

EKONOMSKA PROCENA REKONFIGURACIJE DISTRIBUTIVNIH MREŽA I OTOČNE KOMPENZACIJE

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

KRATAK SADRŽAJ

Ovaj rad se bavi rekonfiguracijom trofaznih simetričnih radijalnih distributivnih mreža i otočnom kompenzacijom. Primenjena metoda iznalazi globalni optimum ili rešenje njemu blisko. Optimalna rekonfiguracija i otočna kompenzacija omogućavaju ekonomičan i pouzdan rad mreže smanjujući aktivne gubitke i poboljšavajući naponsku sliku. Tri metode zasnovane na simuliranom kaljenju (simulated annealing) su prezentovane i ekonomski upoređene (istovremena rekonfiguracija i otočna kompenzacija, rekonfiguracija pa naknadno otočna kompenzacija i na kraju otočna kompenzacija nakon koje je primenjena rekonfiguracija). Ekonomska analiza je sprovedena na mreži Barana i Wua i originalna je u dosadašnjoj literaturi a funkcija cilja se sastoji od cene kondenzatorskih baterija koje su instalirane i cene gubitaka u mreži dok je trošak električne energije zanemaren. Program za proveru povezanosti energetskog sistema sa nametnutim ograničenjem radijalnosti je razvijen i pojačan novim efikasnim algoritmom tokova snaga. Primenjeni algoritam tokova snaga je efikasan i brz ali može poslužiti samo kao indikacija za sračunavanje gubitaka zbog nedovoljne tačnosti. Vreme programa za istovremenu rekonfiguraciju i otočnu kompenzaciju je reda sati i ne zavisi od postupka pripreme ulaznih podataka kod efikasnog algoritma tokova snaga. Ova prednost čini metodu interesantnom kako u fazi planiranja tako i kod primene u realnom vremenu.

Glavni doprinos ovog rada je novi pristup koji najviše koristi sledeće mehanizme: matricu za proveru konektivnosti mreže, kriterijum Lavorato et al. za nametanje ograničenja radijalnosti i novi razvijeni efikasni algoritam tokova snaga.

Ključne reči: cena kondenzatorskih baterija, gubici aktivne snage, konektivnost, radijalna konfiguracija, efikasni algoritam tokova snaga, simulirano kaljenje

SUMMARY

This study presents approach to feeder reconfiguration and capacitor settings. The merit of the methods is that they can prove a global or near-global optimum. Optimal reconfiguration and capacitors control allow cost-effective and reliable operation of networks, reducing power losses and flattening voltage profile. Three methods based on SA are presented and compared economically (simultaneous reconfiguration and capacitors switching, reconfiguration and then capacitors switching and eventually capacitors switching and then reconfiguration). Cost-effective analyses conducted on Baran and Wu network is unique and objective function consists of capacitors and losses price while neglecting cost of energy. 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. The time duration of simultaneous reconfiguration and capacitors switching 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 new power flow algorithm.

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

UVOD

Optimalna rekonfiguracija i otopna kompenzacija omogućavaju ekonomični i pouzdani rad mreže smanjujući gubitke aktivne snage i poravnavajući naponski profil. Pojedinačni problemi otopne kompenzacije i rekonfiguracije opsežno su razmatrani u literaturi. Kod prvog problema obično se analizira optimalna lokacija, veličina i tip kondenzatorskih baterija za montažu. U pogledu rekonfiguracije mreže u svrhu smanjenja gubitaka prisutni su mnogi članci u kojima je primenjena kako heuristika tako i matematičke metode. Obostrani problem u cilju smanjenja gubitaka je analizirana u Jiang i Baldick (1) i Su i Lee (2) primenom metode simuliranog kaljenja (SA-simulated annealing).

U ovome članku prikazan je novi pristup ovom obostranom problemu. Tri metode su upoređene finansijski (simultana rekonfiguracija i otopna kompenzacija, rekonfiguracija pa nakon nje otopna kompenzacija i na kraju otopna kompenzacija pa naknadno rekonfiguracija). Sve ovo je rađeno u cilju donošenja zaključka koja metoda je finansijski najisplativija. Analiza je izvršena na mreži Baran-a i Wu-a (3) i jedinstvena je u pogledu unetih ulaznih podataka pri čemu je funkcija cilja sačinjena isključivo od cene kondenzatorskih baterija i cene gubitaka. Napominjemo da ovakav prikaz ne odgovara najbolje realnosti zbog zanemarenja troška na isporučenu električnu energiju potrošačima. Kako je ovo mnogo zametniji problem autori pokušavaju u nastavku istraživanja da se njime pozabave. Takođe rađeno je samo sa jednim nivoom opterećenja i to nominalnim što nije slučaj u praksi.

Otopna kompenzacija je NP-kompleksni kombinatorijski optimizacioni problem sa nediferencijabilnom funkcijom cilja (funkcija cene kondenzatorskih baterija je stepenasta i nediferencijabilna). NP stoji za vreme izvršenja algoritma koje nije polinom dimenzije problema (broj čvorova gde se mogu ugraditi baterije) već eksponencijalno raste sa povećanjem broja varijabli. Kondenzatorske baterije se široko primenjuju u distributivnim mrežama u cilju kompenzacije reaktivne snage, smanjenja gubitaka snage i energije, regulacije napona i povećanja proizvodnih kapaciteta u pogledu prividne snage. Koristi u mnogome zavise od toga kako su baterije postavljene u mreži (njenim čvorovima). Ovaj problem je poznat kao generalni u pogledu lociranja kondenzatorskih baterija.

Generalni problem lociranja kondenzatorskih baterija razmatran je putem metode simuliranog kaljenja u Chiang et al. (4, 5).

Problem rekonfiguracije mreže iznalazi najbolju kombinaciju grana koje treba isključiti, po jednu iz svake petlje a da mreža bude radijalna i da su joj gubici aktivne snage minimalni. Ovo se postiže pomoću normalno zatvorenih i normalno otvorenih prekidača (sekcioni i spojni). Prostor pretraživanja je diskontinualan sobzirom na binarni status (zatvoreno, otvoreno) prekidača. Zbog ovakve prirode problema simulirano kaljenje je idealno za njegovo rešavanje.

Problem rekonfiguracije mreže je problem „minimalno razgranatog stabla“ (mreža liči na razgranato stablo) koji je poznat i kao NP-kombinatorijski optimizacioni problem. Algoritam treba da iznađe konfiguraciju sa minimalnim gubicima uz zadovoljenje mrežnih ograničenja.

U radu se traži optimalna konfiguracija i optimalna lokacija kondenzatorskih baterija kojima se minimizira funkcija cilja. Funkcija cilja se sastoji od cene kondenzatorskih baterija pomnožene sa 0.15 što je njihova godišnja stopa cene i vrednosti gubitaka pomnožene sa 120\$/kW koliko se oni naplaćuju (obe vrednosti su uzete iz literature Stojanović (6)). Usvojena je i stepenasta funkcija cene kondenzatorskih baterija u čiji fiksni deo je ugrađen trošak montaže i održavanja baterija. Cilj nam je da minimiziramo ovakvu funkciju cilja koja je nediferencijabilna sobzirom na diskretnu prirodu oba izložena problema. Ukoliko bi se računalo i sa gubicima isporučene električne energije kako postoji, najmanje tri nivoa opterećenja (maksimalno, nominalno i minimalno) tokom godine kod konzuma, moralo bi se raditi sa matičnom funkcijom cilja čija bi svaka vrsta odgovarala jednom nivou opterećenja, jednom scenariju a ako bi se postavljale fiksne kondenzatorske baterije one bi bile iste u svakom od njih. Ovakva realistična interpretacija problema zahteva znatno komplikovanije programiranje na kome su autori trenutno angažovani.

U Jiang (7) je zaključeno da simultanom rekonfiguracijom i otopnom kompenzacijom naponski profil mreže može toliko da se poravi da nije potrebno korišćenje naponskih regulatora.

U Peponis et al. (8, 9) se zaključuje da za testiranu mrežu 11,36% smanjenja gubitaka daje rekonfiguracija a 18,6% otopna kompenzacija.

Agugliaro et al. u (10) predlažu tri heuristične metode za rešavanje ovog obostranog problema. Simulirano kaljenje, genetski algoritam i tabu pretraživanje. Pokazano je da najbolje rezultate daje tabu pretraživanje.

Napominjemo da u novijoj literaturi postoji dosta članaka koji se bave rekonfiguracijom i otopnom kompenzacijom na koju se dodaje još i problem lokacije autonomnih generatora (distributed generation) što prevazilazi obim ovoga članka Nayeripour et al.(11), Ameli et al. (12) i Salehi et al. (13).

Kao osnova ovog rada poslužio je članak Nahmana i Perića (14). Iz njega je preuzeta ideja o konektivnosti mreže koja je detaljno analizirana u Rajić i Stojanović (15).

Modifikovani efikasni algoritam tokova snaga Nahman i Perić za trofazne simetrične distributivne mreže Stojanović et al. (16) zamenjen je tačnijim algoritmom u MATPOWER okruženju (17).

Korišćen je homogeni Stojanović (18) i nehomogeni algoritam simuliranog kaljenja (14).

Rad je sa sledećim poglavljima: 1.Uvod, 2.Algoritam za simultanu rekonfiguraciju i otočnu kompenzaciju i Blok dijagram nehomogenog algoritma, 3.Numerički rezultati i 4.Diskusija sa zaključcima.

Glavni doprinos ovog rada predstavlja:

- korišćenje matrice povezanosti sistema,
- kriterijum Lavorato et al. (19) kojim se postiže radijalnost mreže ako je ona konektovana i broj čvorova joj je za jedan veći od broja grana,
- upotreba generatora slučajnih brojeva za generisanje grana koje su isključene kao i generatora za generisanje minimalnog i maksimalnog broja kondenzatorskih baterija koje se mogu uključiti,
- primena MATPOWER okruženja (17) za računanje gubitaka kako kod rekonfigurirane mreže tako i kod kompenzovane,
- primena homogenog (18) i nehomogenog algoritma simuliranog kaljenja (14) i
- globalno pretraživanje (greedy search) u rezultujućem hibridnom algoritmu sa simuliranim kaljenjem.

ALGORITAM REŠENJA I BLOK DIJAGRAM

Algoritam rešenja za simultanu rekonfiguraciju i kompenzaciju

Primenjeni algoritam rešenja prikazan je u referenci Stojanović B. i Rajić (20) sa sledećim dopunama:

Pored ranijih ulaznih podataka pridodata je polazna konfiguracija bez ugrađenih kondenzatorskih baterija nazvana „suvu mrežu“ za koju je vektor baterija QBKOLD nula vektor sa 32 vrste koliko ima čvorova u kojima se mogu ugraditi baterije. Ulazni podatak je i cena kondenzatorskih baterija koja je stepenasta nediferencijabilna funkcija (Tabela 1).

Kod primenjenog nehomogenog algoritma više ne postoji kriterijum terminiranja Markovljevo lanca (sekvence uzastopnih perturbacija) nazvan epoch, na određenoj temperaturi, već se temperatura snižava svakom perturbacijom pre primene Metropolis kriterijuma (generisanja slučajnog broja u intervalu [0,1) i njegovog poređenja sa vrednošću $\exp(-\Delta E_{ij}/T)$ gde je E vrednost funkcije cilja a T temperatura).

Dodeljivane baterije mreži imaju ukupno ograničenje $Q_{b\max}$ maksimalne i $Q_{b\min}$ minimalne snage instaliranih baterija (moraju se nalaziti u tom opsegu).

Ako se sa Q_{dem} označi reaktivna potrošnja mreže a sa P_{00} aktivna snaga nultog čvora (zbir aktivne snage potrošnje i aktivnog opterećenja) i sa Q_{loss} reaktivna snaga gubitaka, sve za „suvu mrežu“ ima se:

$$Q_{b\max} = Q_{loss} + Q_{dem} \quad (2.1)$$

da mreža ne bi bila prekompenzovana

$$Q_{b\min} = Q_{loss} + Q_{dem} - P_{00} * \frac{\sqrt{1-0.85^2}}{0.85} \quad (2.2)$$

i da bi ulazni faktor snage bio veći od 0.85.

Gornji obrazci su izvedeni (18) za mrežu u kojoj vodovi ne generišu reaktivnu snagu (nemaju otočne susceptanse) što se može prihvatiti kod distributivnih mreža. Bez ograničenja ukupne snage ugrađenih baterija prostor konfiguracija bi bio neograničeni skup i problem se ne bi mogao praktično rešiti.

Blok dijagram (Slika 1) za simultanu rekonfiguraciju i kompenzaciju

Korišćene su sledeće oznake:

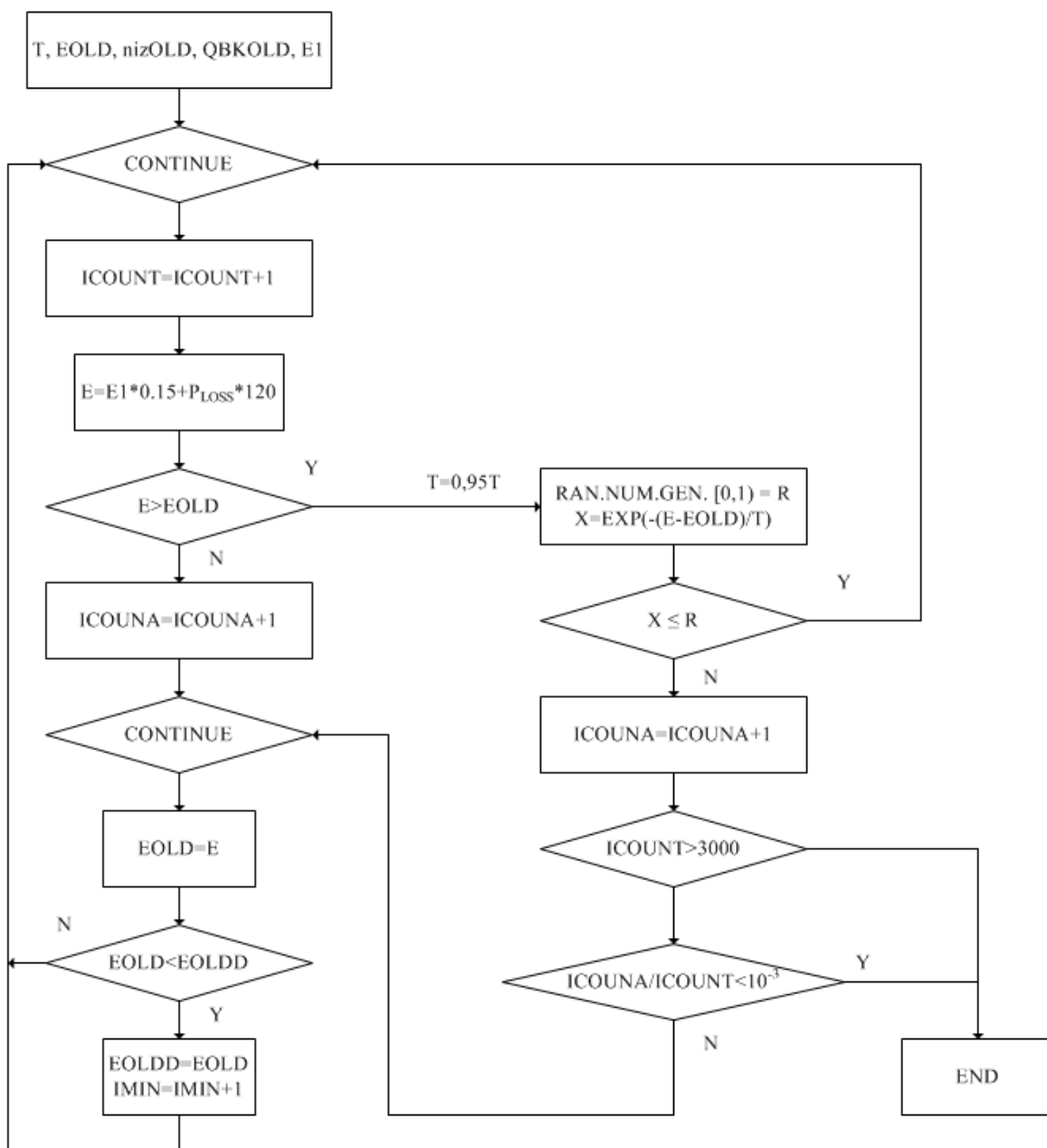
T- temperatura (početna 5000),

E =(E1*0.15+120*Ploss)- funkcija cilja za tekuću konfiguraciju (\$),

E1- ukupna cena svih ugrađenih kondenzatorskih baterija (\$),

Ploss- gubici (kW),

0.15- godišnja stopa cene ugrađenih baterija,
 120- faktor penalizacije gubitaka (\$/kW),
 EOLD- funkcija cilja za prihvaćenu konfiguraciju (\$), kreće se sa inicijalnom konfiguracijom bez ugrađenih baterija,
 EOLDD- minimalna funkcija cilja tokom izvršenja algoritma (grubo pretraživanje svih izgenerisanih konfiguracija) u \$.
 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 cenom,
 IMIN- broj izgenerisanih minimalnih konfiguracija (monitorisanjem grubog pretraživanja) u opadajućem nizu.
 Na Slici 1 prikazan je nehomogeni algoritam.



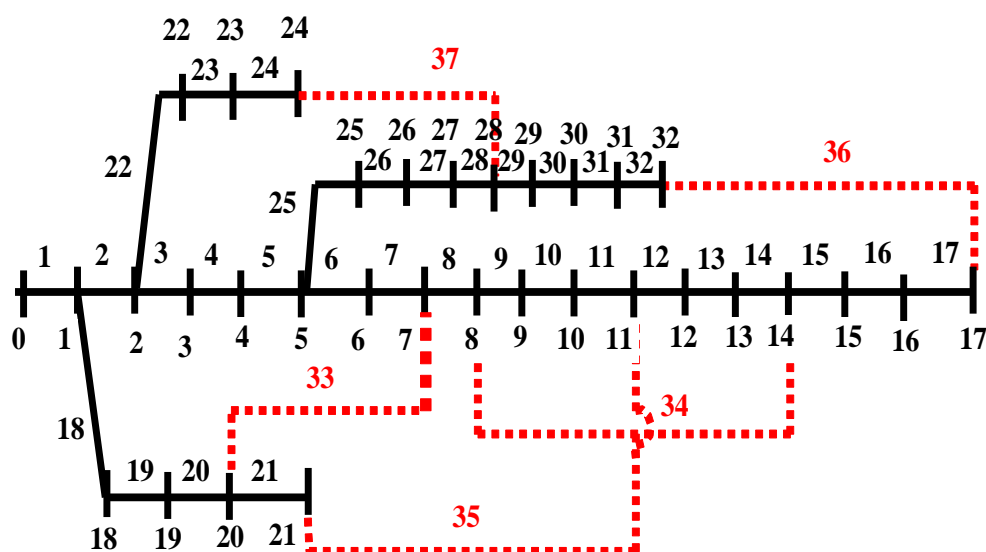
Slika 1 - Blok dijagram algoritma (nehomogeni)

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 (3). Podaci o mreži su dati u tabelama 2, 3 i 4. 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. Mreža nije dobro kompenzovana ($\cos\phi$ je 0.8493 što je manje od 0.85). Funkcija cene kondenzatorskih baterija data je u Tabeli 1. Dozvoljene tolerancije napona čvorova mreže su ± 0.1 p.u.

Najniži napon polazne konfiguracije je 0.9131 p.u. Takođe je pretpostavljeno da se svaka od 37 grana može isključiti ili uključiti i da se kondenzatorske baterije (u koracima od 300 kVar) mogu pridodati svakom čvoru sem nultog (slack node).

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 pri samoj rekonfiguraciji i pri simultanoj rekonfiguraciji i kompenzaciji u MATPOWER okruženju (17) a FORTRAN 77 je korišćen za rešavanje problema kompenzacije.



Slika 2 – Testirana hipotetična mreža 12.66 kV Baran i Wu

Tabele 2, 3 i 4 predstavljaju ulazne podatke i rezultate tačnog algoritma tokova snaga za konačne konfiguracije dobijene prvo rekonfiguracijom pa kompenzacijom, zatim kompenzacijom pa rekonfiguracijom i na kraju simultanom rekonfiguracijom i kompenzacijom (nule u A koloni označavaju otvorene grane).

Zasencene cifre u $|V|$ p.u. koloni označavaju najniži napon sabirnice.

Zasencene cifre u koloni branch Ploss označavaju gubitke u granama koji su veći nego kod polazne konfiguracije.

Tabela 1 – Stepenasta funkcija cene kondenzatorskih baterija, fiksni deo predstavlja cenu montaže i održavanja baterija

Capacitor rating	> 0, ≤ 300 kVar	> 300, ≤ 600 kVar	> 600, ≤ 900 kVar	> 900, ≤ 1200 kVar	> 1200 kVar
price	1900 \$	3200 \$	4500 \$	5400 \$	6000 \$

Tabela 2 - Ulazni podaci i rezultati preciznog programa tokova snaga (Ploss=93,8 kW) za konfiguraciju sa sledećim otvorenim granama 7, 9, 32, 37 i 14 (nule u A koloni)
 čvor 8(0,3 Mvar baterija), čvor 24(0,3 Mvar baterija) i čvor 29(0,9 Mvar baterija), $\cos\phi=0,9749$ (rekonfiguracija pa kompenzacija, 12511\$, Slika 3)

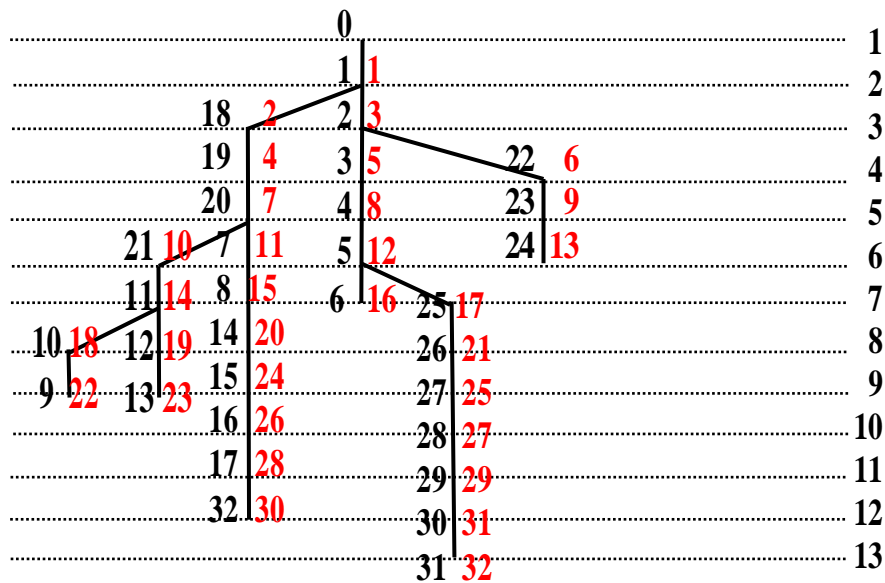
grana	R (Ω)	X (Ω)	Pload (kW)	QLoad (kVar)	V p.u.	Ibranch modul (A)	grana Ploss (MW)	grana Qloss (MVar)
0-1	0.0922	0.0470	100.00	60.00	0.998		0.009	0.00
1-2	0.4930	0.2511	90.00	40.00	0.990		0.018	0.01
2-3	0.3660	0.1864	120.00	80.00	0.986		0.004	0.00
3-4	0.3811	0.1941	60.00	30.00	0.983		0.004	0.00
4-5	0.8190	0.7070	60.00	20.00	0.976		0.007	0.01
5-6	0.1872	0.6188	200.00	100.00	0.976		0.000	0.00
6-7	0.7114	0.2351	200.00	100.00	0.971	0	-	-
7-8	1.0300	0.7400	60.00	-280.00	0.969		0.001	0.00
8-9	1.0440	0.7400	60.00	20.00	0.967	0	-	-
9-10	0.1966	0.0650	45.00	30.00	0.967		0.000	0.00
10-11	0.3744	0.1238	60.00	35.00	0.968		0.000	0.00
11-12	1.4680	1.1550	60.00	35.00	0.965		0.000	0.00
12-13	0.5416	0.7129	120.00	80.00	0.964		0.000	0.00
13-14	0.5910	0.5260	60.00	10.00	0.963	0	-	-
14-15	0.7463	0.5450	60.00	20.00	0.961		0.000	0.00
15-16	1.2890	1.7210	60.00	20.00	0.958		0.000	0.00
16-17	0.7320	0.5740	90.00	40.00	0.957		0.000	0.00
1-18	0.1640	0.1565	90.00	40.00	0.996		0.002	0.00
18-19	1.5042	1.3554	90.00	40.00	0.982		0.015	0.01
19-20	0.4095	0.4784	90.00	40.00	0.978		0.004	0.00
20-21	0.7089	0.9373	90.00	40.00	0.975		0.001	0.00
2-22	0.4512	0.3083	90.00	50.00	0.987		0.003	0.00
22-23	0.8980	0.7091	420.00	200.00	0.981		0.004	0.00
23-24	0.8960	0.7011	420.00	-100.00	0.979		0.001	0.00
5-25	0.2030	0.1034	60.00	25.00	0.975		0.001	0.00
25-26	0.2842	0.1447	60.00	25.00	0.974		0.001	0.00
26-27	1.0590	0.9337	60.00	20.00	0.969		0.004	0.00
27-28	0.8042	0.7006	120.00	70.00	0.966		0.003	0.00
28-29	0.5075	0.2585	200.00	-300.00	0.964		0.001	0.00
29-30	0.9744	0.9630	150.00	70.00	0.961		0.001	0.00
30-31	0.3105	0.3619	210.00	100.00	0.960		0.000	0.00
31-32	0.3410	0.5302	60.00	40.00	0.957	0	-	-
7-20, 33	2.000	2.000					0.005	0.005
8-14, 34	2.000	2.000					0.002	0.002
11-21, 35	2.000	2.000					0.002	0.002
17-32, 36	0.500	0.500					0.00	0.00
24-28, 37	0.500	0.500				0	-	-

Tabela 3 - Ulazni podaci i rezultati preciznog programa tokova snaga (Ploss=95,123 kW) za konfiguraciju sa sledećim otvorenim granama 36, 14, 7, 28 i 9 (nule u A koloni)
 čvor 6(0,3 Mvar baterija), čvor 13(0,3 Mvar baterija), čvor 24(0,3 Mvar baterija) i čvor 29(0,9 Mvar baterija),
 cosφ=0.9860 (homogeni algoritam simulacije kaljenja, kompenzacija pa rekonfiguracija, 12945\$)

grana	R (Ω)	X (Ω)	Pload (kW)	QLoad (kVar)	V p.u.	Ibranch modul (A)	grana Ploss (MW)	grana Qloss (MVar)
0-1	0.0922	0.0470	100.00	60.00	0.998		0.009	0.00
1-2	0.4930	0.2511	90.00	40.00	0.990		0.019	0.01
2-3	0.3660	0.1864	120.00	80.00	0.988		0.001	0.00
3-4	0.3811	0.1941	60.00	30.00	0.987		0.001	0.00
4-5	0.8190	0.7070	60.00	20.00	0.985		0.001	0.00
5-6	0.1872	0.6188	200.00	-200.00	0.986		0.000	0.00
6-7	0.7114	0.2351	200.00	100.00	0.970	0	-	-
7-8	1.0300	0.7400	60.00	20.00	0.967		0.001	0.00
8-9	1.0440	0.7400	60.00	20.00	0.974	0	-	-
9-10	0.1966	0.0650	45.00	30.00	0.974		0.000	0.00
10-11	0.3744	0.1238	60.00	35.00	0.975		0.000	0.00
11-12	1.4680	1.1550	60.00	35.00	0.974		0.001	0.00
12-13	0.5416	0.7129	120.00	-220.00	0.975		0.000	0.00
13-14	0.5910	0.5260	60.00	10.00	0.962	0	-	-
14-15	0.7463	0.5450	60.00	20.00	0.961		0.000	0.00
15-16	1.2890	1.7210	60.00	20.00	0.959		0.000	0.00
16-17	0.7320	0.5740	90.00	40.00	0.959		0.000	0.00
1-18	0.1640	0.1565	90.00	40.00	0.996		0.002	0.00
18-19	1.5042	1.3554	90.00	40.00	0.983		0.014	0.01
19-20	0.4095	0.4784	90.00	40.00	0.979		0.003	0.00
20-21	0.7089	0.9373	90.00	40.00	0.978		0.001	0.00
2-22	0.4512	0.3083	90.00	50.00	0.985		0.008	0.01
22-23	0.8980	0.7091	420.00	200.00	0.975		0.015	0.01
23-24	0.8960	0.7011	420.00	-100.00	0.969		0.008	0.01
5-25	0.2030	0.1034	60.00	25.00	0.985		0.000	0.00
25-26	0.2842	0.1447	60.00	25.00	0.985		0.000	0.00
26-27	1.0590	0.9337	60.00	20.00	0.984		0.000	0.00
27-28	0.8042	0.7006	120.00	70.00	0.966	0	-	-
28-29	0.5075	0.2585	200.00	-300.00	0.965		0.001	0.00
29-30	0.9744	0.9630	150.00	70.00	0.961		0.001	0.00
30-31	0.3105	0.3619	210.00	100.00	0.960		0.000	0.00
31-32	0.3410	0.5302	60.00	40.00	0.959		0.000	0.00
7-20, 33	2.000	2.000					0.004	0.004
8-14, 34	2.000	2.000					0.001	0.001
11-21, 35	2.000	2.000					0.002	0.002
17-32, 36	0.500	0.500				0	-	-
24-28, 37	0.500	0.500					0.002	0.002

Tabela 4 - Ulazni podaci i rezultati preciznog programa tokova snaga (Ploss=97,9408 kW) za konfiguraciju sa sledećim otvorenim granama 7, 36, 37, 11 i 34 (nule u A koloni)
 čvor 12(0,6 Mvar baterija), čvor 23(0,3 Mvar baterija) i čvor 29(0,9 Mvar baterija), $\cos\varphi=0.9890$ (simultano, nehomogeni algoritam simulacije kaljenja, 13193\$)

grana	R (Ω)	X (Ω)	Pload (kW)	QLoad (kVar)	V p.u.	Ibranch modul (A)	grana Ploss (MW)	grana Qloss (MVar)
0-1	0.0922	0.0470	100.00	60.00	0.998		0.009	0.00
1-2	0.4930	0.2511	90.00	40.00	0.989		0.019	0.01
2-3	0.3660	0.1864	120.00	80.00	0.986		0.005	0.00
3-4	0.3811	0.1941	60.00	30.00	0.982		0.004	0.00
4-5	0.8190	0.7070	60.00	20.00	0.975		0.008	0.01
5-6	0.1872	0.6188	200.00	100.00	0.975		0.000	0.00
6-7	0.7114	0.2351	200.00	100.00	0.976	0	-	-
7-8	1.0300	0.7400	60.00	20.00	0.975		0.000	0.00
8-9	1.0440	0.7400	60.00	20.00	0.974		0.000	0.00
9-10	0.1966	0.0650	45.00	30.00	0.974		0.000	0.00
10-11	0.3744	0.1238	60.00	35.00	0.980	0	-	-
11-12	1.4680	1.1550	60.00	-565.00	0.979		0.003	0.00
12-13	0.5416	0.7129	120.00	80.00	0.977		0.001	0.00
13-14	0.5910	0.5260	60.00	10.00	0.975		0.000	0.00
14-15	0.7463	0.5450	60.00	20.00	0.974		0.000	0.00
15-16	1.2890	1.7210	60.00	20.00	0.972		0.000	0.00
16-17	0.7320	0.5740	90.00	40.00	0.972		0.000	0.00
1-18	0.1640	0.1565	90.00	40.00	0.996		0.002	0.00
18-19	1.5042	1.3554	90.00	40.00	0.986		0.013	0.01
19-20	0.4095	0.4784	90.00	40.00	0.983		0.003	0.00
20-21	0.7089	0.9373	90.00	40.00	0.982		0.002	0.00
2-22	0.4512	0.3083	90.00	50.00	0.986		0.003	0.00
22-23	0.8980	0.7091	420.00	-100.00	0.981		0.004	0.00
23-24	0.8960	0.7011	420.00	200.00	0.978		0.001	0.00
5-25	0.2030	0.1034	60.00	25.00	0.974		0.001	0.00
25-26	0.2842	0.1447	60.00	25.00	0.972		0.001	0.00
26-27	1.0590	0.9337	60.00	20.00	0.967		0.005	0.00
27-28	0.8042	0.7006	120.00	70.00	0.963		0.003	0.00
28-29	0.5075	0.2585	200.00	-300.00	0.961		0.001	0.00
29-30	0.9744	0.9630	150.00	70.00	0.957		0.001	0.00
30-31	0.3105	0.3619	210.00	100.00	0.956		0.000	0.00
31-32	0.3410	0.5302	60.00	40.00	0.956		0.000	0.00
7-20, 33	2.000	2.000					0.002	0.002
8-14, 34	2.000	2.000				0	-	-
11-21, 35	2.000	2.000					0.005	0.005
17-32, 36	0.500	0.500				0	-	-
24-28, 37	0.500	0.500				0	-	-



Slika 3 – Najjeftinija konfiguracija 12511\$, 8 (0.3 MVar), 24 (0.3 MVar) i 29 (0.9 MVar)

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 (17) u svom najnovijem istraživanju.
- Najjeftinija konfiguracija se dobija posle rekonfiguracije (za nju se zna ciljni optimum) pa nakon nje izvršenjem kompenzacije (ICOUNT=10 000 000 dužina Markovljevog lanca, EPOCH<0.00001 i a.r.<0.00001 stopa prihvatanja) za koju su ulazni parametri znatno rigorozniji od simultanog algoritma (ICOUNT=3000, a.r.<0.001). U ovom slučaju gubici iznose 93,8 kW a cena je 12511\$. Zatim dolazi konfiguracija kada se prvo primenjuje kompenzacija pa rekonfiguracija (95,123 kW i 12945\$). Poslednja je konfiguracija pri simultanom izvršenju rekonfiguracije i kompenzacije (97,9408 kW 13193\$). Razlog za ovo je što se u prvom slučaju verovatno dostiže globalni optimum što nije slučaj za drugi i treći slučaj. Simulirano kaljenje pri simultanoj primeni rekonfiguracije i kompenzacije je dobijeno nehomogenim algoritmom koji zaobilazi globalni optimum zbog brzog hlađenja i zbog toga je najskuplje. Napominjemo da su postignute znatne uštede u svim slučajevima jer je cena polazne konfiguracije 24312\$ (202,6 kW). Gubici prate cenu pojedinih primera i istog su redosleda po veličini kao i njihove cene. Gubici nisu najmanji kod simultane rekonfiguracije i kompenzacije kao što je to zaključeno u referenci (7).
- Najkraće je vreme (reda sat, sat ipo) za simultanu rekonfiguraciju i kompenzaciju zbog blagog kriterijuma simuliranog kaljenja (ICOUNT=3 000, EPOCH<0.001 i a.r.<0.001 za homogeni i ICOUNT=3 000, i a.r.<0.001 za nehomogeni algoritam).
- Budući rad na ovom problemu autori vide u uvažavanju varijacije opterećenja po sezonskim nivoima i funkciji cilja koja bi ispoštovala i cenu gubitaka električne energije u periodu od godinu dana (maksimalno, nominalno i minimalno opterećenje).
- Primenjeni algoritam je nov jer pomoću generatora slučajnih brojeva generiše samo radijalne konfiguracije, uključuje ograničenje minimalne i maksimalne snage baterija za instaliranje i koristi fleksibilni algoritam tokova snaga u MATPOWER okruženju (17).

LITERATURA

1. 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
2. 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

3. 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
4. Chiang H.D., Wang J.C., Cockings O. and Shin H.D., April 1990, "Optimal capacitor placements in distribution systems: part 1: A new formulation and the overall problem", "IEEE Transactions on Power Delivery", "Vol.5, No.2", pp. 634-642
5. Chiang H.D., Wang J.C., Cockings O. and Shin H.D., April 1990, "Optimal capacitor placements in distribution systems: part 2: Solution algorithms and numerical results", "IEEE Transactions on Power Delivery", "Vol.5, No.2", pp. 643-649
6. Stojanović B., 2004, „Primena algoritma simulacije kaljenja na kompenzaciju u razgranatim simetričnim radijalnim distributivnim mrežama“, „ELEKTROPRIVREDA“, „No.3“, str. 35-49
7. Jiang D., May 1994, "Electric distribution system reconfiguration and capacitor switching", Masters thesis, Worcester Polytechnic Institute, 77 pages
8. Peponis G.J., Papadopoulos M.P. and Hatziargyriou N.D., July 1995, "Distribution network reconfiguration to minimize resistive line losses", "IEEE Transactions on Power Delivery", "Vol.10, No.3", pp. 1338-1342
9. Peponis G.J., Papadopoulos M.P. and Hatziargyriou N.D. February 1996, "Optimal operation of distribution networks", "IEEE Transactions on Power Systems", "Vol.11, No.1", pp. 59-67
10. Augugliaro A., Dusonchet L. and Sanseverino E.R., January/February 1999, "Genetic, simulated annealing and tabu search algorithms: three heuristic methods for optimal reconfiguration and compensation of distribution networks", "ETEP", "Vol.9, No.1", pp 35-41
11. Nayeripour M., Moghaddam E.M. and Khooban M.H., 31 (2016), "Multi-periods distribution feeder reconfiguration at the presence of distributed generation through economic assessment using a new PSO algorithm", "Journal of Intelligent & Fuzzy Systems", pp. 321-331
12. Ameli A., Ahmadifar A., Shariatkhah M.H. and Vakilian M., 85 (2017), "A dynamic method for feeder reconfiguration and capacitor switching in smart distribution systems", "Electrical Power and Energy Systems", pp. 200-211
13. Salehi J., Oskuee M.R.J. and Amini A., 2017, "Stochastics multi-objective modeling of simultaneous reconfiguration of power distribution network and allocation of DG's and capacitors", "International Journal of Ambient Energy", pp. 1-15
14. 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
15. Rajić T. i Stojanović B., „Program za proveru povezanosti elektroenergetskog sistema“, CIRED (savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije), Vrnjačka banja 26-30.9.2016
16. 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
17. MATPOWER 6.0, User's Manual, December 16 2016, Zimmerman R.D. and Carlos E.M.S.
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. 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
20. Stojanović B. and Rajić T., 2017, "Novel approach to reconfiguration power loss reduction problem by simulated annealing technique", "Int Trans Electr Energ Syst.", e2464. <https://doi.org/10.1002/etep.2464>