.3619	210.00	100.00	0.9378	19.5	0.11	0.13
31-32	0.3410	0.5302	60.00	40.00	0.9471	0	0	0
7-20, 33	2.000	2.000				53.0	5.6	5.6
8-14, 34	2.000	2.000				29.5	1.7	1.7
11-21, 35	2.000	2.000				32.7	2.1	2.1
17-32, 36	0.500	0.500				6.0	0.01	0.01
24-28, 37	0.500	0.500				0	0	0

Tabela 2 – Najbolja programom dobijena podoptimalna konfiguracija, otvorene grane 7, 9, 13, 32 i 37; Ploss=143 kW (algoritam Nahman i Perić)

branch	R (Ω)	X (Ω)	PLoad (kW)	QLoad (kVar)	V p.u.	Ibranch module (A)	branch Ploss (kW)	branch Qloss (kVar)
0-1	0.0922	0.0470	100.00	60.00	0.9970	359.1	11.8	6.0
1-2	0.4930	0.2511	90.00	40.00	0.9869	233.1	26.7	13.6
2-3	0.3660	0.1864	120.00	80.00	0.9824	143.6	7.5	3.8
3-4	0.3811	0.1941	60.00	30.00	0.9781	132.1	6.6	3.3
4-5	0.8190	0.7070	60.00	20.00	0.9673	126.9	13.1	11.3
5-6	0.1872	0.6188	200.00	100.00	0.9666	18.2	0.06	0.20
6-7	0.7114	0.2351	200.00	100.00	0.9598	0	0	0
7-8	1.0300	0.7400	60.00	20.00	0.9552	46.7	2.2	1.6
8-9	1.0440	0.7400	60.00	20.00	0.9662	0	0	0
9-10	0.1966	0.0650	45.00	30.00	0.9663	5.1	0.005	0.001
10-11	0.3744	0.1238	60.00	35.00	0.9666	9.5	0.03	0.01
11-12	1.4680	1.1550	60.00	35.00	0.9658	5.6	0.04	0.03
12-13	0.5416	0.7129	120.00	80.00	0.9457	0	0	0
13-14	0.5910	0.5260	60.00	10.00	0.9464	12.0	0.08	0.07
14-15	0.7463	0.5450	60.00	20.00	0.9447	24.7	0.4	0.3
15-16	1.2890	1.7210	60.00	20.00	0.9417	19.5	0.4	0.6
16-17	0.7320	0.5740	90.00	40.00	0.9407	14.2	0.14	0.11
1-18	0.1640	0.1565	90.00	40.00	0.9950	117.7	2.2	2.1
18-19	1.5042	1.3554	90.00	40.00	0.9781	109.9	18.1	16.3
19-20	0.4095	0.4784	90.00	40.00	0.9735	101.9	4.2	4.9
20-21	0.7089	0.9373	90.00	40.00	0.9711	28.8	0.5	0.7
2-22	0.4512	0.3083	90.00	50.00	0.9834	83.6	3.1	2.1
22-23	0.8980	0.7091	420.00	200.00	0.9767	75.3	5.1	4.0
23-24	0.8960	0.7011	420.00	200.00	0.9734	37.7	1.2	0.9
5-25	0.2030	0.1034	60.00	25.00	0.9655	104.8	2.2	1.1
25-26	0.2842	0.1447	60.00	25.00	0.9631	100.0	2.8	1.4
26-27	1.0590	0.9337	60.00	20.00	0.9526	95.2	9.6	8.4
27-28	0.8042	0.7006	120.00	70.00	0.9451	90.7	6.6	5.7
28-29	0.5075	0.2585	200.00	600.00	0.9419	79.9	3.2	1.6
29-30	0.9744	0.9630	150.00	70.00	0.9384	33.5	1.09	1.08
30-31	0.3105	0.3619	210.00	100.00	0.9378	19.5	0.11	0.13
31-32	0.3410	0.5302	60.00	40.00	0.9404	0	0	0
7-20, 33	2.000	2.000				65.1	8.49	8.49
8-14, 34	2.000	2.000				41.5	3.45	3.45
11-21, 35	2.000	2.000				20.8	0.86	0.86
17-32, 36	0.500	0.500				6.0	0.01	0.01
24-28, 37	0.500	0.500				0	0	0



Slika 3 – Ciljna optimalna konfiguracija

DISKUSIJA I ZAKLJUČCI

- Efikasni modifikovani algoritam tokova snaga Nahman i Perić je fleksibilan ali nedovoljno tačan tako da su autori dali prednost fleksibilnom i tačnom algoritmu MATPOWER okruženja (24) u svom najnovijem istraživanju. Primenom ovog algoritma za najbolju suboptimalnu konfiguraciju dobija se 32, 7, 9, 28 i 14 (otvorene grane), Ploss=139.98 kW. Korišćen je nehomogeni algoritam simuliranog kaljenja (MATLAB 7).
- Ciljni optimum se postiže zatvaranjem grane 13 i otvaranjem grane 14 kod najbolje podoptimalne konfiguracije (branch-exchange) kada je primenjen algoritam Nahman i Perić ili zatvaranjem grane 28 i otvaranjem grane 37 kada je primenjen program MATPOWER (24).
- Mnoge izgenerisane konfiguracije jesu heavy loss konfiguracije (3, 14, 18, 26 i 35 kao i 5, 8, 13, 22 i 28). Za njih oba algoritma tokova snaga divergiraju. Podesnim naredbama u MATLAB-u ove konfiguracije se preskaču i ide se na generisanje novih podobnih.
- Najniži napon polazne konfiguracije je 0.913 p.u. a za najbolju izgenerisanu konfiguraciju 0.938 p.u. (algoritam Nahman i Perić). Rekonfiguracijom se naponski profil mreže popravlja. Struje grana 15, 16, 17, 18, 19, 20 i 21 kod ciljne optimalne i izgenerisane podoptimalne konfiguracije su veće nego kod polazne. Ovo pokazuje da je zaključak Padilha-Feltrin (25) samo delimično tačan. Struje optimalnih konfiguracija su uglavnom manje nego kod polazne sa izuzetkom grana sa najmanjim inkrementom gubitaka. Povećanjem struja ovih grana i smanjenjem struja grana sa velikim gubicima postiže se optimalna konfiguracija. Strujna i naponska ograničenja nisu korišćena u razvijenom programu.
- CPU vreme izvršenja programa je najmanje kod primene nehomogenog algoritma i ono za MATPOWER okruženje (24) iznosi oko 1 sat. Pri tome ulazni parametri imaju sledeće vrednosti ICOUNT=3000 i a.r. < 0.001(acceptance ratio).
- Primenjeni algoritam spada u teške jer je broj mogućih kombinacija reda $\binom{37}{5}$ što iznosi to 435 897 (svaka grana se može uključiti ili isključiti) mada sve ove konfiguracije ne treba ispitati, samo one koje su radijalne.
- Budući rad iz ove oblasti autori vide u mogućnosti primene razvijenih programa na problemu rekonfiguracije i kompenzacije za koji autori smatraju da u nekim referencama nije obrađen na zadovoljavajući način (9, 10 i Jiang 27) jer nisu dobijena optimalna rešenja i korišćen je suviše prost algoritam tokova snaga koji nije podesan za razgranate mreže sa bočnim granama i ograncima.
- Primenjeni algoritam je nov jer pomoću generatora slučajnih brojeva generiše samo radijalne konfiguracije, koristi fleksibilni algoritam tokova snaga i kombinuje dobre karakteristike simulacije kaljenja i grubog pretraživanja što rezultuje u podesnom hibridnom algoritmu.
- Autori nemaju iskustvo sa primenom drugih metoda na problematiku smanjenja gubitaka aktivne snage u distributivnim mrežama koje su simetrične osim što je primenom metode zamene grana (branch

exchange) za istu mrežu primer dobijanje globalnog optimuma trajalo nekoliko meseci, Stojanović B. (28), tako da je prednost više nego očigledna kada je za red sata dobijen više nego prihvatljivi sub-optimum.

LITERATURA

1. Civanlar S., Grainger J.J., Yin H. and Lee S.S.H., July 1988, "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction", "IEEE Transactions on Power Delivery", "Vol.3, No.3", pp. 1217-1223
2. Baran M.E. and Wu F.F., April 1989, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing", "IEEE Transactions on Power Delivery", "Vol.4, No.2", pp. 1401-1407
3. Shirmohammadi D. and Hong H.W., April 1989, "Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction", "IEEE Transactions on Power Delivery", "Vol.4, No.2", pp. 1492-1498
4. Glamočanin V., August 1990, "Optimal loss reduction of distribution networks", "IEEE Transactions on Power Systems", "Vol.5, No.3", pp. 774-782
5. Borozan V., Rajičić D. and Ačkovski R., August 1995, "Improved method for loss minimization in distribution networks", "IEEE Transactions on Power Systems", "Vol.10, No.3", pp. 1420-1425
6. Borozan V. and Rajaković N., October 1997, "Application assessments of distribution network minimum loss reconfiguration", "IEEE Transactions on Power Delivery", "Vol.12, No.4", pp. 1786-1792
7. Chiang H.D. and Jumeau R.J., July 1990, "Optimal network reconfigurations in distribution systems: part 2: Solution algorithms and numerical results", "IEEE Transactions on Power Delivery", "Vol.5, No.3", pp. 1568-1574
8. Chiang H.D. and Jumeau R.J., November 1990, "Optimal network reconfigurations in distribution systems: part 1: A new formulation and a solution methodology", "IEEE Transactions on Power Delivery", "Vol.5, No.4", pp. 1902-1909
9. Jiang D. and Baldick R., May 1996, "Optimal electric distribution system switch reconfiguration and capacitor control", "IEEE Transactions on Power Systems", "Vol.11, No.2", pp. 890-897
10. Su C.T. and Lee C.S., 58 (2001), "Feeder reconfiguration and capacitor setting for loss reduction of distribution systems", "Electric Power Systems Research", pp. 97-102
11. Jeon Y.J., Kim J.C., Kim J.O., Shin J.R. and Lee K.Y., October 2002, "An efficient simulated annealing algorithm for network reconfiguration in large-scale distribution systems", "IEEE Transactions on Power Delivery", "Vol.17, No.4", pp. 1070-1078
12. Jeon Y.J. and Kim J.C., 26 (2004), "Application of simulated annealing and tabu search for loss minimization in distribution systems", "Electrical Power and Energy Systems", pp. 9-18
13. Carpaneto E. and Chicco G., 78 (2008), "Distribution system minimum loss reconfiguration in the hypercube ant colony optimization framework", "Electric Power Systems Research", pp. 2037-2045
14. Stojanović M., Tasić D., Vučković M. i Ristić A., „Optimalna procena distributivne mreže genetskim algoritmom“, CIRED (savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije), Vrnjačka banja 23-28.09.2012
15. Borozan V., Rajičić D. and Ačkovski R., January 1997, "Minimum loss reconfiguration of unbalanced distribution networks", "IEEE Transactions on Power Delivery", "Vol.12, No.1", pp. 435-442
16. Zimmerman R.D., May 1992, "Network reconfiguration for loss reduction in three-phase power distribution systems", Masters thesis, Cornell University, 60 pages
17. Nahman J.M. and Perić D.M., May 2008, "Optimal planning of radial distribution networks by simulated annealing technique", "IEEE Transactions on Power Systems", "Vol. 23, No. 2", pp. 790-795
18. Stojanović B., januar 1997, „Simulacija kaljenja i njena primena na kompenzaciju radijalnih distributivnih mreža“, magistarski rad, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 96 strana (osnovni deo)
19. Heydt, G.T., Copyright 1986, "Computer analysis methods for power systems", Purdue University, "Macmillan Publishing Company, New York", 359 (p), pp. 11-15
20. Lavorato M., Franco J.F., Rider J.M. and Romero R., February 2012, "Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems", "IEEE Transactions on Power Systems", "Vol. 27, No. 1", pp. 172-180
21. Rajić T. i Stojanović B., „Program za proveru povezanosti elektroenergetskog sistema“, CIRED (savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije), Vrnjačka banja 26-30.9.2016
22. Stojanović B., Moskovljević M. i Rajić T., „Modifikovani efikasni algoritam tokova snaga Nahman i Perić“, CIRED (savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije), Vrnjačka banja 26-30.9.2016
23. Stojanović B., October 2011, "Efficient automatic programme for voltage and current calculation in large scale radial balanced distribution networks without transformers", International scientific conference on defensive technologies, OTEH, Belgrade, Serbia,
24. MATPOWER 6.0, User's Manual, December 16 2016, Zimmerman R.D. and Carlos E.M.S.

25. Stojanović B. and Rajić T., 2017, "Novel approach to reconfiguration power loss reduction problem by simulated annealing technique", *Int Trans Electr ENEG Syst.*; e2464. <https://doi.org/10.1002/etep.2464>
26. Carreno E.M., Romero R. and Padilha-Feltrin A., November 2008, "An efficient codification to solve distribution network reconfiguration for loss reduction problem", *IEEE Transactions on Power Systems*, "Vol. 23, No. 4", pp. 1542-1551
27. Jiang D., May 1994, "Electric distribution system reconfiguration and capacitor switching", Masters thesis, Worcester Polytechnic Institute, 77 pages
28. Stojanović B., "Branch exchange approach to power loss reduction in reconfiguration problem of balanced distribution networks", "Vol.2, No.3", 2015, *IJMEA*, pp. 142-149