

UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Branko D. Stojanović

**NOVI PRISTUP REKONFIGURACIJI
DISTRIBUTIVNIH MREŽA PRIMENOM METODE
SIMULIRANOG KALJENJA**

doktorska disertacija

Beograd, 2019

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING

Branko D. Stojanović

NOVEL APPROACH TO DISTRIBUTION
NETWORK RECONFIGURATION BY
SIMULATED ANNEALING TECHNIQUE

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2019

U SEĆANJE NA MOJU MAJKU LEKARA INTERNISTU
GORDANU DOBROSAVLJEVIĆ-STOJANOVIĆ

ZAHVALNICA

Zahvaljujem se asistentu Tomislavu Rajiću na svesrdnoj pomoći bez koje izrada ove doktorske disertacije ne bi bila moguća kao i mentoru Prof. Dr Zoranu Stojanoviću na korisnim sugestijama tokom izrade iste.

PODACI O MENTORU I ČLANOVIMA KOMISIJE

Mentor:

Dr Zoran Stojanović, vanredni profesor
(Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet)

Članovi komisije:

Dr Predrag Stefanov, vanredni profesor
(Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet)

Dr Andrija Sarić, redovni profesor
(Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad)

Dr Darko Šošić, docent
(Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet)

Dr Aleksandar Savić, vanredni profesor
(Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet)

Dr Dragan Olćan, vanredni profesor
(Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet)

Datum odbrane: _____

NOVI PRISTUP REKONFIGURACIJI DISTRIBUTIVNIH MREŽA PRIMENOM METODE SIMULIRANOG KALJENJA

Rezime

Tema doktorske disertacije već odavno privlači pažnju autora. Još od izrade magistarskog rada vezanog za simulirano kaljenje primenjeno na kompenzaciju iz 1997 autor se opredelio za rešavanje kompleksnijeg dinamičkog problema, a to je primena iste probablističke metode na slučaj rekonfiguracije distributivne mreže. Prvi rad autora vezan za rekonfiguraciju u časopisu Elektroprivreda potiče iz 2007 i tada je ova problematika rešavana metodom zamene grana, a iznalaženje globalnog optimuma trajalo je za mrežu Baran-a i Wu-a nekoliko meseci jer metoda nije bila do kraja isprogramirana. Sa poslednjim, u disertaciji, razvijenim programom u MATLAB-u i sa MATPOWER okruženjem i primenjenim kriterijumom konektivnosti mreže, program na serverskom računaru terminira za 3 min takođe iznalazeći globalni optimum.

U disertaciji su predstavljeni algoritmi tokova snaga korišćeni za rešavanje problema rekonfiguracije od kojih je data prednost programu u MATPOWER okruženju koji je tačan, za razliku od modifikovanog u radu razvijenog algoritma.

Simulirano kaljenje je probablistička metoda kombinatorijske optimizacije koja iznalazi globalni optimum uz određene uslove, a to je da proces spuštanja temperature, koja teži nuli, traje beskonačno dugo i da se na svakoj temperaturi ostvari stacionarna distribucija (homogeni algoritam). Postoji i nehomogeni algoritam koji snižava temperaturu pre svake primene Metropolis kriterijuma (posebni postupak prihvatanja skupljih konfiguracija) koji je znatno brži od homogenog jer ne zahteva ostvarenje termičkog ekvilibrijuma ali zato, zbog brzog hlađenja, dovodi do rešenja koje je suboptimalno. Funkcija cilja koja se minimizuje je gubitak aktivne snage za određenu konfiguraciju distributivne mreže. U disertaciji, u većini programa je primenjen nehomogeni algoritam, upravo zbog vremena trajanja proračuna, na štetu kvaliteta rešenja.

Razvijeni pristup je nov jer koristi do sada neupotrebljavane mehanizme kao što je kriterijum Lavorato et al. za nametanje ograničenja radijalnosti. Primenjeni algoritam predstavlja novinu u pristupu rekonfiguraciji putem metode simuliranog kaljenja naročito u pogledu prostog mehanizma poremećaja koji mora da se primenjuje u velikom broju iteracija, koji raste sa porastom dimenzije problema. Posebna pažnja posevećena je različitim mehanizmima poremećaja i zaključeno je da nekog opšteg rešenja nema, već da se oni generišu shodno konkretnom primeru i razvijenoj metodi simuliranog kaljenja.

Problem je formulisan kroz jednostruku funkciju cilja sa topološkim, električnim, radnim i ograničenjima potrošnje. Pokazano je da strujna i naponska ograničenja nisu od interesa jer se postupkom rekonfiguracije u svrhu smanjenja gubitaka, naponski profil samo popravlja, a opterećenja simetriraju. Višekriterijumskoj optimizaciji, prikazanoj na mreži Baran-a i Wu-a, dat je naglasak kroz optimizaciju gubitaka, naponske slike, broja komutacija, kompenzaciju i simetriranje opterećenja u odsustvu drugih podataka.

Nakon detaljne analize mreže Baran-a i Wu-a pažnja je posvećena složenijim mrežama od kojih je najkomplikovanija analizirana mreža sa 118 čvorova i 15 spojnih grana. Rešenje primenjenim algoritmom približilo se rezultatu iz literature (lošije je od njega) tek posle 40000 iteracija (inicijalizovano na 100000). Trajanje programa sa inicijalizovanjem na 100000 iteracija na serverskom računaru trajalo je između 17 i 18 dana. Primenjen je novi algoritam određivanja konektivnosti mreže pomoću determinante modifikovane matrice incidencije koja za radijalnu i konektovanu mrežu treba da je 1 ili -1.

Iz iznetog proizilazi i važan zaključak da je razvijena metoda i sa modifikacijama (MATPOWER algoritam tokova snaga i vrednost determinante matrice incidencije 1 ili -1) pogodna zbog dužine trajanja u postupku planiranja kada se rekonfiguracija vrši sezonski ili najčešće mesečno, a ne u toku eksploatacije i rada sa "živom mrežom".

U budućem radu autor poboljšanje brzine algoritma vidi u rešavanju problema minimalno razgranatog stabla težinskog grafa primenom Kruskal-ovog i Prim-ovog algoritma, kada se efikasni

algoritam tokova snaga primenjuje samo jedanput (na početku za upetljanu mrežu, svu spojni prekidači zatvoreni). Kao dalji rad na problemu rekonfiguracije distributivnih mreža nameće se i rešavanje simultanog problema rekonfiguracije i kompenzacije uz prisustvo distribuiranih generatora.

Ključne reči: rekonfiguracija, algoritam tokova snaga, konektivnost mreže, simulirano kaljenje, mehanizam poremećaja, višekriterijumska optimizacija, kompenzacija

Naučna oblast: Tehničke nauke – Elektrotehnika

Uža naučna oblast: Elektroenergetski sistemi

UDK: 621.3

NOVEL APPROACH TO DISTRIBUTION NETWORK RECONFIGURATION BY SIMULATED ANNEALING TECHNIQUE

Summary

The topic of the doctoral dissertation has attracted the author's interest for a long period of time. Since his master's thesis in 1997 dealing with simulated annealing and capacitor switching the author has decided to apply simulated annealing to a more complicated and dynamic problem of distribution network reconfiguration. The first author's paper on reconfiguration was published in "Elektroprivreda" journal in 2007 and the problem of Baran and Wu network was being solved by the branch exchange method and coming to the global optimum lasted for several months due to the lack of computing. Finally, in dissertation applied program, on fast server personal computer, in MATLAB and MATPOWER environment, with developed connectivity check, terminates in three minutes also finding global optimum.

The power flows are presented, used for solving reconfiguration problem, and MATPOWER algorithm is chosen because of its preciseness compared with relatively precise modified power flow algorithm, which is developed in dissertation.

Simulated annealing is a combinatorial optimization probabilistic method which reaches global optimum under certain conditions, one being that the decreasing of the temperature, which seeks zero, is endless and that at every temperature the thermal equilibrium is reached (homogeneous algorithm). Inhomogeneous algorithm also exists which decreases the temperature prior to each Metropolis criterium (special procedure of accepting worse configurations) which is much faster than homogeneous and does not demand thermal equilibrium and for the reason of quick cooling reaches suboptimal solution. The objective function which is minimized is active power loss of the network configuration. The author of dissertation, because of the algorithm duration, has in his last research turned to the inhomogeneous algorithm at the expense of the solution quality.

The presented approach is novel because it implements new criteria such as Lavorato et al. criterium for imposing radiality constraint. It stands as a new approach to the network reconfiguration by simulated annealing technique especially in applied perturbation mechanism which is simple and has to be applied in iteration number which rises with problem dimension. Special attention is given to different developed perturbation mechanisms with conclusion that there is not a general rule for their building as they need to be constructed in the manner which suits the problem the best.

The problem is formulated as a single objective function with topological, electric, operating and consumption constraints. It is shown that the current and voltage constraints are not of interest because with reconfiguration the voltage profile is flattened and the currents balanced. The multiobjective function which consists of the losses and the voltage profile, cost of iterations, compensation and load balancing for the lack of other data is shown on Baran and Wu network at the end of the dissertation.

After the in-depth analysis of Baran and Wu network, much attention was paid to the most complicated example (network with 118 nodes and 15 tie branches). The obtained solution which is the closest to the literature result (it is worse) was reached after 40000 iterations (the algorithm was set to 100000 iterations). The duration of the author's algorithm on fast server PC lasted between 17 and 18 days. The new network connectivity check was applied by the use of the determinant of modified incidence matrix which should be 1 or -1 for radial and connected network.

The conclusion that can be drawn is that the author's developed method even with modifications (MATPOWER efficient power flow and modified incidence matrix determinant 1 or -1) is suitable in planning process when reconfiguration is done on seasonal or monthly basis but not in the exploitation of the real network.

For the further research, the speed improvement of the algorithm the author seeks on the usage of Kruskal and Prim algorithm for solving the minimum spanning tree problem (of which distribution network resembles) of the weighted graph when the efficient power flow is done only

once (for completely meshed network). For the future work on the distribution network reconfiguration, the author is also undertaking the application of the capacitor switching and reconfiguration simultaneously in the presence of distributed generation.

Keywords: reconfiguration, efficient power flow algorithm, network connectivity, simulated annealing, perturbation mechanism, multiobjective optimization, capacitor switching

Scientific field: Technical science – Electrical engineering

Specific scientific field: Power Systems

UDK: 621.3

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. O rekonfiguraciji distributivne mreže	1
1.2. Pregled dosadašnjih radova u oblasti rekonfiguracije distributivnih mreža	2
1.3. Konceptija doktorske disertacije i njen doprinos	7
1.4. Ciljevi istraživanja	9
2. FORMULACIJA PROBLEMA	10
2.1. Prostor pretraživanja	10
2.2. Prostor stanja (prostor konfiguracija, populacija)	10
2.3. Funkcija cene (funkcija cilja)	11
2.4. Ograničenja	11
2.4.1. Topološka ograničenja	12
2.4.2. Električna ograničenja	12
2.4.3. Radna ograničenja	12
2.4.4. Ograničenja potrošnje	13
3. PROVERA POVEZANOSTI ENERGETSKOG SISTEMA	14
4. EFIKASNI ALGORITAM TOKOVA SNAGA ZA SIMETRIČNE RADIJALNE DISTRIBUTIVNE MREŽE BEZ TRANSFORMATORA	16
4.1. Modeli komponenti	17
4.2. Efikasni algoritam analize tokova snaga (modifikovani algoritam tokova snaga, relativno tačan algoritam)	17
4.2.1. Rezultati primene modifikovanog algoritma tokova snaga na mrežu Baran i Wu	19
4.3. Efikasni algoritam analize tokova snaga u MATPOWER okruženju primenjen u nastavku istraživanja	23
4.4. Drugi efikasni algoritmi analize tokova snaga primenjeni na problem rekonfiguracije distributivnih mreža	26
4.4.1. Algoritam tokova snaga iz magistarskog rada autora	27
4.4.2. Algoritam Shirmohammadi	27
4.4.3. Algoritam Glamočanin	27
4.4.4. Algoritam Goswami i Basu	28
4.4.5. Algoritam Borožan, Rajičić i Ačkovski	28
4.4.6. Algoritam McDermott	29
4.4.7. Algoritam Das	30
4.4.8. Diskusija	30
5. SIMULIRANO KALJENJE (eng. <i>SIMULATED ANNEALING</i>)	31
5.1. Kombinatorijska optimizacija	31
5.2. Analogija sa fizičkim kaljenjem	31
5.3. Algoritam simuliranog kaljenja	32
5.3.1. Verovatnoća prihvatanja	32
5.3.2. Karakteristike asimptotske konvergencije, Markov-ljevanac	33
5.3.3. Aproksimacija u konačnom vremenu	34
5.4. Šematski prikaz algoritma	35
6. PRIMENA ALGORITMA REŠENJA	39

6.1. Prostor pretraživanja	39
6.2. Funkcija cilja	39
6.3. Mehanizam poremećaja	39
6.3.1. Topološka ograničenja	40
6.3.2. Električna ograničenja	40
6.3.3. Ograničenja opterećenja i operaciona ograničenja	41
6.4. Mehanizam hlađenja	41
6.4.1. Početna temperatura	41
6.4.2. Ažuriranje temperature	41
6.4.3. Dužina Markov-ljevog lanca	41
6.4.4. Stop kriterijum	42
7. RAZVOJ ALGORITAMA SIMULIRANOG KALJENJA SA OSVRTOM NA MEHANIZAM POREMEĆAJA I MEHANIZAM HLAĐENJA	43
7.1. Hsiao-Dong Chiang i Rene Jean-Jumeau	43
7.2. Dan Jiang	44
7.3. Hong-Chan Chang i Cheng-Chien Kuo	44
7.4. Antonino Augugliaro, Luigi Dusonchet i Eleonora Riva Sanseverino	45
7.5. Ching-Tzong Su i Chu-Sheng Lee	45
7.6. Young-Jae Jeon i Jae-Chul Kim	45
7.7. Ž.N. Popović, V.Đ. Kerleta i D.S. Popović	47
7.8. Diskusija	48
7.9. Mehanizmi primenjeni u ovoj doktorskoj disertaciji	48
8. NUMERIČKI REZULTATI	49
8.1. Najprostija mreža Civanlar i Grainger	49
8.2. Test mreža Baran-a i Wu-a	50
8.3. Složenija mreža Jiang	57
8.4. Najsloženija mreža	61
8.5. Višekriterijumska optimizacija	72
8.6. Pareto višekriterijumska optimizacija	77
9. SIMULTANA REKONFIGURACIJA I OTOČNA KOMPENZACIJA DISTRIBUTIVNIH MREŽA PRIMENOM METODE SIMULIRANOG KALJENJA	82
9.1. Rekonfiguracija distributivne mreže i otočna kompenzacija kada su zanemareni gubici na isporučenu električnu energiju	83
9.2. Rekonfiguracija i otočna kompenzacija distributivne mreže u svrhu smanjenja gubitaka na električnu energiju	88
10. ZAKLJUČAK	95
LITERATURA	97
PRILOZI	103
Prilog 1 – Rešavanje efikasnog algoritma analize tokova snaga u MATPOWER okruženju kod programa rekonfiguracije i otočne kompenzacije	103
Prilog 2 – Osnovni program za rekonfiguraciju distributivne mreže u svrhu smanjenja gubitaka aktivne snage (nehomogeni algoritam)	106
Prilog 3 – Osnovni potprogram za rekonfiguraciju distributivne mreže u svrhu smanjenja gubitaka aktivne snage	108

LISTA SLIKA

Slika 2.1. Tipična radijalna distributivna mreža	12
Slika 3.1. Distributivna mreža	14
Slika 4.1. mreža Baran i Wu	19
Slika 4.2. Prikaz ispravne renumeracije	22
Slika 5.1. Verovatnoća prihvatanja u zavisnosti od temperature i promene u funkciji cilja	33
Slika 5.4.1. Šematski prikaz homogenog algoritma	36
Slika 5.4.2. Šematski prikaz nehomogenog algoritma	37
Slika 8.1. Najprostija mreža Civanlar i Grainger	49
Slika 8.2.1. Naponski profil mreže za početnu, optimalnu i suboptimalne konfiguracije (neke krive se poklapaju)	53
Slika 8.2.2. Struje mreže za početnu, optimalnu i suboptimalne konfiguracije (neke krive se poklapaju)	54
Slika 8.2.3. Aktivni gubici mreže za početnu, optimalnu i suboptimalne konfiguracije (neke krive se poklapaju)	54
Slika 8.2.4. Reaktivni gubici mreže za početnu, optimalnu i suboptimalne konfiguracije (neke krive se poklapaju)	55
Slika 8.2.5. Globalni optimum	55
Slika 8.2.6. Graf konvergencije (zavisnost prihvaćenih rešenja od broja iteracija kojih ima 20000)	55
Slika 8.2.7. Graf konvergencije (zavisnost prihvaćenih rešenja od temperature, početna 5000 °C)	56
Slika 8.3.1. Složenija mreža Jiang	57
Slika 8.3.2. Graf konvergencije (zavisnost prihvaćenih rešenja od broja iteracija kojih ima 100000)	61
Slika 8.3.3. Graf konvergencije (zavisnost prihvaćenih rešenja od temperature, početna 5000 °C)	61
Slika 8.4.1. Najsloženija analizirana mreža	62

Slika 8.4.2. Graf konvergencije (zavisnost prihvaćenih rešenja od broja iteracija kojih ima 10000)	68
Slika 8.4.3. Graf konvergencije (zavisnost prihvaćenih rešenja od temperature, početna 5000 °C)	68
Slika 8.4.4. Graf konvergencije (zavisnost prihvaćenih rešenja od broja iteracija kojih ima 100000)	71
Slika 8.4.5. Graf konvergencije (zavisnost prihvaćenih rešenja od temperature, početna 5000 °C)	72
Slika 8.6.1. Zavisnost $f_2=f(f_1)$ za mrežu Baran-a i Wu-a, provera 12	79
Slika 8.6.2. Zavisnost $f_3=f(f_1)$ za mrežu Baran-a i Wu-a, provera 12	80
Slika 8.6.3. Zavisnost $f_3=f(f_2)$ za mrežu Baran-a i Wu-a, provera 12	80
Slika 8.6.4. Zavisnost $f_3=f(f_1, f_2)$ za mrežu Baran-a i Wu-a, provera 12	80
Slika 8.6.5. Zavisnost $F=f(\text{ICOUNT})$, $F=\text{EOLD}$ (normalizovano) za mrežu Baran-a i Wu-a, provera 12	81
Slika 8.6.6. Zavisnost $F=f(T)$, $F=\text{EOLD}$ (normalizovano) za mrežu Baran-a i Wu-a, provera 12	81
Slika 9.1.1. Blok dijagram za slučaj simultane rekonfiguracije i otočne kompenzacije (nehomogeni algoritam)	84
Slika 9.2.1. Blok dijagram algoritma kada se postavljaju fiksne kondenzatorske baterije kod rekonfigurisane mreže	92
Slika 9.2.2. Blok dijagram algoritma kada se postavljaju regulacione kondenzatorske baterije kod rekonfigurisane mreže	93
Slika 9.2.3. Zavisnost funkcije cilja od broja iteracija za slučaj postavljanja fiksnih kondenzatorskih baterija bez heuristične korekcije	94
Slika 9.2.4. Zavisnost funkcije cilja od temperature (početna je 5000°C) za slučaj postavljanja fiksnih kondenzatorskih baterija bez heuristične korekcije	94

LISTA TABELA

Tabela 4.2. ABSUit1 (kV), ARGUit1 (rad) i DVMAX	19
Tabela 5.1. Simulirano kaljenje u poređenju sa fizičkim kaljenjem	32
Tabela 5.2. Elementi mehanizma hlađenja	35
Tabela 6.1. Primena simuliranog kaljenja	39
Tabela 6.2. Mehanizam poremećaja	40
Tabela 8.1.1. Ulazni podaci i rezultati MATPOWER tokova snaga (Ploss=514.43 kW) za polaznu konfiguraciju 5-14, 3-9 i 8-12 grane otvorene (Slika 8.1., nule u A koloni), bazna snaga 100 MVA, Un=12.66 kV	49
Tabela 8.1.2. Ulazni podaci i rezultati MATPOWER tokova snaga (Ploss=469.14 kW) za globalni optimum 5-14, 7-9 i 6-8 grane otvorene (nule u A koloni), bazna snaga 100 MVA, Un=12.66 kV	50
Tabela 8.2.1. Ulazni podaci i rezultati preciznog programa tokova snaga (Ploss=202.6 kW) za početnu konfiguraciju 33, 34, 35, 36 i 37 otvorene grane (nule u A, kW i kVAr kolonama)	51
Tabela 8.2.2. Ulazni podaci i rezultati preciznog programa tokova snaga (Ploss=139.5 kW) za ciljni optimum konfiguraciju 7, 9, 14, 32 i 37 otvorene grane (nule u A, kW i kVAr kolonama)	52
Tabela 8.2.3. Ilustracija primenljivosti modifikovanog algoritma tokova snaga prikazana na primeru mreže Baran-a i Wu-a	53
Tabela 8.3.1. Ulazni podaci i rezultati MATPOWER tokova snaga (Ploss=225 kW) za polaznu konfiguraciju 69, 70, 71, 72 i 73 grane otvorene (Slika 8.3.1., nule u A koloni), bazna snaga 100 MVA, Un=12.66 kV	58
Tabela 8.3.2. Ulazni podaci i rezultati MATPOWER tokova snaga (Ploss=99.6052 kW) za optimalnu konfiguraciju 70, 69, 61, 57 i 14 grane otvorene (nule u A koloni), bazna snaga 100 MVA, Un=12.66 kV	59
Tabela 8.4.1. Ulazni podaci i rezultati MATPOWER tokova snaga (Ploss=1298.1 kW) za polaznu konfiguraciju 118-132 grane otvorene (Slika 8.4.1., nule u A koloni), bazna snaga 100 MVA, Un=11 kV	62
Tabela 8.4.2. Ulazni podaci i rezultati MATPOWER tokova snaga (Ploss=1131.8 kW) za dobijenu konfiguraciju 126, 124, 109, 97, 85, 82, 74, 60, 55, 52, 47, 45, 32, 20, 15 grane otvorene (nule u A koloni), bazna snaga 100 MVA, Un=11 kV	65

Tabela 8.4.3. Ulazni podaci i rezultati MATPOWER tokova snaga ($P_{loss}=917.6$ kW) za novodobijenu konfiguraciju 129, 109, 95, 87, 85, 76, 72, 61, 52, 47, 42, 38, 33, 25, 21 grane otvorene (nule u A koloni), bazna snaga 100 MVA, $U_n=11$ kV	69
Tabela 8.5.1. Cena kondenzatorske baterije (\$)	73
Tabela 8.5.2. Rezultati višekriterijumske optimizacije za mrežu Baran-a i Wu-a [6], primenjen nehomogeni algoritam simuliranog kaljenja sa sledećim parametrima $ICOUNT < 20000$, pravilo snižavanja temperature $T=0.95 * T$ i stopa prihvatanja a.r. < 0.001	74
Tabela 8.5.3. Rezultati višekriterijumske optimizacije za mrežu Jiang [101], primenjen nehomogeni algoritam simuliranog kaljenjasa sledećim parametrima $ICOUNT < 100000$, pravilo snižavanja temperature $T=0.99 * T$ i stopa prihvatanja a.r. < 0.001	75
Tabela 8.6.1. Rezultati Pareto višekriterijumske optimizacije za mrežu Baran-a i Wu-a [6], primenjen nehomogeni algoritam simuliranog kaljenja sa sledećim parametrima $ICOUNT < 20000$, pravilo snižavanja temperature $T=0.95 * T$ i stopa prihvatanaj a.r. < 0.001	78
Tabela 8.6.2. Rezultati Pareto višekriterijumske optimizacije za mrežu Jiang [101], primenjen nehomogeni algoritam simuliranog kaljenja sa sledećim parametrima $ICOUNT < 100000$, pravilo snižavanja temperature $T=0.99 * T$ i stopa prihvatanja a.r. < 0.001	78
Tabela 9.1.1. Ulazni podaci i rezultati preciznog programa tokova snaga ($P_{loss}=93.8$ kW) za konfiguraciju sa sledećim otvorenim granama 37 32 14 9 i 7 (nule u A koloni), čvor 8 (0.3 MVar baterija), čvor 24 (0.3 MVar baterija) i čvor 29 (0.9 MVar baterija), $\cos\varphi=0.9749$ (rekonfiguracija pa kompenzacija, 12511\$, Slika 8.5.)	85
Tabela 9.1.2. Ulazni podaci i rezultati preciznog programa tokova snaga ($P_{loss}=93.3997$ kW) za konfiguraciju sa sledećim otvorenim granama 37 32 14 9 i 7 (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), $\cos\varphi=0.9890$ (kompenzacija pa rekonfiguracija, 12738\$)	86
Tabela 9.1.3. Ulazni podaci i rezultati preciznog programa tokova snaga ($P_{loss}=97,9408$ kW) za konfiguraciju sa sledećim otvorenim granama 36, 37, 34, 11 i 7 (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\$)	87
Tabela 9.2.1. Rezultati razvijenog programa u slučaju postavljanja fiksnih kondenzatorskih baterija	89
Tabela 9.2.2. Rezultati razvijenog programa u slučaju postavljanja regulacionih kondenzatorskih baterija	90

1. UVOD

1.1. O rekonfiguraciji distributivne mreže

Rekonfiguracija distributivnih mreža vrši se radi optimizacije i upravljanja distributivnim sistemom i važna je za njegovu automatizaciju u cilju uvođenja tehnologija pametnih mreža (eng. *smart grid*). Napojni vodovi distributivne mreže su radijalni u pogledu konfiguracije. Ona se može menjati ručno ili automatski tako da se napajaju svi potrošači u dozvoljenim naponskim granicama, smanje gubici i poveća kvalitet napajanja. Rekonfiguracijom mreže smanjuje se opterećenje pojedinih vodova. Potrebne komutacije vrše se sekcionim prekidničima (normalno zatvorenim) i spojnim prekidničima (normalno otvorenim). Pri komutacijama mora se zadržati radijalnost mreže i napajanje svih potrošača.

Distributivne mreže rade u radijalnom režimu zbog jednostavnijeg delovanja zaštite i manjih struja kratkog spoja. Gubici mreže se menjaju sa njenom konfiguracijom pri istom nivou opterećenja. U normalnim radnim uslovima distributivni inženjeri menjaju konfiguraciju mreže otvaranjem i zatvaranjem komutacione opreme (rasklopnih uređaja) u svrhu povećanja pouzdanosti i smanjenja gubitaka. Rezultujuća konfiguracija mora ostati radijalna i mora da ispoštuje napajanje kompletnog konzuma. U distributivnom sistemu postoji veliki broj rasklopnih uređaja i broj mogućih komutacija je prevelik.

Distributivni sistemi se sastoje od grupa međusobno povezanih radijalnih mreža. Konfiguracija se može menjati komutacijama da bi se prenelo opterećenje između napojnih vodova pomoću sekcionih i spojnih prekidča. Rekonfiguracija distributivnih mreža je proces u svrhu ponovnog napajanja područja koja su ostala isključena nakon nastanka kvara ili u svrhu ispunjenja optimizacionih kriterijuma. Kao postupak ona se može formulirati na sledeći način: za zadati nivo opterećenja i mrežu sa određenim brojem sekcionih i spojnih prekidča pronaći radijalnu konfiguraciju distributivne mreže koja minimizira gubitke i napaja konzum pri zadovoljavajućem naponu. Ispunjenje ova dva optimizaciona kriterijuma je najčešće prisutno mada postoje i drugi optimizacioni kriterijumi.

Rekonfiguracija distributivnih mreža je kompleksan kombinatorijski optimizacioni problem koji iznalazi najbolju konfiguraciju sa minimalnim gubicima optimizirajući odgovarajuću funkciju cilja, a u isto vreme zadovoljava ograničenja nametnuta mreži. Ova ograničenja su veličine napona u čvorovima mreže, dozvoljeno opterećenje grana, radijalnost mreže i napajanje kompletne potrošnje. U skorijoj prošlosti dosta je urađeno na minimizaciji gubitaka distributivnih sistema. Rekonfiguracija u svrhu smanjenja gubitaka je prvi put analizirana u [1]. Korišćena je optimizaciona tehnika grananja i ograničavanja (eng. *branch-and-bound*) da bi se odredila konfiguracija koja ima minimalne gubitke.

Rekonfiguracija mreže, može se svrstati u probleme vezane za „minimalno razgranato stablo“ (eng. *minimum spanning tree*) koji su poznati kao i NP (eng. *non polynomial*) kompletni kombinatorijski optimizacioni problemi. Ovo su kompjuterski problemi kod kojih vreme proračuna nije ograničeno polinomom dimenzije problema, kod rekonfiguracije dimenziju problema predstavlja broj komutacionih elemenata, tj. broj grana koje se mogu uključiti ili isključiti. Pokazuje se da je ova vremenska zavisnost eksponencijalna [2].

Distributivni sistemi se projektuju da rade ekonomično i pouzdano. Najčešće se od distributivnih mreža zahteva ispunjenje sledećih ciljeva:

1. smanjenje gubitaka snage,
2. simetriranje opterećenja,
3. popravljavanje naponskog profila i
4. restauracija mreže.

Najvažniji cilj rekonfiguracije je smanjenje gubitaka snage jer se njime smanjuje cena isporučene električne energije potrošaču. Na gubitke u sistemu utiču mnogi faktori kao što su nesimetrija opterećenja, niski naponi i dugi distributivni vodovi.

Simetriranjem opterećenja određuje se optimalna konfiguracija radi balansiranja opterećenja između napojnih vodova. Tako se vrši preraspodela opterećenja sa preopterećenih na manje opterećene vodove da bi se obezbedio granični transfer opterećenja i kao posledica toga povećala radna efikasnost. Simetriranjem opterećenja se ublažava preopterećenje opreme da bi se izbegli nepotrebni gubici u sistemu i njeno brže starenje koje bi još povećalo gubitke.

Izlazna konfiguracija (napajane distributivne mreže iz trafo stanice) je radijalna i normalna pojava su padovi napona duž mreže. Da bi se naponi čvorova održavali u dozvoljenim granicama korišćeni su različiti postupci uključujući naponske regulatore i proizvođače reaktivne snage. Rekonfiguracijom se menja topologija mreže, veličina protoka snaga i preopterećenje, a takođe se menjaju i duge deonice na kojima bi pad napona bio znatan tako da se njome postiže bolji naponski profil i time popravljaju naponska slika.

Prethodno navedeni ciljevi vezani su za normalna stanja u distributivnim mrežama. Restauracija mreže odnosi se na situacije nastanka kvarova kada se otvaraju prekidači da bi isključili deo sistema. Izolacijom kvara može doći do isključenja potrošača ili distribuiranih generatora. Rekonfiguracija u cilju restauracije preusmerava tokove snaga da bi se ponovo uspostavilo napajanje potrošača i distribuirani generatori uključili u mrežu i tako održalo normalno stanje i posebni uslovi napajanja, kao što su minimalno vreme povratka napajanja, maksimalno napajani konzum i najmanji broj komutacija.

1.2. Pregled dosadašnjih radova u oblasti rekonfiguracije distributivnih mreža

Rekonfiguracija mreže je mešovito celobrojni nelinearni optimizacioni problem sa nediferencijabilnom funkcijom cilja jer je status rasklopnih uređaja binaran (otvoreno/zatvoreno, 0/1), a gubici aktivne snage su kvadratne zavisnosti sa kontinualnim promenljivima (struje i naponi distributivne mreže).

S obzirom na prirodu problema rekonfiguracije, postoje tri pristupa njegovom rešavanju:

1. matematički [3- 5],
2. heuristički, pod heuristikom se podrazumeva iskustveno, „nematematičko znanje“ [6-33] i
3. meta-heuristički [34-66].

Matematičke metode zahtevaju mnogo računarskog vremena i pokazale su se nepraktične za rešavanje problema velikih dimenzija, ali nalaze optimalno rešenje. Heurističke metode vrlo brzo nalaze pod-optimalna rešenja. Sa druge strane, meta-heurističke metode mogu biti i bolje (nalaze bolja rešenja) i brže od heurističkih metoda.

Matematička metoda izložena u radu [28] koristi novi algoritam koji eliminiše potrebu matricnih operacija i sve operacije izvršava na grafu distributivne mreže. Algoritam je primenjen na mreže sa jednim izvornim čvorom. Glavne prednosti algoritma su direktan prilaz kreaciji optimalnog rešenja, potpuno podržavanje radijalne konfiguracije tokom celog algoritma, lako zadovoljenje naponskih ograničenja i ograničenja opterećenja, nepotrebnost početnog rešenja i mogućnost dobijanja konfiguracije čiji su gubici minimalni. Numerički rezultati pokazuju da je algoritam validan i efikasan za praktičnu primenu.

Autor u [44] predlaže nelinearni matematički konstruktivni metod za rešenje problema rekonfiguracije. U ovom algoritmu se kreće od mreže kod koje su svi radni rastavljači otvoreni i u svakom koraku zatvara se rastavljač kada je povećanje funkcije cilja minimalno. Funkcija cilja se definiše kao priraštaj gubitaka podeljen priraštajem potrošnje. Uprošćena formula za sračunavanje gubitaka je razvijena radi provere kandidat rastavljača.

Od heurističnih metoda najpoznatije su [67]:

1. metode zasnovane na kriterijumu smanjenja gubitaka [6-8, 14, 16, 19, 27, 33],
2. metode najmanjih struja [9, 15, 18, 20- 22, 26, 31] i
3. metode zasnovane na komutacionim indeksima [23].

Prvi rad iz grupe metoda zasnovanih na kriterijumu smanjenja gubitaka predložili su autori u [7], uvodeći formulu čijim korišćenjem se može zaključiti da li se komutacionom opcijom dobija povećanje/smanjenje u gubicima. Na ovaj način se vrši filtriranje opcija kojima se ne smanjuju

gubici. Bira se par prekidača, jedan koji se otvara i drugi koji se zatvara. Ova procedura je vremenski vrlo zahtevna i ne garantuje dostizanje rešenja bliskom optimalnom.

Autori u [6] prezentuju alternativnu zamenu grana sa mehanizmom filtriranja primenjujući dva približna algoritma tokova snaga sa različitim stepenom tačnosti, tj. uprošćene metode i ažuriranje zamenom unazad i unapred. Metode daju umerenu procenu smanjenja gubitaka.

U [1] predlaže se metoda najmanjih struja kada se polazi od upetljane mreže, otvaraju veze sa najmanjim protokom i konačno primenjuje algoritam grananja i ograničavanja (eng. *branch-and-bound*).

U [9] koristi se robustan heuristični metod zasnovan na idejama [1]. Ovaj algoritam koristi optimalni protok snaga (eng. *optimal power flow*) i konvergira ka rešenju bliskom optimalnom koje ne zavisi od početnog stanja mrežnih prekidača. Prikazana metoda zahteva ograničenje broja dozvoljenih komutacija radi rekonfiguracije. Interesantno je primetiti da se pri korišćenju programa koji su autori razvili dobija da su najjeftinije upetljane konfiguracije u odnosu na optimalnu radijalnu konfiguraciju. Primenjen je iterativni algoritam tokova snaga, efikasan za proračun slabo upetljenih mreža, koji zahteva renumeraciju čvorova po različitim nivoima pri proračunu gubitaka, što kod velikog broja konfiguracija nije rešeno na zadovoljavajući način.

U [15] primenjen je optimalni algoritam tokova snaga za mrežu sa jednom petljom stvorenom zatvaranjem normalno otvorenog prekidača, a radijalna konfiguracija se uspostavlja otvaranjem određenog dotle zatvorenog prekidača iz formirane petlje. Ovaj postupak se ponavlja dok se ne dobije konfiguracija sa minimalnim gubicima aktivne snage. Prost, brz i približan algoritam tokova snaga je takođe razvijen radi sprovođenja algoritma rekonfiguracije.

Metoda prikazana u [18] je zasnovana na uslovima optimalnosti koje su razvili Merlin i Back [1]. Upotrebljen je novi brzi i pouzdani efikasni algoritam tokova snaga radi pretraživanja elemenata sistema koji je podesan i za realne mreže. Testiranje je izvršeno na tri test sistema iz literature i postignuti su bolji rezultati. Poznata procedura numerisanja grana po nivoima je primenjena u svrhu razvoja tri nova algoritma za formiranje matrice impedansi petlje. Primenjeno je novo delimično renumerisanje grana posle komutacije grane koja pripada jednoj ili većem broju petlji i ponovne procene matrice impedansi petlje. Dobija se rešenje blisko globalnom optimumu.

U radu [22] predstavljena metodologija ima tri osnovna dela. Procenu opterećenja u realnom vremenu, utvrđivanje konfiguracije sa minimalnim gubicima i procenu troška i koristi. Metoda je primenjena na skopskoj distributivnoj mreži radi njenog optimalnog planiranja. Istaknuto je da ova distribucija neće ići na rekonfiguraciju čak ni u teoretski najpovoljnijim uslovima opterećenja u svrhu smanjenja gubitaka prikazanom metodom. Rekonfiguracija na dnevnom nivou nije ekonomski opravdana. Čak ni automatski prekidači nisu finansijski opravdani u svrhu česte rekonfiguracije. Ona je opravdana na sezonskom nivou sa malim korekcijama svaki mesec. Ovakvim planiranjem se može mnogo uštedeti na ceni. Da bi se procenio trošak i korist od rekonfiguracije sa minimalnim gubicima sledeće treba uzeti u razmatranje: cenu gubitaka, cenu komutacije i cenu prekida u napajanju.

U [26] za utvrđivanje optimalne konfiguracije korišćena je heuristika koja polazi od upetljane konfiguracije kod koje su svi komutacioni elementi zatvoreni. Otvaranje prekidača se utvrđuje na osnovu minimizacije gubitaka koji se računaju korišćenjem algoritma tokova snaga. Koristi se i metoda zamene grana. Rezultati pokazuju da se iznalazi globalni optimum ili rešenje njemu veoma blisko. Koristi se Newton-Raphson algoritam tokova snaga koji primenjuje pravougaone koordinate. Krajnja konfiguracija ne zavisi od početnog statusa komutacione opreme. Prikazanom metodom najmanjih struja izbegnuta je kombinatorijska eksplozija broja konfiguracija koje treba ispitati.

Prikazani algoritam u [23] primenjuje komutacione indekse da bi se dobio valjani skup komutacionih operacija. Ovi indeksi su izvedeni korišćenjem pada napona na granama i iz podataka o vodovima. Komutiraju prekidači sa najvećim indeksom u svakoj petlji. Razmatra se upetljana konfiguracija umesto radijalne kada se svi spojni prekidači zatvore. Razmatranjem samo najvećeg komutacionog indeksa u svakoj petlji broj podobnih stanja se drastično može smanjiti.

Od meta-heurističkih metoda najpoznatije su metode zasnovane na:

1. genetskim algoritmima (eng. *genetic algorithms*) [34, 36, 49, 50, 56, 58, 60],
2. ekspertskim sistemima (eng. *expert systems*) [37],
3. evolutivnim algoritmima (eng. *evolutionary programming* [48, 63]; kukavičji [61], pčelinji [64] i žablji algoritam [68]),
4. veštačkim neuronskim mrežama (eng. *artificial neural networks*) [35, 38, 39],
5. tabu pretraživanju (eng. *tabu search*) [34, 46, 51, 54, 57],
6. optimizaciji kolonijom mrava (eng. *ant colony optimization*) [47, 52, 53, 66],
7. optimizaciji rojem čestica (eng. *particle swarm optimization*) [55, 62, 65] i
8. simuliranom kaljenju (eng. *simulated annealing*) [34, 40-46].

Genetski algoritam je razvio profesor John Holland [69] sa kolegama i studentima sa Univerziteta u Michigan-u sredinom šezdesetih.

Istraživanja u [36] primenjenog algoritma pokazuju da je razvijeni genetski algoritam efikasniji od simuliranog kaljenja i njegova mnoga poboljšanja su predložena. Nekoliko numeričkih primera na srednje razgranatim mrežama je analizirano da bi se demonstrirala validnost i efikasnost predloženog algoritma. Prvi put je vreme proračuna dato u minutama i ide do maksimalno 3109,9 minuta. Primenjeni kompjuterski jezik je Fortran 77. Iz iznetih numeričkih primera se može zaključiti da se može pronaći približni globalni optimum i da je postignuta ušteda veća od 10 %.

Autori [49] izlažu novu metodu zasnovanu na fazi mutiranom genetskom algoritmu radi optimalne rekonfiguracije radijalne distributivne mreže. Predloženi algoritam je uspešno primenjen za rešenje problema diskontinualne višestruke optimizacije. Karakteriše ga očuvanje radijalnosti mreže posebnom metodom šifriranja i dobra konvergencija zahvaljujući kontrolisanim mutacijama uz upotrebu fazi logike.

U studiji [37] prezentovani su ekspertski sistemi za rekonfiguraciju mreže koja je automatizovana. Cilj je smanjenje preopterećenja vodova i transformatora i očuvanje naponskih granica. Heurističnom metodom najboljeg prvog pokušaja moguće je pronaći rešenje blisko optimumu za 1 sekundu dok je iscrpnim pretraživanjem potrebno generisati 74 i 293 iteracije za uklanjanje preopterećenja kod prvog transformatora analiziranog test sistema odnosno kod rešavanja problema narušavanja naponskih granica istog test sistema.

U [61] primenjen je meta-heuristični evolutivni kukavičji algoritam. Funkcija cilja optimizira gubitke aktivne snage i indeks naponske stabilnosti koji je definisan u članku. Korišćen je poseban algoritam određivanja fundamentalnih petlji i provere radijalnosti mreže pomoću determinante kvadratne matrice incidencije čvorova i grana. Analiza je izvršena na mrežama od 33, 69 i 118 čvorova. Prikazano je 7 različitih scenarija rada mreže uz učešće i distribuiranih generatora. Broj iteracija za prva dva primera bio je 2000. Vršeno je poređenje sa dosad razvijenim metodama optimizacije i zaključeno je da adaptivno kukavičje pretraživanje primenjeno u članku daje bolja rešenja za kraće vreme računanja.

U [64] iznet je novi meta-heuristični evolutivni pčelinji algoritam za rešavanje kombinovanog problema otočne kompenzacije i rekonfiguracije mreže uz prisustvo nelinearne potrošnje. Metoda je verifikovana na standardnoj mreži sa 33 čvora i na realnoj mreži regije Sirjan u Iranu od 77 čvorova. Pokazano je da obe metode daju bolje rezultate kada se primene simultano nego pojedinačno. Ako se zanemare harmonici, može doći do rezonance između otopnih kondenzatora i induktivnih elemenata mreže i kao posledica toga, veliki nivoi izobličenja. I proces rekonfiguracije takođe utiče na nivo harmonika u sistemu. Analiza je izvršena za 6 različitih scenarija. Višekriterijumska optimizacija izvršena je uz učešće težinskih koeficijenata u funkciji cilja koje bira operater. Uvažena su i tri nivoa opterećenja vršno, nominalno i minimalno.

U članku [68] je prikazan novi hibridni optimizacioni algoritam kojim se određuju Pareto granična rešenja kao kandidati za višekriterijumsku optimizaciju rekonfiguracije mreže kod koje se uzima u obzir gubitak aktivne snage, naponski profil i totalna harmonijska distorzija. Kombinovan je fazi koncept Pareto dominacije sa meta-heurističnim evolutivnim žabljim algoritmom koji automatski generiše radijalne konfiguracije čime je vreme računanja znatno manje. Algoritam zasnovan na Pareto dominaciji predlaže alternativna rešenja u čemu je njegova prednost nad klasičnom višekriterijumskom optimizacijom sa težinskim koeficijentima i jednom funkcijom cilja.

Alternativnim rešenjima daje se operateru fleksibilnost da izabere ono koje popravlja indekse koji su značajniji u vreme analize u skladu sa stanjem mreže. Korišćen je Newton-Raphson-ov algoritam tokova snaga. Predloženi algoritam programiran je na računaru procesora Intel Xeon CPU E5-26030 @ 1.80 GHz.

Metode veštačke inteligencije su postale popularne sa automatizacijom distributivnih mreža. Veštačke neuralne mreže određuju pogodnu topologiju sistema kojom se smanjuju gubici u skladu sa varijacijom modela opterećenja. 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 mreži. Jedna od mogućih primena neuralnih mreža je i lokalno upravljanje poveznim prekidačima u cilju smanjivanja gubitaka.

Metoda koja je prikazana u [38] se u osnovi razlikuje od dotadašnjih u tome da transfer opterećenja i odgovarajući efikasni algoritam tokova snaga tokom procesa pretraživanja nije potreban. Uvežbani skup veštačkih neuralnih mreža je optimalna topologija sistema koja odgovara različitim modelima opterećenja i on minimizuje gubitke pri zadatim uslovima. Posebno se naglašava da razvijeni metod ima mogućnost rada na realnoj mreži automatizovanog distributivnog sistema što nije slučaj kod dotadašnjih konvencionalnih računarskih algoritama.

Autori koriste veštačke neuralne mreže u [39] da bi se odredio status otvoreno/zatvoreno sekcione komutacione opreme. Potrošnja je modelovana kao konstantna snaga. Ističe se da su neuralne mreže pogodnije za primenu na distributivnom sistemu u poređenju sa kvadratnim programiranjem, simuliranim kaljenjem i heurističnim metodama. Broj prekidača za komutaciju se utvrđuje metodom zamene grana.

Autori u [46] zaključuju da je simulirano kaljenje pogodno za rešavanje velikih problema kombinatorijske optimizacije ali zahteva dugo vreme proračuna. Tabu pretraživanje daje bolja rešenja u smislu grubog pretraživanja ali ne može da garantuje konvergenciju. U radu je predstavljen hibridni algoritam ove dve metode. Pominje se dvostruko spregnuta lista podataka (eng. *double linked-list data structure*) radi prikaza ulaznih podataka distributivnog sistema.

U [51] prikazan je poboljšani tabu algoritam radi smanjenja gubitaka rekonfiguracijom u distributivnim sistemima velikih razmera. Upotrebljen je mutacioni operator iz genetskog algoritma da oslabi zavisnost globalnog pretraživanja od dužine tabu lanca. Izabrana okolina rešenja koja sadrži nekoliko optimalnih zamena spojnih prekidača pridruženih petljama je iskorištena da poboljša efikasnost lokalnog pretraživanja i uštedi na vremenu proračuna. Tabu pretraživanje koristi tabu informacije da ne bi završilo sa lokalnim optimumom. Algoritam Baran-a i Wu-a se koristi za proračun gubitaka u mreži. Test sistem je distributivna mreža 11 kV sa 118 sekcionih i 15 spojnih rastavljača, a broj iteracija je 600.

Novi moćni evolucionni algoritam kolonijom mrava je prikazan u članku [47]. Iz primera 1 vidi se da se algoritmom kolonije mrava postiže smanjenje gubitaka od 8,06%, metodom simuliranog kaljenja od 5,69% i genetskim algoritmom od 7,16%. U primeru 2 su ove cifre 11,39% metoda kolonije mrava, 7,93% simulirano kaljenje i 9,82% genetski algoritam. Predložena metoda se pokazala za najbolju u pogledu srednjeg rešenja kao i u pogledu srednjeg računarskog vremena.

Algoritam predložen u [52] polazi od tekuće konfiguracije i varira konfiguracije u skladu sa lokalnim i globalnim heurističnim pravilima u okviru optimizacije „*hyper-cube*“ mravljim algoritmom. Metoda pokazuje prednosti u odnosu na simulirano kaljenje jer iznalazi efikasna rešenja uz znatno kraće vreme proračuna.

Autori u [55] koriste optimizaciju rojem čestica i porede sledeće slučajeve u cilju smanjenja gubitaka snage: samo rekonfiguraciju, samo kompenzaciju, prvo kompenzaciju pa rekonfiguraciju i na kraju njihovu istovremenu primenu pomoću algoritma roja čestica. Koriste se dve funkcije cilja, jedna za minimizaciju gubitaka snage i druga za minimizaciju troška. Analiza osetljivosti je urađena korišćenjem Jakobijan matrice da bi se odredila lokacija kondenzatorskih baterija. Posmatraju se tri diskretna nivoa opterećenja. Minimizacija je urađena za period od 5 i 10 godina uzimanjem u obzir

i porast potrošnje. Primer mreže je sa 3 napojna voda i sa 69 čvorova. Dobijena je ista konfiguracija i iste lokacije i veličine baterija za sve nivoe potrošnje.

Simulirano kaljenje je meta-heuristička alatka čijom primenom se problem rekonfiguracije može definisati kao optimizacioni problem sa višestrukom funkcijom cilja. Ova metoda je vrlo fleksibilna s obzirom na procenu svake kandidat konfiguracije dozvoljavajući uključenje različitih kriterijuma, operacionih i električnih ograničenja. Simulirano kaljenje je zasnovano na posebno modelovanoj verovatnoći približavanja globalnom minimumu funkcije cilja, izbegavanjem okončanja algoritma u nekom od lokalnih minimuma. Na početku algoritma dozvoljena su praktično sva rešenja dok se postepenim hlađenjem, tokom izvršenja algoritma, prihvataju samo ona najbolja. U ovoj disertaciji obrađen je hibridni algoritam simuliranog kaljenja sa direktnim, grubim pretraživanjem (eng. *greedy search*). Biće izneti homogeni (opisan sekvencom homogenih Markov-ljevih lanaca kod kojih je temperatura kao kontrolni parametar konstantna) i nehomogeni (opisan jednim nehomogenim Markov-ljevim lancem kod koga se temperatura sukcesivno menja) algoritmi. Markov-ljev lanac je niz pokušaja kada je ishod svakog pokušaja zavistan isključivo od ishoda prethodnog. Pod pokušajima podrazumevaju se generisana rešenja.

U [40, 41] razvijena je metoda rešenja simuliranim kaljenjem u dva stepena. Na prvom stepenu nalazi se globalni neinferiorni optimum, a na drugom se primenjuje algoritam epsilon ograničenja koja definiše projektant da bi se odredila prihvatljiva neinferiorna konfiguracija. Razmatra se i dozvoljeni broj komutacija. Test sistem ima 69 čvorova. Zaključeno je da: 1) gubici aktivne snage se mogu znatno smanjiti rekonfiguracijom, 2) naponski profil se takođe poboljšava rekonfiguracijom i 3) za različite nivoe opterećenja različite su i optimalne konfiguracije.

Autori [43] koriste metodu simuliranog kaljenja za optimalnu konfiguraciju, a diskretni optimizacioni algoritam za optimalnu kompenzaciju kondenzatorskim baterijama. Potpuno pretraživanje može da da dobre rezultate, a da vreme računanja nije preveliko za većinu mreža čak i kod kojih postoji jaka povezanost između kompenzacije i rekonfiguracije zato što ono uključuje kontinualnu optimizaciju korišćenih kondenzatorskih baterija pri svakoj iteraciji simulacije kaljenja. Kombinovana rekonfiguracija i kompenzacija dozvoljavaju tesnu kontrolu napona mreže tako da nisu potrebni naponski regulatori. Smanjenje gubitaka i suženje naponskih garnica će postati sve atraktivnije kako se distributivne mreže opterećuju bliže svom tehničkom maksimumu.

U [45] je predložen poboljšani algoritam simuliranog kaljenja za rešavanje problema rekonfiguracije u velikim distributivnim sistemima. Poboljšanje algoritma je postignuto polinomski ograničenim mehanizmom hlađenja koji je zasnovan na proračunu statistike tokom pretraživanja. Predloženi mehanizam poremećaja zasnovan na topologiji mreže omogućava da se prostor rešenja koncentriše na optimalna rešenja na nižim temperaturama. Korišćena je strategija poravnanja da bi se izbegli lokalni minimumi i brže dostigla bliskost optimumu. Prikazana metoda ima mogućnost pretraživanja koja postaje značajnija sa porastom veličine mreže. Dvostruko uvezana struktura liste podataka koja je nedovoljno objašnjena se koristi za predstavu baze podataka distributivnog sistema.

U većini navedenih radova rekonfiguracija distributivne mreže predstavljena je kao metoda sa jednostrukom funkcijom cilja, najčešće je to smanjenje gubitaka aktivne snage. Svi ciljevi rekonfiguracije distributivne mreže navedeni u Poglavlju 1.1. mogu biti predmet jednokriterijumske ili kada se posmatraju zajedno predmet višekriterijumske optimizacije [2, 44, 60, 68, 70-74].

Autori [70] razmatraju višestruku funkciju cilja uzimajući u obzir minimizaciju gubitaka, simetrisanje opterećenja između trafo stanica, minimizaciju najvećeg pada napona, minimizaciju prekida napajanja i simetričan rad značajnih potrošača radi pojačane pouzdanosti sistema. Funkcija cilja od pet elemenata se optimizira a ograničenja su vezana za kapacitet i koordinaciju zaštite. Rešenje je u dva nivoa. Na prvom nivou nalazi se podoptimalno rešenje analizom upetljane mreže u kojoj su svi spojni prekidači zatvoreni. Primenom posebnog algoritma tokova snaga generiše se radijalna konfiguracija kao međurešenje. U drugoj fazi ovo rešenje se kontinualno poboljšava metodom zamene grana. Pojedini elementi funkcije cilja su suštinski različiti i pridruženi su im težinski koeficijenti da bi se njihovi uticaji pravilno izvagali.

Heuristični fazi algoritam sa višestrukom funkcijom cilja je predložen u [74] kao rešenje problema rekonfiguracije distributivnih mreža. U obzir se uzima minimizacija gubitaka aktivne snage, odstupanje napona čvorova, strujna ograničenja kao i simetrisiranje opterećenja. U ovakvom okruženju očuvana je radikalnost i konektivnost mreže. Predloženi algoritam minimizira broj komutacija tako da je prostor pretraživanja smanjen kao i vreme proračuna. Simulacija je izvršena na distributivnoj mreži srednjih razmera.

Višekriterijumski ciljevi obrađeni u ovoj doktorskoj disertaciji, metodom simuliranog kaljenja, su smanjenje gubitaka aktivne snage, popravka naponskog profila i minimalna cena izvršenih komutacija bez ograničenja maksimalnog broja komutacija jer se smatra da se odgovarajuća komutaciona oprema uključi ili isključi samo jednom tokom navedenog perioda, rezultujući u optimalnoj konfiguraciji (Poglavlje 8.5.). Pareto višekriterijumska optimizacija (eng. *Pareto front*) sa normalizovanom funkcijom cilja analizirana je u Poglavlju 8.6., kod koje je uzeta u obzir minimizacija gubitaka aktivne snage, maksimalnog pada napona i simetrisiranje opterećenja. *Pareto front* predstavlja skup globalnih optimuma.

Najnoviji, sve prisutniji vid višekriterijumske optimizacije je minimizacija gubitaka na isporučenu električnu energiju (koliko god da ima nivoa potrošnje), maksimalnu snagu (za vršni nivo opterećenja), cenu ugrađenih kondenzatorskih baterija (koje su uvek dobro došle kod slabo kompenzovanih mreža) i sve češće prisutnost distribuiranih generatora (eng. *distributed generation*) [61-63, 66, 73, 75-77], kakva god da je njihova ekonomska pozadina ugradnje.

Analize u vezi poslednjeg komentara vezanog za distribuirane generatore prevazilaze obim ove disertacije. U njenom posebnom poglavlju analiziran je ekonomski efekat rekonfiguracije i otočne kompenzacije za jedan nivo potrošnje [43, 53, 64, 78- 82,] i za dugoročnu godišnju potrošnju sa tri nivoa opterećenja (maksimalni-zima, nominalni-proleće, jesen i minimalni-leto) [55, 56, 83, 84], kako sa fiksnim tako i sa regulacionim kondenzatorskim baterijama primenom metode simuliranog kaljenja.

Gore rečeno znači da su se distributivni inženjeri, u najnovijim istraživanjima, umesto jednostrukoj optimizaciji po gubicima, okrenuli složenijim ekonomskim i praktičnim problemima rada distributivnih mreža.

Metoda simuliranog kaljenja primenjena na rekonfiguraciju nije nova metoda. Za njenu primenu neophodan je fleksibilni algoritam tokova snaga jer se njome generiše veliki broj konfiguracija. Nesledljivost i neponovljivost radova autora u ovoj oblasti [40-46] dovela je do toga da je novi pristup ovom problemu postao važan. Mada su u doktorskoj disertaciji korišćeni već razvijeni pristupi efikasnom algoritmu tokova snaga i problemu konektivnosti mreže, novorazvijeni mehanizam poremećaja je mnogo prostiji od dosad razvijениh i potrebno je da se primenjuje u velikom broju iteracija koji raste sa dimenzijom problema, što čini da je implementacija razvijenog algoritma vrlo atraktivna ali u slučaju realnih mreža ograničena na njihovo planiranje.

1.3. Konceptija doktorske disertacije i njen doprinos

Kao osnova za pisanje ovog rada poslužila je referenca [85]. Kriterijum za proveru konektivnosti mreže je doraden a efikasni algoritam tokova snaga je modifikovan u poređenju sa izloženim u referenci [85]. Na početku istraživanja primenjeni algoritam za proveru konektivnosti [85, 86] se pokazao nedovoljno brzim pa je zamenjen algoritmom iz reference [87] koji je upotrebljen na svim test primerima. Kao osnova za isprogramiranu metodu simuliranog kaljenja poslužila je referenca [88].

U Poglavlju 2. problem rekonfiguracije distributivne mreže je definisan kao problem sa jednostrukom funkcijom cilja i ograničenjima tipa jednakosti i nejednakosti.

U Poglavlju 3. obrađena je problematika konektivnosti energetske mreže.

Novi trofazni efikasni algoritam tokova snaga koji je najvažniji element u svim problemima rekonfiguracije je generalno predstavljen u Poglavlju 4. Nazvan je modifikovanim algoritmom tokova snaga koji su upotrebili autori reference [85]. Zbog njegove nedovoljne tačnosti zamenjen je tačnim algoritmom u MATPOWER okruženju [90]. Korišćeni programi analiziraju simetrične

radijalne distributivne mreže u kojima se razmatra deo mreže sa jednim naponskim nivoom i sa samo jednim napojnim čvorom. Mada je rekonfiguraciju moguće vršiti i za mreže sa među-transformatorima, kod ovakvih mreža problem se mnogo usložnjava, pa se u ovom radu kao i u primerima iz literature pominju isključivo mreže bez među-transformatora [6, 7, 40, 41]. Takođe su zanemarene i dozemne admitanse čvorova mreže, matrica admitansi nezavisnih čvorova mreže je singularna [86], što je i najčešći slučaj u literaturi. Prikaz drugih algoritama tokova snaga primenjenih pri rešavanju problema rekonfiguracije dat je u nastavku Poglavlja 4.

U Poglavlju 5. je opisano simulirano kaljenje kao algoritam kombinatorijske optimizacije, njegova analogija sa fizičkim kaljenjem, Markov-ljevi lanci kojima se postiže asimptotska konvergencija i dat je šematski prikaz algoritma.

U Poglavlju 6. su objašnjeni mehanizam poremećaja i mehanizam hlađenja kao delovi algoritma rešenja uz navođenje potrebnih ograničenja koja važe kod radijalnih distributivnih mreža.

U Poglavlju 7. prikazan je razvoj mehanizma poremećaja i mehanizma hlađenja tj. algoritma simuliranog kaljenja kod problema rekonfiguracije mreže.

Veći broj radova pa i ova disertacija analizira simetrične trofazne distributivne mreže. Samo dva rada iz spiska referenci [21, 89] analiziraju i nesimetrične mreže. Autori [21] uzimaju za primer nesimetričnu skopsku mrežu i pribegavaju heurističnoj metodi, a u [89] se analizira nesimetrična mreža sa 144-ri deonice, 9 sekcionih zatvorenih prekidača i 3 spojna prekidača, metodom simuliranog kaljenja.

Osnovna analizirana mreža u radu, je mreža Baran-a i Wu-a, od 33 čvora (sa nultim, referentnim), čiji su podaci preuzeti iz [6], sa 37 grana od kojih 32 ulaze u stablo grafa, a ostalih 5 grana predstavljaju povezne grane pomoću kojih je moguće vršiti rekonfiguraciju distributivne mreže. Pretpostavljeno je da se na svakoj grani nalaze rasklopni elementi, tako da je svaku granu moguće uključiti ili isključiti po potrebi.

Dobijeni rezultati rekonfiguracije za mreže primere i višekriterijumska optimizacija, kako je koncipirana u ovom radu (kriterijumi minimalnog gubitka aktivne snage, popravke naponskog profila kao i cene izvršenih komutacija), kao i Pareto višekriterijumska optimizacija sa normalizovanom funkcijom cilja kod koje je uzeta u obzir minimizacija gubitaka, maksimalnog pada napona i simetriranje opterećenja, predstavljeni su i analizirani u Poglavlju 8.

Poglavlje 9. analizira simultanu rekonfiguraciju i kompenzaciju koje su primenjene na test mrežu od 33 čvorova uz zanemarenje i uvažavanje gubitaka na isporučenu električnu energiju za tri godišnja perioda, kao poseban slučaj višekriterijumske optimizacije.

Zaključak, sugestije za nastavak istraživanja i doprinos disertacije, dati su u Poglavlju 10.

Na kraju disertacije data su tri priloga:

Prilog 1 – Rešavanje efikasnog algoritma analize tokova snaga u MATPOWER okruženju kod programa rekonfiguracije i očne kompenzacije,

Prilog 2 – Osnovni program za rekonfiguraciju distributivne mreže u svrhu smanjenja gubitaka aktivne snage (nehomogeni algoritam) i

Prilog 3 - Osnovni potprogram za rekonfiguraciju distributivne mreže u svrhu smanjenja gubitaka aktivne snage.

Glavni doprinos ovog rada je novi pristup problemu rekonfiguracije simetričnih radijalnih distributivnih mreža koji maksimalno koristi sledeće mehanizme:

1. algoritam za ispitivanje konektivnosti energetske mreže,
2. kriterijum Lavorato et al. [91] za radijalnost distributivne mreže,
3. homogeni algoritam simuliranog kaljenja sa kriterijumom ostvarenja stacionarne distribucije homogenog lanca (eng. *epoch*) i nehomogeni, pojačan stopom prihvatanja i maksimalnom dužinom lanca,
4. integrisani novi (približni) i tačni (MATPOWER) efikasni algoritam tokova snaga i
5. konceptijski jednostavan mehanizam poremećaja (generisanja tekuće konfiguracije).

U odnosu na početak istraživanja u ovoj oblasti [92] postignuta su neuporedivo kraća vremena proračuna mreže [6]. Na početku istraživanja globalni optimum je dostignut nakon programiranja koje je trajalo nekoliko meseci da bi sa poslednjim razvijenim programom u

MATLAB-u i sa MATPOWER okruženjem i kriterijumom konektivnosti mreže iz [87], program na serverskom računaru (Pentium IV PC; Intel core i7-4770, 3,4 GHz; 32 GB RAM) terminirao za 3 min takođe iznalazeći globalni optimum.

1.4. Ciljevi istraživanja

U izradi ove disertacije postavljeni su sledeći ciljevi:

1. Prikazati razvoj/izbor i proveru algoritama za proračune tokova snaga u obimu koliko je potrebno za razumevanje suštine rada (Poglavlje 4.4).
2. Prikazati razvoj/izbor i analizu algoritama za proveru konfiguracije mreže u obimu koliko je potrebno za razumevanje suštine rada (Uvod).
3. Prikazati razvoj odnosno modifikaciju optimizacionog algoritma simuliranog kaljenja kojim se omogućava njegova primena u rešavanju optimizacionog problema konfiguracije mreže (Poglavlje7.).
4. U postavci problema obuhvatiti druge ciljne funkcije (pored smanjenja gubitaka) relevantne za rad savremenih distributivnih sistema u sklopu koncepta inteligentnih mreža (Poglavlje 8.5. i 8.6.).
5. Potvrditi dobijene rezultate poređenjem sa rezultatima drugih u literaturi razmatranih metoda za rekonfiguraciju distributivnih mreža (na identičnim test primerima, Poglavlje 8.).

2. FORMULACIJA PROBLEMA

U današnje vreme postaje sve važnije da distribucije što efikasnije zadovolje potrebe svojih potrošača. To znači da im je jedan od ciljeva pronalaženje radnog režima u kome će se uz najmanji mogući trošak isporučivati električna energija i zadovoljavati zahtevi potrošača. Značaj istraživanja vezan je za činjenicu da smanjenje gubitaka aktivne snage ima velike finansijske posledice jer je procenjeno da se od ukupne proizvodnje električne energije, ne računajući njeno ilegalno preuzimanje, od 5% do 13% troši na gubitke u distributivnoj mreži. U ovom poglavlju formulisan je problem rekonfiguracije odgovarajuće distributivne mreže u svrhu smanjenja gubitaka aktivne snage.

Neka u označava tekuću konfiguraciju razgranate trofazne simetrične radijalne distributivne mreže čiji je radni režim označen sa x . Neka $f(x,u)$ bude funkcija cene (takođe poznata i kao funkcija cilja) koja daje relativnu meru troška rada sistema u konfiguraciji u u radnom režimu x . Da bi se konfiguracija u prihvatila kao validno rešenje problema ona mora da zadovolji odgovarajuća topološka ograničenja. Postojeće stanje x mora da zadovolji Kirchoff-ove zakone kroz odgovarajuća električna ograničenja kao i operaciona ograničenja sistema u smislu da nisu prekoračena fizička ograničenja za svaku komponentu sistema. Takođe, potrebno je da u potpunosti bude ispunjen zahtev u pogledu snage koju primaju potrošači, a da naponi čvorova mreže ostanu unutar dozvoljenih granica. Potrebe potrošača koje treba zadovoljiti se nazivaju ograničenja potrošnje. Cilj je pronaći konfiguraciju mreže u koja minimizira $f(x,u)$, uz poštovanje svih gore pomenutih ograničenja.

Ovaj problem se može izraziti u generalnoj formi kao jednostruka funkcija cilja sa ograničenjima tipa jednakosti i nejednakosti

$$\begin{aligned} & \text{minimizirati } f(x,u) \\ & u \in S \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} & F(x,u) = 0 \\ \text{tako da je:} & \\ & G(x,u) \leq 0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

gde je S skup svih mogućih konfiguracija mreže, a F i G su nelinearne funkcije upotrebljene za izražavanje pomenutih ograničenja. Svako rešenje u koje zadovoljava ograničenja jednačine (2.2) predstavlja podobnu konfiguraciju.

2.1. Prostor pretraživanja

Prostor pretraživanja kod ovog problema je skup svih mogućih konfiguracija mreže. Kada se odredi generalna dispozicija mreže (raspored sabirnica, vodova i transformatora), specifična topologija je određena statusom svake pojedine komutacione opreme (prekidač, rastavljač, rastavljač snage, itd.) u sistemu. Normalno otvorena komutaciona oprema predstavlja spojne rasklopne uređaje a normalno zatvorena sekcione rasklopne uređaje. Specifiranjem statusa otvorno/zatvoreno svakog pojedinačnog rasklopnog uređaja definisana je topologija mreže. Ako je ukupan broj spojnih i sekcionihi elemenata u sistemu n_s , tekuća konfiguracija se može predstaviti kao vektor stanja $u = [u_1, u_2, \dots, u_{n_s}]^T$ pojedinačnih komutacionih elemenata $u_i \in \{0,1\}$, $1 \leq i \leq n_s$, gde $u_i = 1$ označava da je komutacioni element i zatvoren, $u_i = 0$ da je on otvoren. Neka se prostor pretraživanja, prostor svih mogućih konfiguracija u , označi sa $S = \{0,1\}^{n_s}$.

2.2. Prostor stanja (prostor konfiguracija, populacija)

U cilju proračuna funkcije cilja i provere ograničenja potrebno je imati podatke o veličinama napona i njihovim faznim stavovima kod svake sabirnice. Ove informacije uključene su u promenljivoj stanja x . Neka $|V_i| = [|V_i^a|, |V_i^b|, |V_i^c|]^T$ i $\theta_i = [\theta_i^a, \theta_i^b, \theta_i^c]^T$ označavaju respektivno

module i fazne stavove napona faza a , b i c kod sabirnice i . Pretpostavićemo da razmatramo trofaznu simetričnu distributivnu mrežu, zato su moduli fazora napona u sve tri faze isti, za posmatranu sabirnicu, a fazni stavovi napona faza pomerni za 120 električnih stepeni. Takođe posmatra se tačkasto opterećenje, potrošači se konektuju na mrežu preko odgovarajućih sabirnica koje su povezane vodovima. Čvor 1 predstavlja napojni čvor u kome postoji napojna trafo stanica krutog napona (eng. *slack node*) čiji je napon poznat i fiksiran po modulu, a faznog stava 0, a sabirnice 2, 3, ..., n su potrošačke sabirnice, pa se promenljiva stanja može označiti kao $[\theta_2, \dots, \theta_n, |V_2|, \dots, |V_n|]^T$, a prostor stanja je dimenzije 2^{n-1} .

2.3. Funkcija cene (funkcija cilja)

Funkcija cene ili funkcija cilja (f) koja se pridružuje svakoj konfiguraciji iz prostora stanja (promenljivoj stanja) realni je broj koji daje relativnu vrednost cene dotične konfiguracije. Ona predstavlja kriterijum za utvrđivanje da li je konfiguracija u bolja od bilo koje druge konfiguracije. Ako, na primer, postoji podobna konfiguracija u^* koja pripada prostoru stanja i predstavlja radno stanje x^* takvo da je $f(x^*, u^*) \leq f(x, u)$ za sve podobne konfiguracije u iz prostora stanja i njima odgovarajuće x , tada je rešenje u^* globalni optimum. Postoji niz faktora koji se mogu razmatrati u proceni relativnog kvaliteta jedne konfiguracije mreže nad drugom. U ovoj disertaciji cilj koji se postavlja jeste smanjiti gubitke aktivne snage u sistemu, i na taj način smanjiti troškove isporuke potrebne električne snage unapred poznatom potrošačkom konzumu. Višekriterijumska optimizacija analizirana je u Poglavlju 8.

Neka $f(x, u)$ bude suma gubitaka aktivne snage u svakom vodu (primeri i mreže koje su analizirane su mreže sa jednim napojnim čvorom i bez transformatora):

$$f(x, u) = \sum_{i=1}^{n_i} P_i^{vod} \quad (2.3.1)$$

gde P_i^{vod} predstavlja gubitke aktivne snage u vodu rednog broja i kojih u radikalnoj mreži ima n_i . Veliko je pitanje da li se računarski može sprovesti rekonfiguracija u mreži sa transformatorima. Problem predstavljaju renumeracija čvorova i strujna i naponska ograničenja novogenerisane konfiguracije pri promeni mesta transformatora u distributivnoj mreži.

Na drugi način moguće je ukupne gubitke aktivne snage izraziti i kao razliku ukupne aktivne snage injektirane u sistem umanjenu za aktivnu snagu koja se isporučuje potrošačima (konzumu) što je i primenjeno u ovoj disertaciji.

$$f(x, u) = P_{injektirano} - P_{potrošnje} \quad (2.3.2)$$

Ako se zna cena gubitaka, funkcija cilja bi predstavljala trošak na gubitke aktivne snage u mreži. Ako bi se znao i trošak manipulacije komutacionom opremom funkcija cilja bi se mogla uvećati za trošak manipulacije (rastavljačima i prekidačima) kojom se od postojeće konfiguracije generiše konfiguracija u . Dosta detaljna analiza procene isplativosti rekonfiguracije sa aspekta ovako definisane funkcije cilja data je u članku [22] gde je pokazano da česta rekonfiguracije nekad i nije finansijski isplativa.

2.4. Ograničenja

Nisu sve konfiguracije iz skupa konfiguracija (prostora konfiguracija, populacije) podobne. Tako na primer ako je otvorena sva komutaciona oprema i kada su naponi na svim sabirnicama nula, gubici aktivne snage bi bili nula ali u ovom slučaju nijednom potrošaču ne bi bila isporučivana električna energija. Iz ovoga razloga potrebno je tačno definisati koje konfiguracije su izvodljive a koje nisu. Ovo je uključeno u sledeća četiri ograničenja:

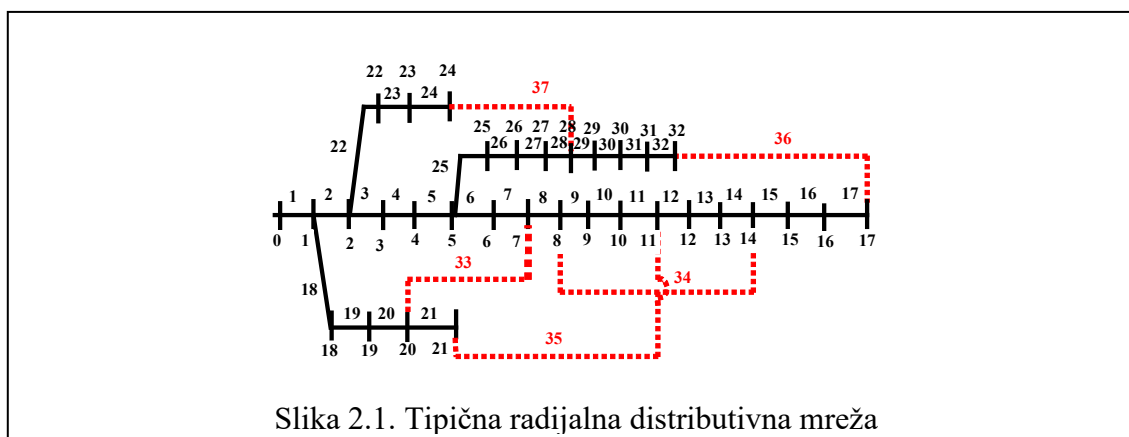
1. topološka ograničenja
2. električna ograničenja

3. radna ograničenja i
4. ograničenja potrošnje.

Ova ograničenja moguće je izraziti kao ograničenja tipa jednakosti i nejednakosti kao što je predstavljeno jednakošću (2.2).

2.4.1. Topološka ograničenja

Topologija ili dispozicija sistema je ograničena na radijalnu što je tipično za distributivne mreže. Ovo znači da postojanje petlji nije dozvoljeno u mreži. Konfiguracija mreže je ograničena i u smislu da svaka potrošačka sabirnica mora biti povezana sa najmanje jednom putanjom za napojnu trafo stanicu. Ova dva zahteva definišu topološku strukturu distributivne mreže kao strukturu razgranatog stabla. Na Slici 2.1. prikazana je tipična podobna konfiguracija radijalne distributivne mreže koja se satoji od glavnog napojnog voda i tri bočne grane (Baran i Wu-ova mreža [6]).



2.4.2. Električna ograničenja

Kako se radi o električnim mrežama svaka konfiguracija mreže mora da zadovolji prvi i drugi Kirchoff-ov zakon. S obzirom da distributivni sistem može biti vrlo velik, da uključuje hiljade sabirnica, formulacija ovih zakona za konkretnu mrežu može biti vrlo težak zadatak. Nešto više o ovome izloženo je u Poglavlju 4. u kome je prikazan konkretni efikasni algoritam tokova snaga primenjivan u ovom radu. Na osnovu onog što je izneto u Poglavlju 4. može se zaključiti da je ova ograničenja moguće izraziti kao ograničenje tipa jednakosti $F(x,u) = 0$ predstavljeno jednačinom (2.2).

2.4.3. Radna ograničenja

Moguće je da konfiguracija za koju su gubici aktivne snage minimalni ima pojedine delove koji bi trebalo da rade van svog fizičkog domena. Ovo se nikako ne sme dozvoliti. Svaka komponenta distributivnog sistema ima odgovarajuća termička ograničenja kojima je ograničena maksimalna struja koja protiče kroz tu komponentu. U principu, ova fizička ograničenja vode računa o tome da se ne prekorače struje komponenti, zadovolje tokovi snaga kao i da naponi sistema ostanu unutar dozvoljenih granica. Ova radna ograničenja se mogu predstaviti nejednakošću $G(x,u) \leq 0$ jednačine (2.2).

Treba napomenuti da su u ovom radu sve generisane konfiguracije radijalne a da ostala ograničenja tipa nejednakosti kao što su prekoračenja graničnih dozvoljenih struja vodova jesu retka u kvalitetnim radijalnim konfiguracijama. Zato se ovaj tip ograničenja proverava tek na kraju procesa optimizacije i konfiguracija odbacuje ako ne zadovoljava ova ograničenja [93].

2.4.4. Ograničenja potrošnje

Potrošači električne energije zahtevaju isporuku električne energije koja ispunjava određene zahteve. Na primer, potrebno je obezbediti električno napajanje od približno 220 V, učestanosti 50 Hz na zidnoj priključnici. Distribucija mora da obezbedi odgovarajući naponski nivo svake sabirnice u sistemu isporučujući potrebnu električnu energiju potrošačima. Ovo ograničenje tipa nejednakosti koje zahteva da napon svake faze p svake sabirnice i bude unutar odgovarajućeg opsega

$$|V_i^p|_{min} \leq |V_i^p| \leq |V_i^p|_{max} \quad (2.4.4.1)$$

se takodje može iskazati kao ograničenje tipa nejednakosti $G(x,u) \leq 0$.

Rezultati pokazuju da je najniži napon krajnje konfiguracije veći od najnižeg napona na početku rekonfiguracije tako da ako naponska ograničenja nisu bila narušena na početku rekonfiguracije neće biti narušena ni pošto se ona izvrši [92] čime je potvrđena dokazana pretpostavka autora reference [30] da rekonfiguracija mreže u svrhu smanjenja gubitaka implicitno popravlja naponsku sliku.

3. PROVERA POVEZANOSTI ENERGETSKOG SISTEMA

Topologija distributivnog sistema se može predstaviti grafom koji ima m grana i n čvorova (sabirnica). Može se tvrditi da je topologija distributivne mreže radijalna ako zadovoljava sledeća dva uslova, kriterijum Lavorato et al. [86, 91, 93]:

- 1) konfiguracija mora da poseduje $n-1$ granu;
- 2) konfiguracija mora biti povezana.

Rešenje problema rekonfiguracije i ekspanzionog planiranja je prihvatljivo ako zadovoljava tehničke uslove i održava konektivnost mreže. Kako mreža kod procesa minimizacije menja konfiguraciju, generalne metode za efikasni algoritam tokova snaga i povezanost treba da su primenjene na sve programski izgenerisane konfiguracije. Ako rekonfigurisana mreža ostavlja neke grane nepovezanim ili formira petlje kao što je slučaj kod većine poznatih algoritama dobiće se nepodobna konfiguracija koja se mora odbaciti [91]. Iz tog razloga, razvijeni su programi kojima se na jednostavan i brz način može proveriti da li je mreža radijalna i povezana. Ovo je pre svega korisno jer distributivne mreže predstavljaju veliku i razgranatu strukturu.

Energetski sistem je povezan ako postoji putanja između bilo koje njegove dve sabirnice. Kod distributivne mreže posmatrane kao energetski sistem to znači da su sve sabirnice opterećenja povezane sa izvornom sabirnicom i da se mogu napajati iz te sabirnice. Konektivnost energetskog sistema se može prosto proveriti uz pomoć matrice $[NC]$ definisane kao [86]:

$$[NC] = [B]^{n-1}, \quad (3.1)$$

gde je n broj sabirnica energetskog sistema a $[B]$ je $n \times n$ matrica interkonekcije sistema sa elementima $B(i, j)$ koji su jednaki jedinici ako postoji vod između sabirnica i i j i jednakim nuli u protivnom. Kada je $i = j$, po konvenciji iz [86], $B(i, j)$ je jednako jedinici. Sistem je povezan ako su svi elementi matrice $[NC]$ jednaki jedinici. Aritmetičke operacije u (3.1) su Bool-ove, što znači:

$$0+0=0;$$

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

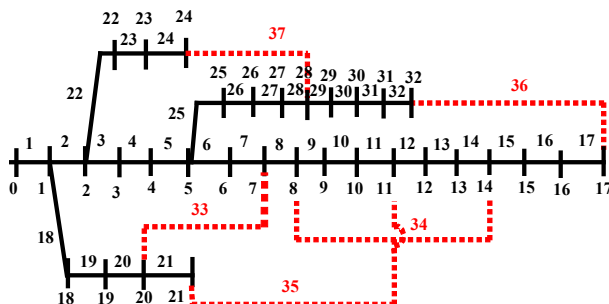
$$0*0=0;$$

$$0*1=1*0 \text{ i}$$

$$1*1=1.$$

Ukoliko B^{n-1} sadrži i jednu nulu sistem nije povezan.

U razvijenom programu slede naredbe kojim se generiše onoliko različitih slučajnih brojeva koliko ima spojnih grana (fundamentalnih petlji). Ako je izlaz iz programa nekonektovana mreža logička petlja treba da se vraća na generator slučajnih brojeva, sve dok se na izlazu ne dobije konektovana mreža. Izlaz iz petlje mora biti konektovana mreža (ona je i radijalna jer ispunjava uslov 1)).



Slika 3.1. Distributivna mreža

Mreža od interesa je mreža sa Slike 3.1. [6], ona ima 33 čvora (označeni sa 0, 1-32) i 37 grana (označene sa 1-32, sa običnim prekidačima i crvene grane označene sa 33-37 sa spojnim prekidačima), pri rekonfiguraciji može se otvoriti bilo koja grana.

Generatorom slučajnih brojeva formira se niz od pet brojeva $(37-(33-1)=5)$.

Program kao ulazne podatke prihvata ukupan broj čvorova i ukupan broj grana. Da bi bio zadovoljen prvi uslov radijalnosti mreže, potrebno je da broj uključenih grana bude za jedan manji od broja čvorova. Samim tim se može odmah izračunati koliko grana treba da bude isključeno. U svakoj iteraciji, generatorom slučajnih brojeva formira se niz koji u sebi sadrži onoliko elemenata koliko grana treba da bude isključeno. Elementi niza su zapravo redni brojevi grana za koje se pretpostavlja da su isključene. Algoritam se sastoji u generisanju različitih konfiguracija zadate mreže i proveravanju da li je mreža u tom slučaju povezana i radijalna. Na izlazu iz programa dobija se konfiguracija koja zadovoljava oba uslova za postizanje radijalnosti. Nakon toga moguće je primeniti neku od metoda proračuna tokova snaga u distributivnim mrežama i dobiti informaciju o gubicima u mreži.

Povezanost energetskog sistema je jedna od njegovih bitnih karakteristika. Povezanost je veoma bitna u pogledu rekonfiguracije mreže. Jedna od metoda za utvrđenje povezanosti je i algoritam dubinskog prvog pretraživanja (eng. *depth-first search*) [28]. Njegova primena kod problema rekonfiguracije i ekspanzionog planiranja distributivnih mreža nije dovoljna jer treba zadovoljiti i ograničenje broja grana za ostvarenje radijalne konfiguracije.

Prethodno pomenuti algoritam [86] je spor zbog vremenski zahtevnog Bool-ovog stepenovanja matrice B na stepen jednak broju čvorova umanjenom za 1 (što je naročito izraženo kod mreža sa velikim brojem čvorova, npr. mreže sa 118 čvorova koja je poslednja analizirana) pa je zbog toga primenjen, za sve proračune, algoritam koji koristi determinantu matrice povezanosti čiji opis sledi.

Programom se formira matrica incidencije za mrežu čije su sve grane zatvorene (upetljana mreža). Broj vrsta odgovara broju čvorova (sa balansnim) a broj kolona broju grana (ukupan broj grana, sve zatvorene). Onda se briše prva vrsta (odgovara balansnom čvoru) i onoliko kolona koliko ima otvorenih grana (generisane generatorom slučajnih brojeva, stalno isti broj od kojih su svi različiti). Dobijena matrica je kvadratna i može joj se sračunati determinanta koja u slučaju povezane mreže (koja je i radijalna sobzirom na broj uključenih grana) mora biti 1 ili -1 (različita od 0). Vrednosti 1 ili -1 se dobijaju u zavisnosti od konvencije definisanja matrice incidencije (grana incidentna čvoru i orjentisana od njega sa elementom 1 i grana incidentna čvoru i orjentisana ka njemu -1 ili obrnuto) [87]. U nastavku izlaganja navedena je bez dokaza teorema iz reference [87] čime je ova tvrdnja potvrđena.

Kirchoff-ova teorema: Razgranata stabla konektovanog grafa mreže su nesingularne submatrice dimenzije $(\text{broj čvorova}-1) \times (\text{broj čvorova}-1)$ redukovane incidentne matrice mreže i sve determinante ovih submatrica imaju vrednost ± 1 .

Poseban doprinos iznetih programa jeste što se relativno brzo generiše veliki broj različitih konfiguracija mreže. Uz dodatak proračuna tokova snaga, predstavljeni programi mogu biti od velike pomoći distributivnim inženjerima pri analizi rekonfiguracije mreže.

4. EFIKASNI ALGORITAM TOKOVA SNAGA ZA SIMETRIČNE RADIJALNE DISTRIBUTIVNE MREŽE BEZ TRANSFORMATORA

Mnogi problemi vezani za primenu u realnom vremenu iz oblasti distributivnih sistema kao što su njihova optimizacija, kompenzacija, regulacija napona, planiranje, restauracija, procena stanja itd. zahtevaju posedovanje efikasnog algoritma tokova snaga kojim se proračunavaju naponi mreže, (struje grana) i gubici [94, 95]. Dobro poznate karakteristike električnih distributivnih mreža su:

- radijalna ili slabo upetljena konfiguracija;
- postojanje 3 faze koje mogu biti nesimetrično opterećene;
- opterećenje raspoređeno u čvorovima mreže;
- veliki broj grana i čvorova i
- širok opseg u kome se mogu kretati vrednosti rezistansi i reaktansi [94].

Ove karakteristike čine da je tradicionalna metoda tokova snaga (Gauss-Seidel) koja se koristi za prenosne mreže nedovoljno pouzdana da bi odgovorila na zahteve koji se postavljaju kod distributivnih sistema [94]. Kod, u ovoj disertaciji, primenjene Newton-ove metode potrebno je 5 iteracija do konvergencije i svaka od njih je ekvivalentna broju od 7 iteracija kod široko primenjivane Gauss-Seidel-ove metode [96]. Nekoliko algoritama tokova snaga posebno dizajniranih za distributivne sisteme nalaze se u literaturi [94]. Neke od ovih metoda su razvijene na principu topologije sa petljama kao što su prenosni sistemi. Kod ovih metoda Gauss implicitna Z-matrična metoda je najčešće primenjena ali ona ne koristi osobinu da su distributivne mreže radijalne ili slabo upetljane i zato zahteva rešavanje skupa jednačina čiji je broj proporcionalan broju čvorova [94]. Skorašnja istraživanja predlažu neke nove ideje kako da se uvaži specifičnost topologije distributivnih sistema, ali ove ideje zahtevaju novi format ulaznih podataka ili zamornu manipulaciju ulaznim podacima [94]. S obzirom da je često usvojena tehnika zamene unapred/unazad, šema rešenja zahteva zametno unošenje ulaznih podataka za mrežu šemiranu po nivoima [9, 97]. Glavni nedostatak ovih metoda [9, 97] jeste da se ulazne datoteke sa podacima o mreži moraju stalno generisati i učitavati što čini da su ove metode praktično neprimenjive kod dinamičnih problema kao što je rekonfiguracija distributivnih mreža ili njihovo ekstenzivno planiranje.

Algoritmi predloženi u ovoj disertaciji su novi ali i klasični. Prvi koristi generisanje matrice admitansi nezavisnih čvorova koja je jedini ulazni podatak koji se menja sa rekonfiguracijom dok svi ostali ulazni podaci ostaju isti i nikakva renumeracija čvorova koja je izneta u referenci [97] nije potrebna. Ovaj algoritam je nedovoljno tačan ali upotrebljiv jer je za rekonfiguraciju mreže važna relativna a ne apsolutna tačnost. Za proračune iznete u Poglavljima 8. i 9. koristi se Newton-ov algoritam tokova snaga u MATPOWER okruženju koji prevazilazi ovaj nedostatak jer je tačan. Problem nepotrebnog renumerisanja čvorova distributivne mreže i njenog šemiranja po nivoima za Shirmohammadi-jev algoritam [9] nije obrađen u literaturi. Kod algoritma tokova snaga u MATPOWER okruženju primenjenog u ovoj disertaciji renumeracija čvorova distributivne mreže nije potrebna i u njoj nije primenjen Shirmohammadi-jev algoritam [9]. Proste iterativne matrične operacije prvog, relativno tačnog algoritma su primenjene da bi se sračunali naponi čvorova i gubici. Mreža može biti (kod oba primenjena algoritma) kako radijalna tako i slabo upetljana slično Z metodi (eng. *Bus-Impedance Network Method*) [98, str. 51-52]. Za razliku od originalnog algoritma autora reference [85] relativno tačan algoritam radi sa fazovima napona čvorova, a ne sa padovima napona u odnosu na referentni čvor.

Glavna svrha primenjenih algoritama je optimizacija u svrhu smanjenja rezistantnih gubitaka rekonfiguracijom i optimizacija pri istovremnoj (simultanoj) kompenzaciji reaktivne snage i rekonfiguraciji a sve u svrhu smanjenja pomenutih rezistantnih gubitaka.

Kod problema rekonfiguracije mreže efikasni algoritmi se koriste radi proračuna ukupnih gubitaka aktivne snage za zadatu konfiguraciju sistema da bi se rangirala u odnosu na ostale konfiguracije. Rezultati efikasnih algoritama takođe se koriste za procenu ograničenja (električna, potrošnje i radna).

Za određene primene nije neophodno uzeti u obzir potencijalnu nesimetriju sistema, tada je dovoljno modelovati sistem kao simetričan trofazni sistem. Kada je ovo slučaj, analiza jedne faze se može iskoristiti da bi se formulisao jednofazni algoritam tokova snaga što je učinjeno i u ovom radu. Analiza rekonfiguracije distributivnih mreža u slučaju nesimetrije sreće se u literaturi ali dosta retko [21, 89]. U skorijim radovima gotovo da se isključivo analiziraju trofazne simetrične radijalne distributivne mreže [85, 91, 93].

4.1. Modeli komponenti

Da bi dobili tačne rezultate efikasnog algoritma tokova snaga potrebna je tačna matematička predstava komponenti distributivne mreže. Detaljni modeli komponenti mogu se naći u [95].

4.2. Efikasni algoritam analize tokova snaga (modifikovani algoritam tokova snaga, relativno tačan algoritam)

Efikasni algoritam analize tokova snaga je sproveden pod pretpostavkom da se struje potrošnje u čvorovima mreže mogu proračunati iz zadatih snaga potrošnje u čvorovima što je najčešći slučaj kod rekonfiguracije mreže. Mreža koja se proračunava je slabo upetljena i matrica admitansi nezavisnih čvorova joj je singularna [86, str.17], tako da se ne može invertovati i direktno upotrebiti za proračun napona čvorova. Umesto ovoga primenjena je prosta formula kojom je invertovanje singularne matrice preskočeno. Napojni čvor mreže (nulti čvor) proglašen je za balansni čvor.

Rekurzivna formula kojom se iterativno proračunavaju naponi nezavisnih čvorova mreže glasi [85]:

$$[U(k+1)] = [Y_{diaginv}] * [J(k)] + ([UN] - [Y_{diaginv}] * [Y]) * [U(k)] \quad (4.2.1)$$

$[U(k+1)]$ - $k+1$ iteracija sračunavanja vektora napona nezavisnih čvorova,

$[Y_{diaginv}]$ - inverzna matrica, dijagonalne matrice čiji su elementi glavna dijagonala matrice $[Y]$, matrice admitansi nezavisnih čvorova,

$[J(k)]$ - k -ta iteracija sračunavanja vektora injektiranih struja nezavisnih čvorova,

$[UN]$ - jedinična matrica dimenzije jednake broju nezavisnih čvorova mreže i

$[Y]$ - matrica admitansi nezavisnih čvorova, kvadratna matrica dimenzije jednake broju nezavisnih čvorova mreže, gore već navedena.

Prva iteracija je onda:

$$[U(1)] = [Y_{diaginv}] * [J_{multo}] + ([UN] - [Y_{diaginv}] * [Y]) * [U_{multo}] \quad (4.2.2)$$

$[J_{multo}]$ - nulta iteracija sračunavanja vektora injektiranih struja nezavisnih čvorova i

$[U_{multo}]$ - nulta iteracija sračunavanja vektora napona nezavisnih čvorova iznosi 12,66 kV, „ravan“ (eng-*flat*) start za analiziranu mrežu, naponi svih nezavisnih čvorova mreže su inicijalizovani na vrednost napona balansnog čvora mreže.

Dimenzije vektora napona nezavisnih čvorova i vektora injektiranih struja nezavisnih čvorova odgovaraju broju nezavisnih čvorova mreže.

Podrazumeva se da su sve veličine u gornjim izrazima kompleksne.

Može se smatrati da je za kriterijum konvergencije uzeta pretpostavka da maksimalna relativna greška odstupanja napona čvorova u poslednje dve iteracije ne bude veća od 0.0001.

Kompleksni gubici mreže sračunavaju se kao razlika između snage injektirane u nulti čvor i ukupne potrošnje mreže (suma svih snaga potrošačkih čvorova).

Sračunati gubici mreže, ovim algoritmom, mogu se koristiti samo indikativno, stvarna snaga gubitaka mora se proračunati pomoću efikasnog algoritma analize tokova snaga [97] jer algoritam greši.

Napravljen je program u MATLAB-u [99], za mrežu sa Slike 4.1., čiji su podaci dati u Tabeli 8.1. [6], a petlje su joj razvezane (admitanse spojnih grana petlji inicijalizovane na nultu vrednost).

Ulazni podaci u program su:

- impedanse grana, potrebne za sračunavanje admitansi grana to jest elemenata matrice $[Y]$, za način definisanja i unošenja elemenata ove matrice pogledati referencu [86] str. 17.
- nulta iteracija sračunavanja vektora napona nezavisnih čvorova iznosi 12,66 kV (eng. *flat start*), za posmatranu mrežu i
- nulta iteracija sračunavanja vektora injektiranih struja nezavisnih čvorova.

$[J(k)]$ – k-ta iteracija sračunavanja vektora injektiranih struja nezavisnih čvorova pa i

$[J_{multo}]$ – nulta iteracija sračunavanja vektora injektiranih struja nezavisnih čvorova sračunava se iz izraza:

$$\frac{j * Q_i - P_i}{V_i^*(k)} \quad (4.2.3)$$

gde je,

Q_i – reaktivna potrošnja čvora i ,

P_i – aktivna potrošnja čvora i i

$V_i^*(k)$ – konjugovani napon čvora i u k-oj iteraciji.

Potrošnja u čvorovima mreže je predstavljena modelom konstantne snage i poznata je na početku proračuna razvijenim algoritmom [6].

Injektirana struja u nulti čvor se ne može izračunati iz gornjeg izraza. Ova struja je jednaka zbiru potrošačkih struja svih ostalih čvorova, dobija se kao negativna suma struja injektiranja u sve potrošačke čvorove, što je implementirano u programu [99].

Sledi opis dokaza konvergencije algoritma.

Gledati obrazac (4.2.1). Pretpostavljeno je da posle dovoljno velikog broja iteracija ($k \rightarrow \infty$), $[U(k+1)] = [U(k)]$.

$$[U(k+1)] = [Y_{diaginv}] * [J(k)] + ([UN] - [Y_{diaginv}] * [Y]) * [U(k)] \quad (4.2.1)$$

Posle dovoljno velikog broja iteracija obrazac (4.2.1) postaje:

$$[U(\infty)] = [Y_{diaginv}] * [J(\infty)] + ([UN] - [Y_{diaginv}] * [Y]) * [U(\infty)]$$

$$[U(\infty)] = [Y_{diaginv}] * [Y] * [U(\infty)] + ([UN] - [Y_{diaginv}] * [Y]) * [U(\infty)]$$

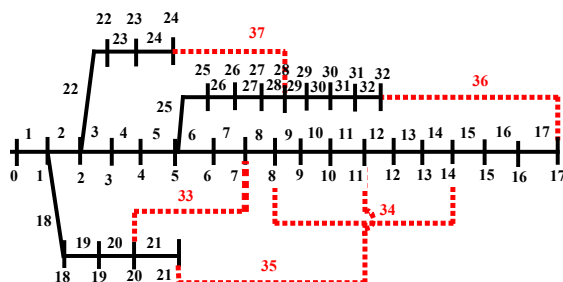
$$[U(\infty)] = [UN] * [U(\infty)]$$

$$[U(\infty)] = [U(\infty)]$$

$$[J(\infty)] = [Y] * [U(\infty)], \text{ referenca [86, str.16].}$$

Iz obrazca (4.2.1) se može naslutiti da je tokom proračuna moguće da napon napojnog čvora ne bude konstantan i bude veći od polazne vrednosti (po modulu). Program u MATLAB-u ga održava na konstantnoj vrednosti tako što ga uvek nakon proračuna jedne iteracije a pre proračuna nove iteracije inicijalizuje na njegovu zadatu vrednost 12,66kV.

Za sračunavanje struje injektirane u nulti čvor koristi se blok naredbi posle for petlje [99]. Naponi nezavisnih čvorova poslednje iteracije kada je postignuta konvergencija su ulazni podaci u izraz (4.2.3) i oni definišu ovu struju na kraju proračuna ali sve preko injektiranih struja potrošačkih čvorova (ona je jednaka negativnoj sumi svih injektiranih struja potrošačkih čvorova, sračunatih u poslednjoj iteraciji).



Slika 4.1. Mreža Baran i Wu

Mreža ima 33 nezavisnih čvorova (0-balansni čvor, 12.66 kV i još 32 čvora), 37 grana (32 grane, crne boje, sa običnim prekidačima-normalno zatvoreni i 5 grana, crvene boje, sa spojnim prekidačima-normalno otvoreni), može komutirati bilo koji prekidač [6]

U Tabeli 8.1. dati su podaci o mreži (aktivna i reaktivna otpornost grana, aktivna i reaktivna potrošnja u čvorovima i napon čvorova u relativnim jedinicama dobijen metodom iz [97, 100]).

4.2.1. Rezultati primene modifikovanog algoritma tokova snaga na mrežu Baran i Wu

Broj iteracije programa [99] kada je postignuta konvergencija je $i = 347$, maksimalan broj iteracija je 1000, što je i indeks for petlje programa, kriterijum konvergencije je da maksimalna relativna vrednost, u odnosu na 12.66 kV, odstupanja modula napona nezavisnih čvorova u poslednje dve iteracije bude manja od 0.0001.

Analizirana je konfiguracija mreže na Slici 4.1. (Sve crne grane zatvorene, sve crvene otvorene, osnovna konfiguracija). U Tabeli 4.2. dati su rezultati proračuna.

Tabela 4.2. ABSUit1 (kV), ARGUit1 (rad) i DVMAX definisani su u nastavku tabele

broj čvora	ABSUit1 (kV)	ARGUit1 (rad)	DVMAX (*0,0001)
nulti čvor	12.6600	0	0
1	12.6290	0.0002	0.0199
2	12.4855	0.0012	0.1243
3	12.4159	0.0021	0.2002
4	12.3478	0.0030	0.2755
5	12.1785	0.0019	0.4631
6	12.1506	-0.0008	0.5237
7	12.1141	-0.0005	0.5778
8	12.0744	-0.0013	0.7057
9	12.0390	-0.0019	0.7984
10	12.0331	-0.0019	0.8281
11	12.0205	-0.0019	0.8316
12	11.9688	-0.0035	0.9161
13	11.9504	-0.0046	0.9332
14	11.9393	-0.0052	0.9638
15	11.9272	-0.0056	0.9673
16	11.9091	-0.0067	0.9995
17	11.9029	-0.0069	0.9922
18	12.6224	-0.0000	0.0200
19	12.5774	-0.0012	0.0210
20	12.5686	-0.0015	0.0211
21	12.5605	-0.0019	0.0213
22	12.4408	0.0007	0.1268
23	12.3571	-0.0009	0.1288

24	12.3153	-0.0016	0.1300
25	12.1585	0.0024	0.4867
26	12.1308	0.0033	0.4928
27	12.0048	0.0045	0.5662
28	11.9136	0.0056	0.5932
29	11.8737	0.0072	0.6263
30	11.8309	0.0056	0.6418
31	11.8216	0.0052	0.6685
32	11.8189	0.0050	0.6517

ABSUit1 je vektor modula napona nezavisnih čvorova u poslednjoj iteraciji (i=347, broj iteracije).

ARGUit1 je vektor argumenata napona nezavisnih čvorova u poslednjoj iteraciji (i=347, broj iteracije).

DVMAX je postignuta relativna greška u odnosu na 12.66 kV (pretposlednja i poslednja iteracija sračunatog napona).

Ukupna kompleksna potrošnja svih čvorova, kompleksna snaga gubitaka i aktivna snaga gubitaka iznose:

3715 kW+j 2300 kVAr, sumarna potrošnja u svih 32 čvorova,

153.43 kW +j 103.62 kVAr, kompleksna snaga gubitaka,

153.4266 kW, gubici aktivne snage,

i = 347 (broj iteracije kada je postignuta konvergencija).

Struja injektiranja u balansni čvor u i-oj iteraciji (i=347) kada je postignuta konvergencija, Jitc0:

Jitc0 = 305.56 –j 189.86 A,

modul Jitc0 = 359.7433 A,

argumenat Jitc0 = -0.5560 rad.

Iz dobijenih rezultata može se zaključiti:

- 1) proračunati gubici modifikovanim efikasnim algoritmom tokova snaga iz članka [85] za mrežu Baran i Wu iznose 153kW dok je za iste gubitke metodom [97, 100] dobijeno 202kW,
- 2) razlika gornje dve vrednosti potiče iz činjenice da struja injektiranja u balansni čvor, modifikovanim metodom iznosi 360 (-0.556 rad) [A] a metodom [97, 100] 364(-0.556 rad) [A],
- 3) i ova mala razlika od 4A pomnožena sa 12.66kV daje nekih 48kVA razlike u gubicima prividne snage i adekvatnu razliku od 50kW u gubicima aktivne snage.

Verovatno da je razlog greške modifikovanog algoritma prinudna konvergencija fiksnog napona napojnog čvora. Ovaj napon nije konstantan ali se inicijalizuje na konstantnu vrednost na početku svake nove iteracije sračunavanja napona. Algoritam je optimističan, daje niže gubitke nego što su oni u stvari.

Modifikovani algoritam analize tokova snaga može da posluži samo indikativno za proračun gubitaka u distributivnoj mreži.

On je vrlo pogodan za rešenje problema rekonfiguracije u svrhu smanjenja gubitaka, primenom metode simuliranog kaljenja.

U članku [85] rešen je problem konektivnosti ali ne i radijalnosti mreže.

Da bi se krenulo u proračun gubitaka u mreži metodom simuliranog kaljenja potrebno je stalno generisati radijalne i konektovane konfiguracije.

Upetljane konfiguracije mreže Baran i Wu su najjeftinije. Potrebno je odbacivanje konfiguracije jer nije radijalna to jest jer je sa petljama.

Nužna je provera neupetljanosti (radijalnosti) mreže što je urađeno u referenci [91].

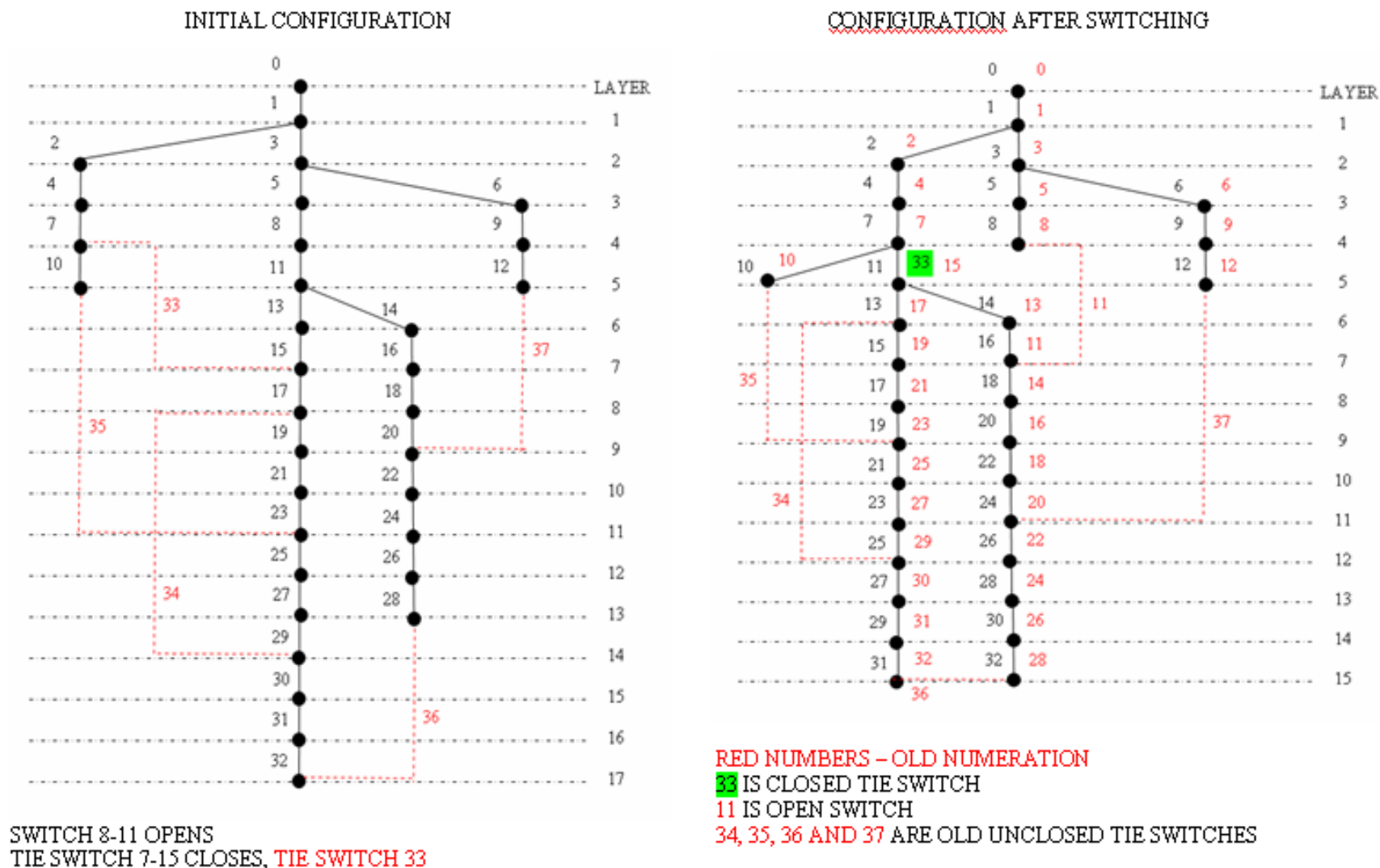
Da bi se tačno proračunali gubici potrebno je na programom izgenerisanu optimalnu konfiguraciju primeniti efikasni algoritam tokova snaga [97, 100]. Zbog nefleksibilnosti ovog algoritma i nezadovoljavajuće renumeracije čvorova tokom izvršenja programa on se ne može

stalno primenjivati za svaku iteraciju. Provereno je da na sledećem primeru FORTRANSKI program num.for [97] ne generiše tačan rezultat-konfiguraciju (Slika 4.2.).

Nefleksibilnost je karakteristika većine algoritama tokova snaga koji se zbog toga ne mogu koristiti za rešavanje problema rekonfiguracije distributivnih mreža metodom simuliranog kaljenja [95, 88]. Problem sa kojim se suočava distributivni inženjer je unošenje podataka konkretne konfiguracije distributivne mreže u računar što je promenljivo od konfiguracije do konfiguracije i zahteva mnogo vremena za pripremu i puštanje programa tako da vreme trajanja algoritama tokova snaga nije problem njihovog izvršenja već vremena unošenja ulaznih podataka. Na primer za Markov-ljev lanac čija je dužina 100 generiše se 100 različitih konfiguracija koje zahtevaju puštanje programa tokova snaga 100 puta čiji su ulazni podaci 100 puta drugačiji. U programima koji su primenjeni u ovom radu postoje mnoge konfiguracije ali ne gubi se vreme na unošenje ulaznih podataka (matrica admitansi nezavisnih čvorova se generiše generatorom slučajnih brojeva i to je praktično ulaz u modifikovani algoritam tokova snaga koji je zato fleksibilan). Dvostruko uvezana struktura liste podataka za predstavljanje ulaznih podataka distributivne mreže u literaturi [101, 45] nije do kraja razrađena.

U ovoj disertaciji prezentovanom algoritmu, potrebno je samo admitansu grane koja se prekida inicijalizovati na 0 nezavisno od toga da li se radi o radijalnoj ili slabo upetljanoj mreži slično Z metodi [98, str. 51-52]. Drugi problem algoritama tokova snaga je njihova uprošćenost (samo za jedan napojni vod i bočne grane bez ogranaka [88, 101, 45]). Distributivna mreža liči na razgranato stablo ili je slabo upetljana što zahteva robustan algoritam tokova snaga za proračun. Razvijeni model je podesan i u slučaju distribuirane proizvodnje s tim što se onda mali generatori predstavljaju kao potrošači negativne aktivne snage i odgovarjuće reaktivne. Iz navedenih razloga razvijeni algoritam primenjen sa tačnim algoritmom tokova snaga predstavlja znatnu pomoć pri rešavanju dinamičkih problema distributivnih mreža kao što su njihova rekonfiguracija ili planiranje.

4. Efikasni algoritam tokova snaga za simetrične radijalne distributivne mreže bez transformatora



Slika 4.2. Prikaz ispravne renumeracije

4.3. Efikasni algoritam analize tokova snaga u MATPOWER okruženju primenjen u nastavku istraživanja

Velika ušteda u vremenu proračuna postiže se upotrebom algoritma tokova snaga u MATPOWER okruženju [90] jer nije potrebno za izgenerisane konfiguracije crtati mrežu po nivoima i primenjivati tačni algoritam tokova snaga [95, 97, 100, 102].

Sve dobre karakteristike modifikovanog algoritma ovde su zadržane (fleksibilnost), s tim što je od neprocenjivog značaja da je ovaj algoritam još i tačan, što se može utvrditi njegovim poređenjem sa algoritmima [95, 97, 100, 102] i ovaj algoritam je konačno primenjen tokom izrade predmetne doktorske disertacije.

O ovom algoritmu se zna [90] da je osnovni solver baziran na Newton-ovoj metodi [96] i da koristi polarnu formu i puni Jakobijan koji se ažurira pri svakoj iteraciji. Nije potrebno renumerisati čvorove. Mreža može biti radijalna ili slabo upetljana. Sve što jeste potrebno je inicijalizovanje otvorene grane na nulu (branchstatus=0). Proračun konvergira za maksimalno 10 iteracija ili dojavljuje da nije uspeo da iskonvergira a vreme proračuna je reda stotog dela sekunde u zavisnosti od mreže koja se analizira. Konfiguracije mreža primera iz disertacije za koje algoritam ne konvergira su sa velikim gubicima (eng. *heavy loss*) pa nisu od interesa sa aspekta smanjenja gubitaka. Newton-ov metod karakteriše kvadratna konvergencija.

Pretpostavlja se simetrični režim i monofazna predstava trofaznog sistema uz usvajanje zajedničkog zemlja-čvora kao referentnog čvora za merenje napona. Sistem ima N nezavisnih čvorova. Zemlja čvor predstavlja $(N+1)$ -vi čvor mreže. Dobija se sledeća kompleksna matricna jednačina koja povezuje struje injektiranja i napone nezavisnih čvorova (merene u odnosu na zajednički zemlja-čvor):

$$[J] = [Y] * [U] \quad (4.3.1)$$

gde je:

$[J]$ - N -dimenzionalni kompleksni vektor struja injektiranja nezavisnih čvorova,

$[U]$ - N -dimenzioni kompleksni vektor fazora napona nezavisnih čvorova i

$[Y]$ - $(N \times N)$ -dimenziona simetrična kompleksna matrica admitansi nezavisnih čvorova.

Jednačina (4.3.1) može se pisati i u sledećem obliku:

$$J_k = \sum_{m=1}^N Y_{km} * V_m \quad (4.3.2)$$

što je razvoj matricne jednačine (4.3.1) po njenoj k -oj vrsti. Gornja jednačina je linearna.

Kompleksna injektirana snaga čvora k data je jednačinom:

$$(P_k + jQ_k) = V_k * \sum_{m=1}^N Y_{km}^* * V_m^* \quad (4.3.3)$$

gde su:

P_k i Q_k - aktivna i reaktivna injektiranja čvora k respektivno i

* - superskript je oznaka za konjugovanu vrednost, a j je oznaka za imaginarnu jedinicu.

Kod algoritma tokova snaga rešava se $(N-1)$ jednačina čija je forma data jednakošću (4.3.3) uz postojanje odgovarajućih dodatnih uslova. S obzirom da su jednačine nelinearne potrebno je upotrebiti iterativni postupak. Newton-ova metoda je primenjiva za rešavanje sistema nelinearnih jednačina kod kojih je odgovarajuća Jakobijan matrica nesingularna i kod kojih je moguće odrediti dovoljno dobru početnu aproksimaciju rešenja. Oba ova uslova su ispunjena kod problema tokova snaga. Kao početna aproksimacija koristi se „ravni” start (eng. *flat start*), kada se uzima da su svi naponi nezavisnih čvorova isti po modulu i faznom stavu sa naponom balansnog čvora.

Nepoznate, kojih ima $(N-1)*2$, jesu naponi čvorova po svom modulu i faznom stavu. Napon balansnog čvora je poznat kao i aktivna i reaktivna injektiranja potrošačkih čvorova. U mrežama koje su analizirane nema PV čvorova. Iz proračunatih napona i ulaznih podataka moguće je direktno sračunati sve ostale veličine.

Newton-ova metoda predstavlja ponavljanje direktnog rešavanja sistema linearnih jednačina izvedenih iz jednakosti (4.3.3). Jakobijan matrica sistema jednačina (4.3.3) daje linearizovanu vezu između malih promena u modulu i faznom stavu fazora napona nezavisnih čvorova ($\Delta V_k / V_k$ i $\Delta \theta_k$) i malih promena u aktivnim i reaktivnim injektiranjima (ΔP_k i ΔQ_k).

Newton-ov metod se zasniva na tome da se svaka funkcija $P_k, Q_k(V_k, \theta_k), k = 1, 2, \dots, N$ razvije u Taylor-ov red u okolini tekuće aproksimacije rešenja $(V, \theta)^h = [V_1^h, \theta_1^h, V_2^h, \theta_2^h, \dots, V_N^h, \theta_N^h]^T$, gde je h broj iteracije. Te funkcije se aproksimiraju samo sa članovima kojima se izražavaju njihove vrednosti i njihovi prvi parcijalni izvodi. Time se dobijaju linearne aproksimacije nelinearnih funkcija $P_k, Q_k(V_k, \theta_k), k = 1, 2, \dots, N$ u okolini tekuće aproksimacije rešenja nelinearnih jednačina (4.3.3), $(V, \theta)^h = [V_1^h, \theta_1^h, V_2^h, \theta_2^h, \dots, V_N^h, \theta_N^h]^T$.

U h - oj aproksimaciji Newton-ov metod zasniva se na utvrđivanju sledećeg sistema linearnih jednačina koji predstavlja aproksimaciju rešavanog sistema nelinearnih jednačina:

$$P_k, Q_k(V_k, \theta_k) = P_k, Q_k(V_1^h, \theta_1^h, V_2^h, \theta_2^h, \dots, V_N^h, \theta_N^h) + \frac{1}{1!} \sum_{i=1}^N \frac{\partial P_k, Q_k(V_1^h, \theta_1^h, V_2^h, \theta_2^h, \dots, V_N^h, \theta_N^h)}{\partial V_i, \theta_i} \Big|_{V_j, \theta_j = V_j^h, \theta_j^h}^* \quad (4.3.4)$$

$$* (V_i^{h+1}, \theta_i^{h+1} - V_i^h, \theta_i^h)$$

$$k = 1, 2, \dots, N.$$

Veličine $V_i^h, \theta_i^h, i = 1, 2, \dots, N$ su poznate, a nepoznate su $V_i^{h+1}, \theta_i^{h+1}, i = 1, \dots, N$. Sistem jednačina (4.3.4) može se napisati i na sledeći način:

$$\Delta P_k, Q_k = \sum_{i=1}^N \frac{\partial P_k, Q_k(V_1^h, \theta_1^h, V_2^h, \theta_2^h, \dots, V_N^h, \theta_N^h)}{\partial V_i, \theta_i} \Big|_{V_j, \theta_j = V_j^h, \theta_j^h}^* \quad (4.3.5)$$

$$* \Delta V_i^h, \theta_i^h$$

$$k = 1, 2, \dots, N$$

gde je:

$$\Delta P_k, Q_k = P_k, Q_k - P_k, Q_k(V_1^h, \theta_1^h, V_2^h, \theta_2^h, \dots, V_N^h, \theta_N^h), k = 1, 2, \dots, N \quad (4.3.6)$$

$$\Delta V_i^h, \theta_i^h = V_i^{h+1}, \theta_i^{h+1} - V_i^h, \theta_i^h, i = 1, 2, \dots, N.$$

Neka se uvedu oznake:

$$a_{ki}^h = \frac{\partial P_k, Q_k(V_1^h, \theta_1^h, V_2^h, \theta_2^h, \dots, V_N^h, \theta_N^h)}{\partial V_i, \theta_i} \Big|_{V_j, \theta_j = V_j^h, \theta_j^h}^* \quad (4.3.7)$$

$$k = 1, 2, \dots, N, i = 1, 2, \dots, N.$$

Tada se sistemu linearnih jednačina (4.3.4) može dati sledeća matricna forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^h, Q_1^h \\ \Delta P_2^h, Q_2^h \\ \vdots \\ \Delta P_N^h, Q_N^h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^h & a_{12}^h & \cdots & a_{1N}^h \\ a_{21}^h & a_{22}^h & \cdots & a_{2N}^h \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1}^h & a_{N2}^h & \cdots & a_{NN}^h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1^h, \theta_1^h \\ \Delta V_2^h, \theta_2^h \\ \vdots \\ \Delta V_N^h, \theta_N^h \end{bmatrix} \quad (4.3.8)$$

odnosno sažetije:

$$\Delta P^h, Q^h = J(V^h, \theta^h) \Delta(V^h, \theta^h) \quad (4.3.9)$$

pri čemu su korišćene sledeće oznake za vektor kolone:

$$\Delta P^h, Q^h = [\Delta P_1^h, Q_1^h \Delta P_2^h, Q_2^h \dots \Delta P_N^h, Q_N^h]^T \quad (4.3.10)$$

$$\Delta(V^h, \theta^h) = [\Delta V_1^h, \theta_1^h \Delta V_2^h, \theta_2^h \dots \Delta V_N^h, \theta_N^h]^T$$

Matrica parcijalnih izvoda funkcije $P_k, Q_k(V_1, \theta_1, V_2, \theta_2, \dots, V_N, \theta_N), k = 1, 2, \dots, N$ po nepoznatim veličinama $V_i, \theta_i, i = 1, 2, \dots, N$ izračunata za h -tu aproksimaciju rešenja (4.3.4) glasi:

$$J(V^h, \theta^h) = \begin{bmatrix} a_{11}^h & a_{12}^h & \cdots & a_{1N}^h \\ a_{21}^h & a_{22}^h & \cdots & a_{2N}^h \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1}^h & a_{N2}^h & \cdots & a_{NN}^h \end{bmatrix}. \quad (4.3.11)$$

Ona predstavlja Jakobijan funkciju s desnih strana sistema nelinearnih jednačina (4.3.3) izračunatih za h -tu tekuću aproksimaciju njegovih rešenja V^h, θ^h .

Sistem linearnih jednačina (4.3.5), odnosno (4.3.8) ili (4.3.9) treba rešiti po vektoru nepoznatih korekcija tekuće aproksimacije rešenja $\Delta(V^h, \theta^h)$. Ovo rešenje jednoznačno egzistira ako je Jakobijan sračunat za tekuću aproksimaciju rešenja nesingularna matrica. Bolja aproksimacija rešenja izračunava se iz tekuće:

$$V^{h+1}, \theta^{h+1} = V^h, \theta^h + \Delta(V^h, \theta^h). \quad (4.3.12)$$

Sistem linearnih jednačina (4.3.5), odnosno (4.3.8) ili (4.3.9), može se rešiti Gauss-ovom eliminacijom.

Gore je opisana jedna iteracija Newton-ovog (iterativnog metoda), postupak se ponavlja do zadovoljenja kriterijuma konvergencije.

$$|\Delta V_k^h, \theta_k^h| \leq \varepsilon_x \wedge |\Delta P_k^h, Q_k^h| \leq \varepsilon_g, \quad k = 1, 2, \dots, N, h = 1, 2, 3, \dots \quad (4.3.13)$$

gde su ε_x i ε_g označeni željeni kriterijumi konvergencije. Često se za zaustavljanje iterativnog metoda proverava samo jedan od gornja (4.3.13) dva kriterijuma.

Jednačina (4.3.8) može se napisati i u sledećoj formi:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^h \\ \Delta Q_2^h \\ \vdots \\ \Delta P_N^h \\ \Delta Q_N^h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{22}^h & N_{22}^h & H_{23}^h & N_{23}^h & \cdots & H_{2N}^h & N_{2N}^h \\ J_{22}^h & L_{22}^h & J_{23}^h & L_{23}^h & \cdots & J_{2N}^h & L_{2N}^h \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ H_{N2}^h & N_{N2}^h & H_{N3}^h & N_{N3}^h & \cdots & H_{NN}^h & N_{NN}^h \\ J_{N2}^h & L_{N2}^h & J_{N3}^h & L_{N3}^h & \cdots & J_{NN}^h & L_{NN}^h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2^h \\ \Delta V_2^h \\ \vdots \\ \Delta \theta_N^h \\ \Delta V_N^h \end{bmatrix} \quad (4.3.14)$$

gde je

$$J(V^h, \theta^h) = \begin{bmatrix} a_{22}^h & a_{23}^h & \cdots & a_{2N}^h \\ a_{32}^h & a_{33}^h & \cdots & a_{3N}^h \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N2}^h & a_{N3}^h & \cdots & a_{NN}^h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{22}^h & N_{22}^h & H_{23}^h & N_{23}^h & \cdots & H_{2N}^h & N_{2N}^h \\ J_{22}^h & L_{22}^h & J_{23}^h & L_{23}^h & \cdots & J_{2N}^h & L_{2N}^h \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ H_{N2}^h & N_{N2}^h & H_{N3}^h & N_{N3}^h & \cdots & H_{NN}^h & N_{NN}^h \\ J_{N2}^h & L_{N2}^h & J_{N3}^h & L_{N3}^h & \cdots & J_{NN}^h & L_{NN}^h \end{bmatrix} \quad (4.3.15)$$

jer jednačina za nulti, balansni čvor, koji je označen sa $N=1$, otpada. U gornjem izrazu (4.3.15) je:

$$\begin{aligned}
 H_{km} &= \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} \\
 N_{km} &= \frac{\partial P_k}{\partial V_m} \\
 J_{km} &= \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} \\
 L_{km} &= \frac{\partial Q_k}{\partial V_m}
 \end{aligned}
 \quad k, m = 2, 3, \dots, N \quad (4.3.16)$$

Izraz (4.3.16) je identičan sa formulom (4.3.7).

Izraz (4.3.14) može se napisati i u sledećem obliku:

$$\begin{bmatrix} \Delta P^h \\ \Delta Q^h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^h & N^h \\ J^h & L^h \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta \theta^h \\ (\Delta V/V)^h \end{bmatrix} \quad (4.3.17)$$

gde su H^h , N^h , J^h i L^h označene submatrice matrice Jakobijana čiji su elementi izračunati u tekućoj aproksimaciji rešenja. Izrazi (4.3.16) kada je m jednako k glase:

$$\begin{aligned}
 H_{kk} &= -V_k^2 * B_{kk} - Q_k \\
 L_{kk} &= Q_k - V_k^2 * B_{kk} \\
 N_{kk} &= P_k + V_k^2 * G_{kk} \\
 J_{kk} &= P_k - V_k^2 * G_{kk}
 \end{aligned} \quad (4.3.18)$$

a za m različito od k :

$$\begin{aligned}
 H_{km} &= L_{km} = V_k * V_m * (G_{km} * \sin \theta_{km} - B_{km} * \cos \theta_{km}) \\
 N_{km} &= -J_{km} = V_k * V_m * (G_{km} * \cos \theta_{km} + B_{km} * \sin \theta_{km})
 \end{aligned} \quad (4.3.19)$$

U gornjim izrazima je $Y_{km} = G_{km} + jB_{km}$ admitansa grane između čvorova k i m .

Iterativni Newton-ov metod za rešenje sistema nelinearnih jednačina (4.3.3) vrši se u sledećim koracima:

1. Izračunati funkcije P_k^h, Q_k^h za tekuću aproksimaciju rešenja θ_k^h, V_k^h kao i razlike $\Delta \theta_k^h, \Delta V_k^h$, $k=1, 2, \dots, N$ (4.3.6);
2. Izračunati Jakobijan $J(V^h, \theta^h)$ (4.3.11) za tekuću aproksimaciju rešenja (V^h, θ^h) ;
3. Rešavanje sistema linearnih jednačina (4.3.8) da bi se izračunala korekcija tekuće aproksimacije rešenja $\Delta(V^h, \theta^h)$;
4. Računanje bolje aproksimacije rešenja V^{h+1}, θ^{h+1} (4.3.12) od prethodne V^h, θ^h ;
5. Proveriti konvergenciju i ukoliko je ona zadovoljena terminirati algoritam. U protivnom preći na novu iteraciju $h+1$.

Dimenzije distributivnih mreža su velike (broj čvorova), tako da bi direktna primena Newton-ovog metoda bila vrlo neefikasna ako ne i nemoguća. Zbog velike razređenosti (velikog broja nultih elementa) u jednačinama (4.3.3), direktna rešenja se mogu efikasno dobiti optimalnom eliminacijom redova i specijalnim programskim tehnikama [96].

U Prilogu 1 objašnjeno je rešavanje efikasnog algoritma analize tokova snaga u MATPOWER okruženju i njegova fleksibilnost [90].

4.4. Drugi efikasni algoritmi analize tokova snaga primenjeni na problem rekonfiguracije distributivnih mreža

U ovom delu disertacije biće pomenuti algoritmi tokova snaga koje su različiti autori iskoristili za svoje programe rekonfiguracije, što im je omogućilo da dođu na kraju do rešenja.

4.4.1. Algoritam tokova snaga iz magistarskog rada autora

Ovo je algoritam Baran-a i Wu-a [6] nazvan jednačine protoka grana (eng. *DistFlow branch equations*) [88]. Koristi aktivnu snagu, reaktivnu snagu i veličine napona na prijemnom kraju grane da bi izrazio iste veličine na kraju grane. Grane su predstavljene rednim impedansama, a potrošnja je modelovana kao konstantna snaga. Ako su poznate navedene vrednosti u prvom čvoru, moguće ih je proračunati u svim narednim, sukcesivnom primenom ovih jednačina. Ovo je takozvano ažuriranje unapred (eng. *forward update*). Ove jednačine mogu se pisati i „unazad“, proračunati veličine na početku grane koristeći one sa kraja grane, (eng. *backward branch equations*). Polazeći od zadnjeg čvora idući „unazad“ sukcesivnom primenom sračunavaju se vrednosti na početku grane i dolazi do novih podataka za nulti čvor.

Sama metoda našla je veliku primenu kod rekonfiguracije, koristili su je autori [40-42, 45, 80, 101] rešavajući je primenom metode simuliranog kaljenja, i to i u uprošćenoj varijanti kada bi zanemarili gubitke snage u vodu.

Osnovni razlog što autor nije koristio ovaj algoritam tokova snaga, jer je sam algoritam u neuprošćenoj verziji tačan, jeste što je on predviđen za mreže sa glavnim vodom i bočnim granama, a bez ogranaka, što ne ispunjavaju sve konfiguracije pri rekonfiguraciji mreže. Takođe, ovaj algoritam autor smatra nefleksibilnim, jer ne može odgovoriti na česte promene konfiguracije mreže.

4.4.2. Algoritam Shirmohammadi

Ovo je najčešće pominjan i vrlo brz i tačan algoritam tokova snaga [9, 95, 97, 100, 102].

Ovaj iterativni metod proračuna radijalnih mreža zasniva se na direktnoj primeni I i II Kirchhoff-ovog zakona. Metod kao polazne podatke, osim podataka o parametrima elemenata mreže, koristi aktivne i reaktivne snage opterećenja u potrošačkim čvorovima i napon napojnog čvora. Da bi algoritam bio efikasan poželjno je da se izvrši numeracija, tako da se grane rasporede po nivoima. Nakon obavljene numeracije uvodi se polazna pretpostavka da su naponi u svim čvorovima mreže jednaki naponu napojnog čvora, da bi se zatim kroz iterativni proces vrednosti napona menjale dok se ne odrede tačne vrednosti napona čvorova.

Korak unazad realizuje se sračunavanjem ukupnih struja koje se isporučuju preko čvorova mreže polazeći od grana u poslednjem nivou i krećući se ka napojnom čvoru.

Korak unapred se realizuje sračunavanjem napona polazeći od napojnog čvora i krećući se ka granama u poslednjem nivou.

Koraci unazad i unapred ponavljaju se sve dok ne bude postignuta konvergencija.

Za slabo upetljane mreže primenjuje se varijanta ovog algoritma sa Thevenin-ovim generatorom i kompenzacionim strujama.

Osnovni razlog što autor nije koristio ovaj algoritam tokova snaga je što nije mogao da izbegne potrebu za renumeracijom čvorova po nivoima za svaku novu konfiguraciju.

Kod provere tačnosti modifikovanog algoritma korišćen je ovaj algoritam.

4.4.3. Algoritam Glamočanin

Algoritam [3] je zasnovan na nadogradnji mreže i dodavanju grana postojećem podstablu. Zasnovan je na sračunavanju povećavanja gubitaka zbog dodavanja novog potrošača. Primenjeni metod ne zahteva nikakvu posebnu numeraciju. Polazi se od zamene unazada od poslednjeg dodatog čvora. Na osnovu snaga potrošnje i napona čvorova u prethodnoj iteraciji sračunavaju se injektirane struje u čvorovima u tekućoj iteraciji. Polazeći od poslednjeg dodatog čvora ažuriraju se samo struje na putu od njega do napojne trafo stanice (ulaznog, balansnog čvora), pridodaju im se vrednosti injektirane struje novog čvora. Napon balansnog čvora je specificiran. U zameni unapred, za ranije definisanu putanju do napojne trafo stanice, polazeći od balansnog čvora ili od poslednjeg čvora kome je proračunat napon (na ovoj putanji) idući ka poslednjem dodatom čvoru sračunavaju

se naponi prijemnih čvorova grana na osnovu impedanse grane i ažurirane struje grane. Kada se podstablu doda nova grana za napon njenog prjemnog čvora uzima se vrednost napona ranije dodatog ulaznog čvora. Novi naponi proračunavaju se opisanom zamenom unazad i unapred. Procedura se primenjuje samo za putanju kojoj je dodata nova grana i konvergira u jednoj iteraciji zbog dobre početne procene napona. Izvedena je približna formula za proračun povećanja gubitaka zbog nove dodate grane u kojoj figuriraju samo snage potrošnje u čvorovima i indeksi grana novododate putanje, od trafo stanice do novog poslednjeg čvora.

Nalazi se globalni optimum uz zadovoljenje strujnih i naponskih ograničenja bez potrebe za matricnim operacijama.

4.4.4. Algoritam Goswami i Basu

Upotrebljen je fleksibilni algoritam tokova snaga [15] koji prati promene u konfiguraciji mreže i koji je dovoljno brz. Potrebno je preurediti mrežu da svaki međučvor ima jednu dolaznu granu i najviše dve izlazne. Potrebno je u označavanju da dovodna grana i njen krajnji čvor imaju isti broj. Zahteva se posebna numeracija čvorova i grana. Topologija mreže se opisuje sa četiri podatka. To su „čvor iza“, „grana ispred-1“, „grana ispred-2“ i završni čvor iz koga ne polaze grane. „Grana ispred-1(i)“ i „grana ispred-2(i)“ su dve grane koje polaze iz čvora i . U slučaju da samo jedna grana polazi iz čvora i , „grana ispred-2(i)“ je označena nulom. U proračunu se zanemaruju prenosni gubici i uzima se da je ulazna snaga grane, označena kao „ukupna snaga“, jednaki zbiru potrošnji čvorova koji se nalaze od nje „nizvodno“. Naponi čvorova se onda iterativno sračunavaju s obzirom da je poznat napon „čvora iza“ i određuju se gubici grane. Postupak se ponavlja za sve čvorove i grane mreže. Ukupni gubici u deonici ispred čvora nazivaju se „ukupnim gubicima snage“ čvora. Nakon jedne iteracije znaju se „ukupni gubici snage“ za sve čvorove. U sledećoj iteraciji „ukupna snaga“ se uvećava za „ukupne gubitke snage“. Na početku se uzima da su naponi na krajevima deonice isti. Počinje se sa poznatim naponom ulaznog čvora da bi se sračunao napon prvog čvora, što se onda ponavlja za celu mrežu. Postupak se može opisati u nekoliko koraka. Prvo se sračunava „ukupna snaga“ za sve čvorove. Zatim se sračunavaju naponi čvorova i ukupni gubici snage za sve grane. Kako su se izmenili „ukupni gubici snage“ u čvorovima oni se proračunavaju i ponovo se polazi od početka. Proces terminira kada je razlika sračunatih gubitaka snage u poslednje dve iteracije dovoljno mala. Kod ažuriranja napona čvora i , uzima se da je on na početku jednak naponu čvora koji mu prethodi. Zatim se sračunava struja grane i , iz snage početnog kraja grane, tako da je poznat pad napona na grani i . Napon tekućeg čvora smanjuje se za proračunati pad napona. Ako nije postignuta konvergencija vraća se na proračun novih vrednosti za struje grana a onda i napona čvorova. Na kraju se sračunavaju gubici mreže. Dobijaju se približni rezultati koji imaju smisla s obzirom da je za problem rekonfiguracije dovoljna relativna pre apsolutne tačnosti. Za mrežu Baran i Wu [6] nalazi se globalni optimum.

4.4.5. Algoritam Borozan, Rajičić i Ačkovski

Algoritam iz referenci [18, 103] je nazvan metoda tokova snaga sa korekcijom napona i najefikasniji je kada se primenjuje za slabo upetljane distributivne mreže. Zasnovan je na posebnoj numeraciji elemenata mreže za koju je potrebno generisati četiri vektora i jednu matricu sa ulaznim podacima na bazi čega se generiše matrica impedansi petlji (Zloop). Pored postojećih spojnih grana (normalno otvorenih) uvode se i fiktivne spojne grane za PV čvorove koje spajaju ulazni, balansni čvor sa odgovarajućim PV čvorovima. Raskidanjem svih spojnih grana uključujući i fiktivne analizirana mreža postaje radijalna po konfiguraciji. Na ovaj način u proračun se uvodi novih $nl+npv$ čvorova gde je nl broj stvarnih spojnih grana a npv broj PV čvorova ili broj fiktivnih spojnih grana. Postojeći i novouvedeni čvorovi spojnih grana predstavljaju mesta injektiranja kompleksnih snaga koje su suprotnog predznaka a iste po modulu. U svakoj iteraciji potrebno je injektirane snage sabrati sa postojećom potrošnjom u čvorovima raskidanja petlji. Zamenom unazad sračunavaju se odgovarajuće snage koje se injektiraju u ulazne i prijemne čvorove (početak i kraj proizvoljne grane

mreže). Polazi se od grane sa najvećim indeksom (na kraju mreže) dok se u proračunu ne dostigne prva grana (sa indeksom jedan). Zatim se na osnovu poznatih snaga na ulaznim čvorovima sračunavaju naponi prijemnih čvorova grana zamenom unapred. Pomoću novih proračunatih napona čvorova izračunavaju se nove vrednosti napona oba čvora na mestu prekidanja petlji i nove inkrementalne promene struja prekidnih tačaka. Pre prelaska na novu iteraciju nalaze se korekcije napona čvorova. Da bi se one izračunale proračunava se radijalna mreža kod koje se kao eksitacije uvode inkrementalne promene struja u tačkama raskidanja petlji bez ikakvih drugih eksitacija i usvaja nulta vrednost za napon ulaznog, balansnog čvora. Nakon zamene unazad i unapred poznate su korekcije napona u svim čvorovima i mogu se dodati poslednjim proračunatim naponima da bi se dobile nove vrednosti za sledeću iteraciju. Za toleranciju vrednosti napona u dve poslednje iteracije usvojeno je 0.0001 r.j.

Kod primene algoritma na problem rekonfiguracije pažnja je usmerena na smanjenje vremena renumeracije grana pri sračunavanju nove Zloop matrice. Razvijen je algoritam za delimično renumerisanje grana. Njime se generiše najmanji podskup grana mreže koje su od interesa, radi efikasnog iznalaženja nove Zloop matrice. Elementi nove matrice dobijaju se prostim aritmetičkim operacijama na odgovarajućoj matrici za prethodnu konfiguraciju mreže.

Kreće se od mreže kod koje su svi prekidači zatvoreni, tako da se tretira slabo upetljana mreža umesto radijalne. Potrošači su predstavljeni modelom konstantne injektirane struje. Od svih grana petlje otvara se ona kod koje je struja minimalna. Na ovaj način se najmanje remeti postojeće stanje optimalnih gubitaka. Procedura se nastavlja sve dok mreža ne postane radijalna. Na ovaj način nalazi se optimalno ili podoptimalno rešenje.

Razvijeni algoritam tokova snaga u potpunosti prati iznete postavke rekonfiguracije mreže kojima se iznalazi prihvatljivi optimum.

Zbog potrebe za renumeracijom nije rađeno na primeni ovog algoritma.

4.4.6. Algoritam McDermott

U radu [5] prikazano je izvođenje približne formule za sračunavanje gubitaka.

Fazne struje prouzrokuju kompleksni pad napona na impedansi grane mreže. Da bi se sračunali gubici aktivne snage potrebno je uzeti u obzir samo rezistantni deo kompleksnog pada napona na svakoj fazi. Može se uvažiti i međusobna sprega faza, odnosno impedansa voda se može predstaviti matricom aktivne i reaktivne otpornosti dimenzije 3x3, pri čemu se jednačine pišu za svaku fazu. Bez obzira što u jednačini za gubitak aktivne snage figuriraju kompleksne veličine ona je realan broj. Kompleksna matrica impedansi međusobno spregnutih faza je simetrična sobzirom na prirodu problema. Struja svake faze predstavlja se u pravougaonim koordinatama svojim realnim i imaginarnim delom. Oni se mogu izraziti aktivnom i reaktivnom snagom početnih čvorova grane kroz koju teku podeljenom sa modulom napona faze početnog čvorova. Da bi se te snage proračunale potrebno je sabrati snage injektirane u potrošačke čvorove koji si „nizvodno“ posmatranoj grani mreže. Moduli napona faza početnih čvorova se dobijaju iz poslednje iteracije proračuna. Fazne struje se moraju izraziti u odnosu na isti referentni fazor. Fazni pomeraj između njih je 120 električnih stepeni. Tako se dolazi do novih pravougaonih koordinata za fazne struje. Jednačina za gubitke aktivne snage tako uvažava i moguće nesimetrično opterećenje koje znatno pogađa struje, a manje fazne i linijske napone. Formula se primenjuje na deo mreže to jest na potrošnju u kandidat čvoru i za grane putanje koja ga povezuje sa napojnim čvorom, jer se samo u tom delu mreže promenila struja grana zbog dodatog opterećenja. Nadogradnjom mreže potrebno je od novih gubitaka za novoizgrađenu mrežu oduzeti gubitke prethodnog nivoa (kada grana koja je dodata nije postojala) i to samo za grane nove putanje od novododatog do izvornog čvora. Za mrežu Baran i Wu [6] nalazi se globalni optimum.

4.4.7. Algoritam Das

Predloženi algoritam zahteva samo rešavanje algebarskih jednačina za proračun napona prijemnih čvorova grana. Efikasan je a konvergencija mu je linearna. Potrošnja je modelovana kao konstantna snaga ali se lako mogu primeniti i drugi modeli. Pretpostavlja se da je trofazna distributivna mreža simetrična i da se može predstaviti jednopolnom šemom. Napon nultog, balansnog čvora je poznat pa ako se zna i struja prve grane lako se sračunava napon prvog „nizvodnog“ susednog čvora. Ovo pravilo važi i za ostale čvorove ako su struje grana mreže poznate. Tako se dolazi do generalne jednačine koja povezuje napone na početku i kraju grane i njene struje. Struja prve grane mreže jednaka je zbiru struja potrošnje svih njoj „nizvodnih“ čvorova, isto važi za struju druge grane itd. Iz ovoga sledi da ako je moguće identifikovati čvorove potrošnje „nizvodne“ svakoj grani, moguće je i naći struju svake grane. Struja potrošnje čvorova mreže izračunava se iz kompleksne snage potrošnje u čvoru i kompleksnog napona čvora. Ako postoje i kondenzatorske baterije u čvorovima, njihove injektirane struje treba oduzeti od struja potrošnje čvora gde su ugrađene. Polazi se od „ravnog“ starta kada su naponi svih čvorova međusobno jednaki i jednaki naponu balansnog čvora. Na osnovu struja grana i njihove impedanse lako se nalaze gubici aktivne i reaktivne snage. Kada se sračunaju novi naponi čvorova proverava se konvergencija rešenja. Ako ona nije postignuta ponovo se sračunavaju struje potrošnje i novi naponi čvorova dok se konvergencija ne zadovolji. Kriterijum konvergencije je da maksimalno relativno odstupanje napona u svim čvorovima mreže, u poslednje dve iteracije, ne bude veće od 0.0001 r.j.

U radu [74] u kome prezentuje algoritam rekonfiguracije zasnovan na heurističnim pravilima i fazi višekriterijumskom pristupu autor ne objašnjava usvojeni efikasni algoritam tokova snaga već ga samo citira kroz referencu [104].

Višekriterijumska optimizacija obuhvata simetriranje opterećenja, minimizaciju gubitaka, odstupanje napona i narušenje strujnih ograničenja.

Heuristika se koristi za minimizaciju broja komutacija.

Test primer je jedinstven jer se ne pominje u ranijoj literaturi.

4.4.8. Diskusija

Zaključak je da se nikad neće staviti tačka na novim efikasnim algoritmima tokova snaga jer sve dok se pronalaze nove metode pristupa rekonfiguraciji autori će razvijati nove algoritme primerene njihovim metodama.

5. SIMULIRANO KALJENJE (eng. *SIMULATED ANNEALING*)

Simulirano kaljenje se prvi put pominje u polju optimizacije ranih 80-ih od strane Kirkpatrick-a i saradnika [105, 106], i nezavisno od njih od strane Černy-a [107]. To je robusni algoritam kombinatorijske optimizacije koji može poslužiti u opšte svrhe, zasnovan na probablističkim metodama, koji se uspešno primenjuje u mnogim oblastima, a neke od njih su projektovanje elektronskih kola, neuralne mreže, procesiranje slike, šifriranje i postavljanje kondenzatorskih baterija u energetskim sistemima [88].

5.1. Kombinatorijska optimizacija

Problem kombinatorijske optimizacije je problem minimizacije ili maksimizacije koji podrazumeva nalaženje optimalnog ili najboljeg rešenja iz skupa mogućih alternativa. On se može u potpunosti okarakterisati prostorom pretraživanja i funkcijom cene ili funkcijom cilja.

Prostor pretraživanja je konačan ili brojivo beskonačan skup mogućih rešenja, a funkcija cilja svakom članu prostora pretraživanja pridružuje ocenu koliko je član dobar u poređenju sa ostalim članovima. U slučaju minimizacije (problem maksimizacije je analogan i ovde se neće razmatrati), željeno optimalno rešenje je ono kod koga je funkcija cilja najmanja od svih funkcija cilja (za svaki drugi član iz prostora pretraživanja). Problem se može jednostavno izraziti sledećom konstatacijom: pronaći minimalnu funkciju cilja za sve članove prostora pretraživanja. Rešenje se naziva globalni optimum, a odgovarajuća funkcija cilja je optimalna funkcija cilja i predstavlja funkciju cilja za globalni optimum. Nekada je moguće da postoji više optimalnih rešenja i tada postoji skup globalnih optimuma.

5.2. Analogija sa fizičkim kaljenjem

Ime simulirano kaljenje dolazi od analogije između kombinatorijske optimizacije i fizičkog procesa kaljenja. Kod fizičkog kaljenja čvrsto telo se hladi vrlo polako, počevši od visoke temperature, u cilju postizanja stanja sa minimalnom unutrašnjom energijom. Ono se hladi polako tako da se dostigne termička ravnoteža na svakoj temperaturi. Termička ravnoteža se može okarakterisati Boltzmann-ovom raspodelom.

Evolucija stanja čvrstog tela u vrućoj kadi ka termičkoj ravnoteži se efikasno može simulirati prostim algoritmom zasnovanim na Monte Karlo tehnici koja je predložena od strane Metropolis-a i saradnika [108] 1953. Metropolis algoritam uzima tekuće stanje x i onda generiše novo stanje y putem malog poremećaja (generator slučajnih brojeva). Prelazak iz stanja x u stanje y se onda prihvata sa verovatnoćom

$$P_{\text{prihvatanja}}(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{ako je } E_y - E_x \leq 0 \\ e^{-(E_y - E_x)/(k_B T)} & \text{ako je } E_y - E_x > 0 \end{cases} \quad (5.2.1)$$

Ako se prihvati, y postaje tekuće stanje i procedura se ponavlja. Kriterijum prihvatanja je poznat kao Metropolis kriterijum.

U konkretnom problemu kombinatorijske optimizacije neka rešenje x odgovara tekućem stanju čvrstog tela, onda funkcija cene $f(x)$ odgovara energiji tekućeg stanja (E), a kontrolni parametar T odgovara temperaturi čvrstog tela. Metoda simuliranog kaljenja ogleda se u iterativnoj primeni Metropolis algoritma za opadajuće vrednosti veštačkog parametra temperature T . k_B je Boltzmann-ova konstanta.

Neke od analogija između termičkog procesa fizičkog kaljenja i veštačkog procesa simuliranog kaljenja kod problema kombinatorijske optimizacije date su u Tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Simulirano kaljenje u poređenju sa fizičkim kaljenjem

Optimizacioni problem	Fizički sistem
rešenje x	tekuće stanje čvrstog tela
trošak ili funkcija cilja $f(x)$	energija tekućeg stanja
kontrolni parametar T	temperatura
optimalno rešenje x_{opt}	„zemaljsko“ stanje
simulirano kaljenje	postepeno hlađenje

5.3. Algoritam simuliranog kaljenja

Simulirano kaljenje spada u kategoriju optimizacionih algoritama poznatih kao probabilističke metode, s obzirom da postoji izvesna slučajnost u određivanju putanje kojom se ide u traganju do rešenja. Niz rešenja se generiše slučajnim generisanjem novog, putem poremećaja tekućeg rešenja i zatim prihvatanja ili odbacivanja novog, sa određenom verovatnoćom koja zavisi od temperature i promene u funkciji cilja.

5.3.1. Verovatnoća prihvatanja

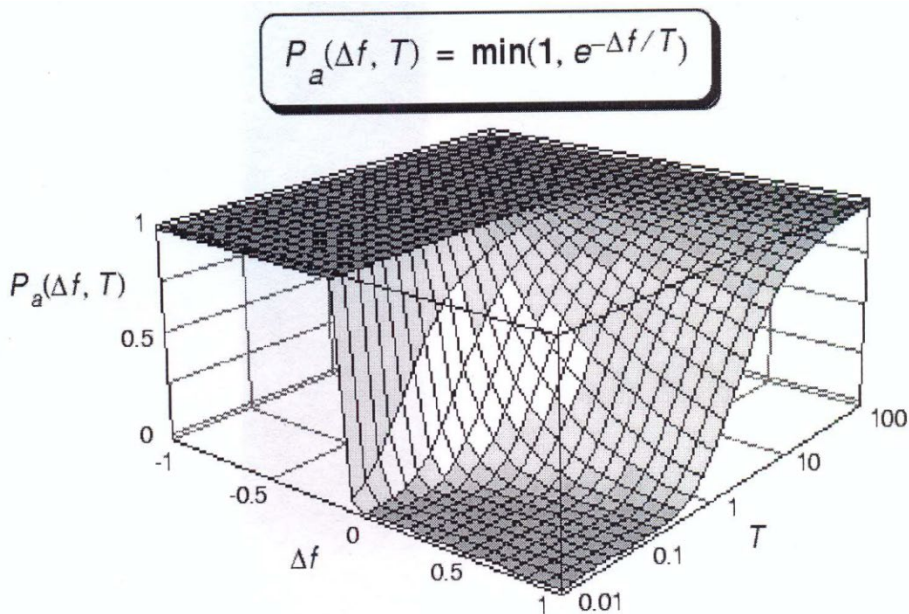
Verovatnoća prihvatanja predloženog pomeraja poznata kao verovatnoća prihvatanja data je sledećim izrazom

$$P_{\text{prihvatanja}}(\Delta f, T) = \begin{cases} 1 & \text{ako je } \Delta f \leq 0 \\ e^{-\Delta f / T} & \text{ako je } \Delta f > 0 \end{cases} \quad (5.3.1.1)$$

ili alternativno

$$P_{\text{prihvatanja}}(\Delta f, T) = \min(1, e^{-\Delta f / T}) \quad (5.3.1.2)$$

što je ekvivalent jednačine (5.2.1). Ovde Δf jeste promena u funkciji cene koja odgovara predloženoj promeni stanja, a T je veštački kontrolni parametar koji predstavlja temperaturu. Činjenica da je verovatnoća prihvatanja tačno 1 kada je Δf negativno indicira da su pomeraji koji snižavaju cenu uvek prihvaćeni. Ipak u poređenju sa „pohlepni“ algoritmima, koji dozvoljavaju samo smanjenje cene, simulirano kaljenje može da prihvati njeno povećanje omogućavajući algoritmu da izbegne lokalne minimume. Kao što je pokazano na Slici 5.1. verovatnoća prihvatanja povećanja cene je gotovo 1 kada je parametar temperature T mnogo veći od povećanja u ceni. Generalno, algoritam startuje na vrlo visokoj temperaturi kada se prihvataju svi izvršeni poremećaji. Kako se temperatura smanjuje simulirano kaljenje se ponaša sve više kao „pohlepni“ algoritam retko prihvatajući pomeraje koji predstavljaju povećanje u funkciji cilja.



Slika 5.1. Verovatnoća prihvatanja u zavisnosti od temperature i promene u funkciji cilja

Intuitivno, ovo znači da se počinje sa pretraživanjem globalno, bez ograničenja lokalnim terenom funkcije cilja, ali kako se temperatura spušta, ona gravitira ka rešenjima sa nižom cenom dok se na kraju na vrlo niskim temperaturama vrši jednostavno lokalno „pohlepno“ pretraživanje (eng. *greedy search*).

5.3.2. Karakteristike asimptotske konvergencije, Markov-ljev lanac

Kada se zna konkretan mehanizam poremećaja treba definisati matricu verovatnoće generisanja $G(T)$ koja za element (i, j) ima verovatnoću generisanja stanja j od stanja i . Određivanjem elemenata matrice verovatnoće prihvatanja $A(T)$, u skladu sa jednačinom (5.3.1.1) ili (5.3.1.2), dobija se matrica čiji je (i, j) -ti element verovatnoća prihvatanja predloženog pomeraja iz stanja i u stanje j . Ukupna verovatnoća pomeraja iz stanja i u stanje j može se predstaviti matricom verovatnoće pomeraja (tranzitnom matricom) $P(T)$, čiji je (i, j) -ti element predstavljen izrazom

$$P_{ij}(T) = \begin{cases} G_{ij}(T)A_{ij}(T) & \text{ako } i \neq j \\ 1 - \sum_{k \in S, k \neq i} P_{ik}(T) & \text{ako je } i = j \end{cases} \quad (5.3.2.1)$$

Kada se poznaje struktura okoline, metoda simuliranog kaljenja se može posmatrati kao algoritam koji stalno pokušava da transformiše tekuću konfiguraciju u jednu od susednih. Mehanizam se matematički najbolje opisuje pomoću Markov-ljevih lanaca: niza pokušaja, kada je ishod svakog pokušaja zavistan isključivo od ishoda prethodnog. U slučaju simuliranog kaljenja pokušaji odgovaraju pomeranjima i jasno je da ishod pomeranja zavisi isključivo od ishoda prethodnog (to jest od tekuće konfiguracije).

Markov-ljev lanac je opisan pomoću skupa uslovnih verovatnoća $P_{ij}(k-1, k)$ za svaki par rezultata (i, j) ; $P_{ij}(k-1, k)$ je verovatnoća da je rezultat k -og probanja j , a rezultat $k-1$ pokušaja i . Neka $a_i(k)$ označava verovatnoću rezultata i pri k -om pokušaju. Neka $X(k)$ označava rezultat k -og pokušaja. Onda je:

$$P_{ij}(k-1, k) = P_r \{X(k) = j \mid X(k-1) = i\} \quad (5.3.2.2)$$

$$i \quad a_i(k) = P_r\{X(k) = i\}. \quad (5.3.2.3)$$

Ukoliko su uslovne verovatnoće nezavisne od k (redni broj probanja), odgovarajući Markov-ljev lanac se zove homogeni. U protivnom je nehomogeni.

U slučaju simuliranog kaljenja, uslovna verovatnoća $P_{ij}(k-1, k)$ označava verovatnoću da je k -ti prelaz tranzit, iz konfiguracije i u konfiguraciju j . Tako, $X(k)$ je konfiguracija dobijena posle k prelazaka. S obzirom na ovo, $P_{ij}(k-1, k)$ se zove verovatnoća prelaska.

Verovatnoće prelaska zavise od vrednosti kontrolnog parametra T , koji je analogon temperaturi u fizičkom procesu simuliranog kaljenja. Ako se T drži konstantnom, odgovarajući Markov-ljev lanac je homogeni i njegova tranzitna matrica je definisana izrazom (5.3.2.1), to jest svaka verovatnoća prelaza se definiše kao proizvod sledeće dve uslovne verovatnoće, verovatnoće generacija $G_{ij}(T)$ generisanja konfiguracije j od (iz) konfiguracije i , i verovatnoće prihvatanja $A_{ij}(T)$ konfiguracije j kada je ona generisana iz konfiguracije i . Odgovarajuće matrice $G(T)$ i $A(T)$ se zovu matrica generisanja i matrica prihvatanja respektivno

Pri određenim uslovima u pogledu generisanja i prihvatanja matrica verovatnoća, kako je opisano u [109], simulirano kaljenje pri fiksnoj temperaturi generiše homogeni Markov-ljev lanac sa matricom pomeraja $P(T)$. Pri beskonačnom broju pomeraja pri fiksnoj temperaturi T , ovakav Markov-ljev lanac ima stacionarnu distribuciju $q(T)$ čija i -ta komponenta, verovatnoća da se bude u stanju i posle beskonačnog broja pomeraja jeste data izrazom

$$q_i(T) = \frac{e^{-f(i)/T}}{\sum_{k \in S} e^{-f(k)/T}} \quad (5.3.2.4)$$

Ova distribucija je ekvivalentna Boltzmann-ovoj distribuciji [88]. Može se pokazati da stacionarna distribucija za rezultat ima sledeći izraz:

$$q_i^* = \lim_{T \rightarrow 0} q_i(T) = \begin{cases} 1 & \text{ako je } i \in S_{opt} \\ 0 & \text{ako } i \notin S_{opt} \end{cases} \quad (5.3.2.5)$$

Drugim rečima ako postoji pogodan mehanizam poremećaja pri beskonačnom broju pomeraja, simulirano kaljenje će naći globalno optimalno rešenje optimizacionog problema sa verovatnoćom 1.

Mogu se razlikovati sledeće dve formulacije algoritma:

1. Homogeni algoritam: algoritam opisan sekvencom homogenih Markov-ljevih lanaca. Svaki Markov-ljev lanac se generiše pri fiksnoj vrednosti za T , i T se smanjuje između uzastopnih Markov-ljevih lanaca.
2. Nehomogeni algoritam: algoritam opisan jednim nehomogenim Markov-ljevim lancem. Vrednost za T se smanjuje između uzastopnih prelaza.

Rezultati izneti u ovoj doktorskoj disertaciji dobijeni su nehomogenim algoritmom koji je vremenski manje zahtevan od homogenog algoritma, ako drugačije nije naznačeno.

5.3.3. Aproksimacija u konačnom vremenu

Jasno je da nije moguće u praksi ostvariti algoritam sa beskonačnim brojem iteracija tako da se koristi aproksimacija u konačnom vremenu. Kod algoritma u konačnom vremenu detalji aproksimacije su specificirani pomoću mehanizma hlađenja.

Mehanizam hlađenja je vrlo važan s obzirom na konvergenciju i brzinu konvergencije algoritma simuliranog kaljenja. On specificira početnu vrednost parametra temperature, kako i kada se temperatura menja tokom celog procesa kaljenja i kada se prekida algoritam. Mnogi različiti mehanizmi hlađenja su našli primenu [109] od kojih su neki prosti, a neki složeni. Elementi mehanizma hlađenja dati su u Tabeli 5.2.

Tabela 5.2. Elementi mehanizma hlađenja

Komponente mehanizma hlađenja	
1	početna temperatura
2	postupak promene temperature
3	dužina Markov-ljevog lanca
4	kriterijum zaustavljanja

Jedan od osnovnih mehanizama hlađenja se sastoji u izboru vrlo velike vrednosti za početnu temperaturu (tako da je početna stopa prihvatanja gotovo 1) i nastavljanju algoritma na sledeći način:

1. Primentiti i Metropolis algoritam generišući Markov-ljev lanac.
2. Ako je kriterijum epohovanja [88] terminiranja Markov-ljevog lanca kroz zgusnutost dva poslednja rešenja postignut, terminirati Markov-ljev lanac i preći na korak 3. U protivnom vratiti se na korak 1.
3. Promeniti temperaturu T množeći je sa konstantom α koja se nalazi u opsegu od 0 do 1. Vratiti se na korak 1. Ako je dostignuta maksimalna dužina Markov-ljevog lanca ili je stopa prihvatanja dovoljno mala, terminirati algoritam bez promene temperature. Pod stopom prihvatanja podrazumeva se odnos prihvaćenih rešenja prema ukupnom broju izgenerisanih rešenja.

Aproksimacija u konačnom vremenu algoritma simuliranog kaljenja ne može da garantuje konvergenciju do optimalnog rešenja. Ipak, u većini slučajeva ona može da nađe rešenje blisko optimumu za prihvatljivo računarsko vreme.

5.4. Šematski prikaz algoritma

Jedna od privlačnih karakteristika algoritma simuliranog kaljenja je njegova laka primena. Osnovni algoritam ne zavisi od posebnog optimizacionog problema koji se rešava. Na Slici 5.4.1. prikazan je homogeni, a na Slici 5.4.2. nehomogeni algoritam. Na slikama su korišćene sledeće oznake:

E – gubici aktivne snage za poslednju izgenerisanu konfiguraciju metodom simuliranog kaljenja u kW;

EOLD - gubici aktivne snage za poslednju prihvaćenu konfiguraciju metodom simuliranog kaljenja u kW;

EOLDD - gubici aktivne snage koji su najmanji tokom cele procedure primene simuliranog kaljenja, direktno pretraživanje (eng. *greedy search*), za sve izgenerisane konfiguracije u kW;

ICOUNA – broj prihvaćenih konfiguracija u poslednjem Markov-ljevom lancu [88];

ICOUNT – maksimalna dozvoljena dužina Markov-ljevog lanca;

IMIN – broj izgenerisanih minimalnih konfiguracija (monitorisanjem direktnog pretraživanja) u opadajućem nizu;

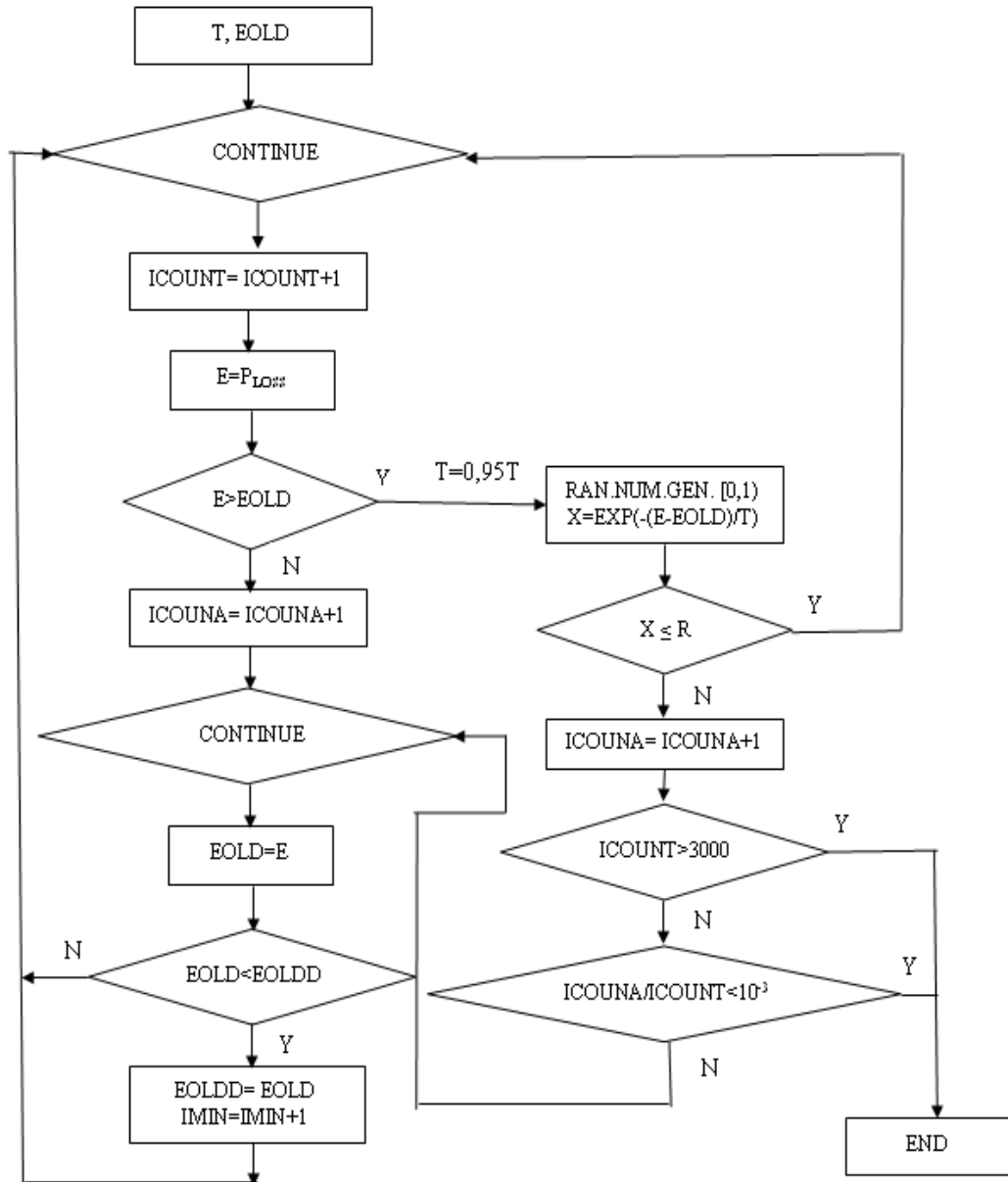
T – temperatura poslednjeg Markov-ljevog lanca, početna temperatura je 5000;

niz – vektor koji označava otvorene grane poslednje izgenerisane konfiguracije metodom simuliranog kaljenja;

nizOLD - vektor koji označava otvorene grane poslednje prihvaćene konfiguracije metodom simuliranog kaljenja;

nizOLDD – vektor koji označava otvorene grane konfiguracije čiji su gubici EOLDD;

abs(E-EOLD)/E – vrednost epoha [88], što je usvojeno za kriterijum terminiranja Markov-ljevog lanca i



Slika 5.4.2. Šematski prikaz nehomogenog algoritma

Nehomogeni algoritam simuliranog kaljenja može se predstaviti i sledećim nizom naredbi:

- 1 Definisane početnih vrednosti (T, EOLD, nizOLD, EOLDD, nizOLDD)
- 2 **while** (ICOUNT < maksimalnog broja iteracija)
- 3 Generisanje povezane i radijalne konfiguracije niz
- 4 Proračun gubitaka
- 5 **if** Da li su gubici E veći od zapamćene vrednosti EOLD?
- 6 temperatura $T=0.95 \cdot T$
- 7 R slučajan broj iz intervala [0,1)
- 8 $X = \exp(-(E-EOLD)/T)$
- 9 **if** $X \leq R$
- 10 Idi na 28
- 11 **end if**
- 12 Povećaj broj prihvaćenih konfiguracija ICOUNA za 1
- 13 **if** $(ICOUNA/ICOUNT) < 0.001$

5. Simulirano kaljenje (eng. *Simulated Annealing*)

```
14 Terminiraj program (END)
15 else EOLD=E
16 nizOLD=niz
17 end if
18 else Povećaj broj prihvaćenih konfiguracija ICOUNA za 1
19 EOLD=E
20 nizOLD=niz
21 Crtanje grafika gubitaka u funkciji od rednog broja iteracije
22 Crtanje grafika gubitaka u funkciji od temperature
23 if EOLD<EOLDD
24 EOLDD=EOLD
25 nizOLDD=nizOLD
26 Povećaj broj minimalnih konfiguracij IMIN za 1
27 end if
28 end if
29 ICOUNT=ICOUNT+1
30 end while
```

6. PRIMENA ALGORITMA REŠENJA

Na osnovu formulacije problema date u Poglavlju 2. razvijeni su programi u MATLAB-u uz korišćenje efikasnog algoritma tokova snaga i alatki algoritma simuliranog kaljenja analiziranih u Poglavljima 4. i 5., respektivno. Ovo poglavlje detaljno prikazuje primenu algoritma simuliranog kaljenja. Naime, u njemu su specificirane četiri komponente neophodne da bi se primenilo simulirano kaljenje na specifični optimizacioni problem, u ovom slučaju smanjenje gubitaka u trofaznim simetričnim radijalnim distributivnim mrežama. Ova četiri elementa su navedena u Tabeli 6.1.

Tabela 6.1. Primena simuliranog kaljenja

4 elemenata primene		
1	prostor pretraživanja	specificirano kao deo formulacije problema
2	funkcija cilja ili funkcija cene	
3	mehanizam poremećaja	specificirano kao deo algoritma rešenja
4	mehanizam hlađenja	

6.1. Prostor pretraživanja

Kod problema rekonfiguracije prostor mogućih rešenja koji se pretražuje metodom simuliranog kaljenja je prostor svih mogućih konfiguracija mreže kao što je opisano u Poglavlju 2.1. Rešenje ima formu $u = [u_1, u_2, \dots, u_{ns}]^T$, gde je ns broj prekidača (komutacionih uređaja) u sistemu, dok u_i predstavlja stanje prekidača i (otvoren/zatvoren). Prostor pretraživanja, prostor svih mogućih konfiguracija u , je $S = \{0, 1\}^{ns=2^{ns}}$.

6.2. Funkcija cilja

Cilj kod problema rekonfiguracije mreže je da se minimizira ukupan gubitak aktivne snage u distributivnom sistemu u cilju smanjenja cene isporučene energije koju zahtevaju potrošači. U našem slučaju, to su gubici na rezistansama vodova (u modelu mreže uzete su u obzir samo redne rezistanse, a otočne su zanemarene, uzeto je da su otočne admitanse 0). Snaga gubitaka se sračunava kao razlika ukupne injektirane snage i ukupne potrošnje.

Trošak koji otpada na komutaciju pri prelazu sa jedne na drugu konfiguraciju (trošak manipulacije komutacionom opremom) se može lako uključiti u funkciju cene, kao što je pomenuto u Poglavlju 2.3. Ovo je urađeno u Poglavlju 8.5., Tabele 8.5.2. i 8.5.3.

6.3. Mehanizam poremećaja

Postupak generisanja mehanizma poremećaja predstavljen je u Tabeli 6.2. Mada je simulirano kaljenje u globalu primenjivano u optimizaciji bez ograničenja, moguće je upotrebiti ga i za probleme sa ograničenjima. Ograničenja je moguće uzeti u obzir mehanizmom poremećaja koji se koristi za generisanje novih stanja. U ovakvoj primeni mehanizam poremećaja predlaže samo podobna rešenja, a i samim tokom procesa generišu se samo podobne konfiguracije. Generatorom slučajnih brojeva generišu se isključivo podobne konfiguracije. On generiše stalno onoliko grana u prekidu koliko je bilo i na početku, što daje konfiguracije koje imaju stalno broj grana za jedan manji od broja čvorova, a kako je izlaz iz programske while petlje samo konektovana konfiguracija, to je potreban i dovoljan uslov da se ima razgranato stablo [91].

6. Primena algoritma rešenja

Tabela 6.2. Mehanizam poremećaja

Neka je dobijena podobna konfiguracija	
1	Pomoću generatora slučajnih brojeva generisati novu konfiguraciju koja zadovoljava topološka ograničenja.
2	Pomoću efikasnog algoritma tokova snage naći gubitke za tekuću konfiguraciju.
3	Proveriti da li su zadovoljena ograničenja opterećenja i operaciona ograničenja. Ako nisu vratiti se na korak 1, ako jesu predložiti novo rešenje algoritma.

6.3.1. Topološka ograničenja

Topološka ograničenja se odnose na vektor u komutacionih stanja. Pretpostavimo da je ukupni broj komutacionih elemenata $n_s = n_{otvoreno} + n_{zatvoreno}$, gde je $n_{otvoreno}$ broj normalno otvorenih prekidača, a $n_{zatvoreno}$ je broj normalno zatvorenih prekidača.

Da bi se imala konfiguracija koja je razgranato stablo, ne sme se nikad otvoriti više od $n_{otvoreno}$ prekidača, tj. broj otvorenih grana mora biti stalan tokom celokupnog izvršenja algoritma. Otvaranjem većeg broja grana od $n_{otvoreno}$ dobila bi se nekonektovana mreža. Zatvaranjem većeg broja grana od $n_{zatvoreno}$ dobila bi se upetljana mreža koja nije radijalna. Zato nikada ne sme biti manje od $n_{zatvoreno}$ grana. Drugim rečima, broj otvorenih grana mora stalno biti $n_{otvoreno}$, a broj zatvorenih grana mora stalno biti $n_{zatvoreno}$, tako da se ima za ukupan broj podobnih konfiguracija

$$\frac{n_s!}{n_{otvoreno}! * (n_s - n_{otvoreno})!} \quad (6.3.1.1)$$

Ovo je samo gornja granica, s obzirom da svaka od ovih konfiguracija ne predstavlja razgranato stablo.

Kada se ima radijalna konfiguracija nova radijalna konfiguracija se može dobiti prostim postupkom koji je implementiran u samom programu.

Generatorom slučajnih brojeva stalno se generiše isti broj zatvorenih grana, izlazak iz programske while petlje je isključivo konektovana konfiguracija. Kako je stalno broj grana za jedan manji od broja čvorova, a mreža je konektovana ovo je potreban i dovoljan uslov da je novo generisana konfiguracija radijalna [91].

Mada postoje i druge metode da bi se generisala nova podobna konfiguracija, ova vrlo jednostavna metoda obezbeđuje dostizanje, kroz sekvencu promene statusa prekidača, nove radijalne konfiguracije.

6.3.2. Električna ograničenja

Svako podobno rešenje mora zadovoljiti Kirchoff-ove zakone obezbeđujući odgovarajuće potrošnje u svakom čvoru. Ovo je uključeno u samom efikasnom algoritmu tokova snaga koji je predstavljen u Poglavlju 4.

Da bi se pronašlo novo podobno rešenje primenjen je generator slučajnih brojeva koji u svojoj programskoj while petlji generiše radijalnu konfiguraciju na koju se primenjuje efikasni algoritam tokova snaga.

6.3.3. Ograničenja opterećenja i operaciona ograničenja

Kvalitetne radijalne konfiguracije za našu funkciju cilja zadovoljavaju ova ograničenja bez ikakve provere.

6. Primena algoritma rešenja

Nju je moguće izvršiti samo na kraju, posle primene preciznog efikasnog algoritma tokova snaga. Ako strujna ograničenja nisu narušena u polaznoj konfiguraciji, neće biti narušena ni u optimalnoj. Ovo isto važi i za naponska ograničenja jer se rekonfiguracijom naponska slika samo popravljaju.

Treba napomenuti da rekonfiguracija u svrhu smanjenja gubitaka aktivne snage nije mehanizam za regulaciju napona ili ograničenje struja kroz vodove, mada se i ovi kriterijumi mogu uključiti.

6.4. Mehanizam hlađenja

Postoje mnoge varijante algoritma simuliranog kaljenja kada je reč o mehanizmu hlađenja. Ovo je često problem uzaludnih pokušaja.

Opšte usvojeno pravilo je da se temperatura smanjuje shodno obrascu:

$$T = \alpha * T, \quad (6.4.1)$$

gde je α broj iz opsega [0.9, 1).

U ovoj doktorskoj disertaciji je primenjen prost mehanizam hlađenja gde je za α usvojena vrednost 0.95 ili 0.99, tako da je temperatura svakog sledećeg Markov-ljevog lanca za 5% (ili 1%) manja od temperature prethodnog (kod homogenog algoritma) ili se po tom pravilu snižava između dve uzastopne primene Metropolis kriterijuma kod nehomogenog algoritma.

6.4.1. Početna temperatura

Za početnu temperaturu izabrano je 5000 stepeni za sve analizirane slučajeve sem za slučaj simultane rekonfiguracije i otočne kompenzacije u svrhu smanjenja gubitaka na električnu energiju, pomoću regulacionih kondenzatorskih baterija, kada je za ovu vrednost usvojeno 10000 stepeni.

Ona je dovoljno velika da se na početku algoritma prihvataju gotovo sve konfiguracije.

Jedna od komplikovanijih varijanti definisanja početne temperature data je u referenci [110].

6.4.2. Ažuriranje temperature

Temperatura svakog sledećeg Markov-ljevog lanca je za 5% manja od temperature prethodnog, za sve analizirane slučajeve gde je primenjen homogeni algoritam i za primer mreže Baran-a i Wu-a kod nehomogenog algoritma, dok je za mrežu Jiang ova vrednost 1% (takođe primenjen nehomogeni algoritam).

6.4.3. Dužina Markov-ljevog lanca

Cilj određivanja optimalne dužine Markov-ljevog lanca je da se dozvoli postizanje ekvilibrijuma na svakoj temperaturi. Nakon njegovog dostizanja nije neophodno generisanje novih stanja na toj temperaturi.

U radu je primenjen kriterijum sa terminiranjem lanca kada je relativna vrednost, vrednosti dve uzastopne konfiguracije manja od 0.00001.

Ovaj kriterijum je poznat kao epohovanje [88] i važi za homogeni algoritam. Kod nehomogenog algoritma ovaj kriterijum izostaje jer postoji samo jedan Markov-ljev lanac.

U radu je primenjen nehomogeni algoritam sa dužinom Markov-ljevog lanca od 20000 i 100000 iteracija koji je vremenski manje zahtevan od homogenog.

6.4.4. Stop kriterijum

Algoritam se zaustavlja kada je temperatura dovoljno niska da se stanje može smatrati „zamrznutim“.

6. Primena algoritma rešenja

Stanje se može smatrati „zamrznutim“ kada je dužina Markov-ljevog lanca prešla 20000 iteracija, za primer mreže Baran-a i Wu-a (nehomogeni algoritam) i 100000 iteracija za primer mreže Jiang (nehomogeni algoritam) ili kada je odnos između prihvaćenih i svih generisanih konfiguracija na jednoj temperaturi manji od 0.001, što je primenjeno u ovom radu.

7. RAZVOJ ALGORITAMA SIMULIRANOG KALJENJA SA OSVRTOM NA MEHANIZAM POREMEĆAJA I MEHANIZAM HLAĐENJA

Razvoj, odnosno modifikacija algoritma simuliranog kaljenja u primeni na rešavanje konfiguracije mreže data je u ovom poglavlju sa osvrtom na različite mehanizme poremećaja i mehanizme hlađenja kroz hronološki prikaz referenci.

7.1. Hsiao-Dong Chiang i Rene Jean-Jumeau

Primenjeni mehanizam poremećaja i mehanizam hlađenja, iz referenci [40, 41], dati su u tekstu koji sledi.

1) Mehanizam poremećaja

Dva tipa pomeraja se koriste u ovu svrhu.

A. Pomeraj dodaj /oduzmi:

Zatvoriti jednu spojnu granu iz skupa spojnih grana upotrebom generatora slučajnih brojeva. Nastaje petlja u radijalnoj konfiguraciji.

Takođe, korišćenjem generatora slučajnih brojeva iz skupa sekcionijskih grana izabrati jednu granu i otvoriti je tako da se ponovo uspostavi radijalna konfiguracija. Ova grana zamenjuje prethodno zatvorenu iz skupa otvorenih grana i postaje potencijalna spojna grana.

B. Višestruki pomeraj:

Korišćenjem generatora slučajnih brojeva izabrati nekoliko spojnih grana i zatvoriti ih. Na ovaj način nastaje petlja.

Generatorom slučajnih brojeva izabrati isti broj grana, iz svake petlje jednu, i otvoriti ih tako da se ponovo uspostavi radijalna struktura. Ove grane postaju potencijalne spojne grane u daljem toku algoritma.

Navedena dva pomeraja su istog karaktera, a različitog kvantiteta, prvi je lokalni, a drugi veliki poremećaj. Na ovaj način generišu se nove konfiguracije mreže.

Na višim temperaturama primenjuje se veliki poremećaj a na nižim lokalni.

2) Mehanizam hlađenja

Mehanizam hlađenja ovde upotrebljen je mala modifikacija mehanizma koji su predložili Kirkpatric, Gelatt i Vecchi [106] (eksperti za teoretski razvoj i primenu algoritma simuliranog kaljenja) i široko je rasprostranjen i zasnovan je na empirijskim pravilima.

2.1) Početna temperatura

Početna temperatura bira se tako da stopa prihvatanja bude 0.85.

2.2) Postupak snižavanja temperature

Koristi se sledeće pravilo snižavanja temperature: $T_{k+1} = \alpha(T_k) * T_k$, gde je $\alpha(T_k)$ stopa hlađenja sa vrednošću između 0 i 1. Uobičajeno je pravilo koje ovu stopu proglašava konstantom [106]. Obično se usvaja vrednost između 0.85 i 0.99. U referenci [40, 41], $\alpha(T_k)$ je varijabla koja se nalazi u opsegu 0.85 i 0.98 u zavisnosti od sledeća dva faktora: (i) stope prihvatanja i (ii) srednje vrednosti varijacije funkcije cilja na tekućoj temperaturi. Kada je stopa prihvatanja visoka, $\alpha(T_k)$ se podesi na manju vrednost i temperatura se brže snižava. Kada je stopa prihvatanja niska, a srednja vrednost varijacije funkcije cilja ima velike padove, $\alpha(T_k)$ se podešava na veću vrednost da bi se sprečilo ostajanje u lokalnom optimumu (što je analogno fenomenu „nastanka termo-dinamički metastabilnih stanja“ iz statističke fizike).

2.3) Broj pomeraja na svakoj temperaturi (dužina Markov-ljevog lanca kod homogenog algoritma)

Propisuje se fiksni maksimalni broj poremećaja i prethodno podešena stopa prihvatanja. Temperatura se spušta kada bilo koji od ova dva faktora dostignu svoju graničnu respektivnu vrednost.

2.4) Krajnja temperatura

Ako se u konsektivnih 5 temperatura srednja vrednost funkcije cilja mnogo ne menja ili je stopa prihvatanja dovoljno mala (manja od 1 %), tada se smatra da je postupak kaljenja „zamrznut“ i da je dobijena optimalna konfiguracija.

7.2. Dan Jiang

Primenjeni mehanizam poremećaja i mehanizam hlađenja, iz reference [101], dati su u tekstu koji sledi.

1) Mehanizam poremećaja

Korišćen je pomeraj dodaj/oduzmi iz referenci [40, 41].

2) Mehanizam hlađenja

2.1) Usvojena je početna temperatura od 50 C° da bi se imala visoka početna stopa prihvatanja.

2.2) $T_{k+1} = \alpha(T_k) * T_k$.

Eksperimentisano je sa tri različite vrednosti za α između 0.9 i 0.999 (0.990, 0.995 i 0.999). Najbolji rezultat je dobijen za $\alpha=0.995$.

2.3) Usvojen je jedan Markov-ljev lanac (nehomogeni algoritam) dužine 2000.

2.4) Kada je promena u vrednosti funkcije cilja mala ili je stopa prihvatanja manja od 1%, smatra se da se proces „zamrzao“ i najbolja konfiguracija koja je dobijena je uzeta za optimalnu.

7.3. Hong-Chan Chang i Cheng-Chien Kuo

Primenjeni mehanizam poremećaja i mehanizam hlađenja, iz reference [42], dati su u tekstu koji sledi.

1) Mehanizam poremećaja

Bira se proizvoljan prekidač spojne grane i zatvara. Na ovaj način stvara se petlja. Onda se otvara bilo koji prekidač od dva susedna prethodno zatvorenom. Gubici za dve radijalne konfiguracije se zatim sračunavaju i porede.

2) Mehanizam hlađenja

2.1) Početna temperatura mora da ima visoku stopu prihvatanja (recimo 0.95). Početna temperatura određuje se dinamički u sledećim koracima.

Korak 1. Sračunati gubitke L_0 polazne konfiguracije. Startovati sa brojačem iteracija $k=1$ i kumulativnom razlikom gubitaka $\Delta_{loss} = 0$.

Korak 2. Nasumice izabrati podobnu konfiguraciju S_r koja je radijalna i sračunati gubitke za nju L_{S_r} . Uvećati razliku gubitaka Δ_{loss} :

$$\Delta_{loss} = \Delta_{loss} + |L_{S_r} - L_0|$$

i izjednačiti $L_0 = L_{S_r}$, $k = k + 1$.

Korak 3. Ako je $k = 10n$, gde je n ukupan broj prekidača mreže, preći na korak 4. U protivnom, vratiti se na korak 2.

Korak 4. Sračunati srednju vrednost razlike u gubicima $E(\Delta_{loss})$:

$$E(\Delta_{loss}) = \frac{\Delta_{loss}}{10n}$$

Da bi se imala stopa prihvatanja 0.95 na početku primentu formulu

$$|\ln(0.95)| = \frac{E(\Delta_{loss})}{T_0}$$

Onda je $T_0 \approx 20E(\Delta_{loss})$.

Mehanizam poremećaja za postizanje podobne konfiguracije koraka 2 je ranije već opisan (pod 1). U koraku 3 broj od $10n$ podobnih konfiguracija je potreban da bi se sračunala srednja vrednost

7. Razvoj algoritama simuliranog kaljenja sa osvrtom na mehanizam poremećaja i mehanizam hlađenja

razlike u gubicima. Na ovaj način, početna temperatura T_0 se može odrediti dinamički za različite konfiguracije.

$$2.2) T_{k+1} = \alpha(T_k) * T_k, \alpha = 0.9(0.95).$$

2.3) Primenjuje se Metropolis kriterijum deset puta više od broja prekidača i onda proverava stopa prihvatanja. Ako je ona manja od 0.1 smatra se da je dostignut termički ekvilibrijum na određenoj temperaturi. U protivnom, nastavlja se sa Metropolis procesom.

2.4) Ako se na sedam uzastopnih temperatura ne promeni dobijena konfiguracija može se smatrati da je proces simuliranog kaljenja „zamrznut“ i da je dostignuto „zemaljsko stanje“, da je dostignuto stanje blisko optimumu.

7.4. Antonino Augugliaro, Luigi Dusonchet i Eleonora Riva Sanseverino

Primenjeni mehanizam poremećaja i mehanizam hlađenja, iz reference [111], dati su u tekstu koji sledi.

1) Mehanizam poremećaja

I. Nasumice izaberi jednu otvorenu granu i zatvori je. Ona prelazi u skup zatvorenih grana. Na ovaj način nastaje petlja u mreži. Skup L obuhvata sve grane novonastale petlje.

II. Izaberi proizvoljnu granu iz skupa L i otvori je. Ona prelazi u skup otvorenih grana.

Dobijena mreža je sigurno radijalna i u njoj nema nenapajanih potrošača. Potrebno je otvoriti granu tako da se novonastali gubici smanje.

2) Mehanizam hlađenja

2.1) Početna temperatura se podesi tako da su svi pomeraji (konfiguracije) prihvatljive.

$$2.2) T_{k+1} = \alpha(T_k) * T_k, \alpha = 0.999.$$

2.3) Ne navodi se broj generisanja poremećaja na svakoj temperaturi.

2.4) Ne navodi se ni krajnja temperatura ni stop kriterijum.

7.5. Ching-Tzong Su i Chu-Sheng Lee

Primenjeni mehanizam poremećaja i mehanizam hlađenja, iz reference [80], dati su u tekstu koji sledi.

1) Mehanizam poremećaja

Autori samo navode Metropolis kriterijum kao mehanizam poremećaja.

2) Mehanizam hlađenja

2.1) Početna temperatura $T_0 = 30 \text{ C}^\circ$.

$$2.2) T_{k+1} = \alpha(T_k) * T_k, \alpha = 0.95.$$

2.3) Usvojen je kriterijum terminiranja Markov-ljevog lanca kada stopa prihvatanja postane manja od 0.1. Maksimalni broj iteracija je 300 (nije jasno da li je primenjen homogeni algoritam simuliranog kaljenja sa maksimalnom dužinom Markov-ljevog lanca od 300 iteracija ili je ovo maksimalni broj iteracija jednog nehomogenog Markov-ljevog lanca).

2.4) Krajnja temperatura je $T_f = 6.4 \text{ C}^\circ$.

7.6. Young-Jae Jeon i Jae-Chul Kim

Primenjeni mehanizam poremećaja i mehanizam hlađenja, iz reference [46], dati su u tekstu koji sledi.

1) Mehanizam poremećaja

Polazi se od ukupnog broja petlji distributivne mreže. Određuje se veličina svake petlje. Normalizuje se veličina svake petlje ukupnim brojem petlji. Vršiti se izbor spojnih prekidača proporcionalan veličini petlje simuliranjem obrtanja ruleta. Na točak ruleta utiču relativne veličine petlji koje odgovaraju svakom spojnom prekidaču. Izaberi jedan spojni prekidač i formirati petlju.

7. Razvoj algoritama simuliranog kaljenja sa osvrtom na mehanizam poremećaja i mehanizam hlađenja

Formirati skup petlje Ω_{loop} sa svim prekidačima petlje. Na ovaj način važnost dobijaju spojni prekidači izabrani prema veličini petlje.

Za svaki prekidač iz skupa Ω_{loop} izračunati „nivo prekidača“ (to jest udaljenost između spojnog prekidača i svakog zatvorenog prekidača). Izabrati i otvoriti zatvoreni prekidač sa verovatnoćom zavisnom od nivoa prekidača iz Ω_{loop} . Na ovaj način će se ponovo uspostaviti radikalna konfiguracija.

Verovatnoća izbora spojnog prekidača se određuje uniformnom raspodelom sa inverznim uticajem nivoa prekidača:

$$SW_i = \frac{1}{n} \gamma_k + (1 - \gamma_k) \frac{1/SL_i}{\sum_{j=1}^n 1/SL_j} \quad (7.6.1)$$

gde su SW_i i SL_i respektivno verovatnoća izbora i nivo zatvorenog prekidača i , n je broj zatvorenih prekidača iz Ω_{loop} i γ_k je pozitivan broj iz opsega $[0,1]$ koji se sračunava iz sledeće formule:

$$\gamma_k = \lambda + \lambda e^{(T_k - T_0)} \quad (7.6.2)$$

gde je λ pozitivan broj iz opsega $[0, 0.5]$, a T_0 i T_k su početna i tekuća temperatura respektivno.

Na T_0 i sa $\lambda = 0.5$ svi zatvoreni prekidači se proizvoljno biraju (γ_k je 1) i verovatnoća izbora svakog zatvorenog prekidača je ista. Snižavanjem temperature T_k , γ_k se smanjuje čime se povećava verovatnoća izbora prekidača čiji je nivo mali. To implicira da konfiguracija sa malim poremećajem izabrana ovim mehanizmom poremećaja jeste vrlo verovatna i da može biti prihvaćena na niskoj temperaturi.

Ovim mehanizmom poremećaja zasnovanim na topologiji mreže postiže se diverzifikacija na visokim temperaturama i intenzifikacija približavanja privlačnim regijama na niskoj temperaturi. Bira se prekidač iz petlje proporcionalno njenoj veličini. Na taj način verovatnoća izbora prekidača iz male petlje je manja nego kod prekidača iz velike, što nije slučaj sa mehanizmom poremećaja iz [40, 41].

2) Mehanizam hlađenja (kao polinom vremena)

Koristi se polinomski mehanizam hlađenja predložen u [109] koji ne može garantovati optimalno rešenje.

2.1) Početna temperatura T_0

Mora biti dovoljno visoka da se prihvati praktično svaki pomeraj tako što je stopa prihvatanja praktično 1. Neka se na određenoj temperaturi T izvrši m poremećaja. Neka m_1 označi broj pomeraja od stanja i u stanje j za koje je $f(i) \geq f(j)$, a m_2 kada je $f(i) < f(j)$. Neka je

$\Delta f^{-(+)}$ srednja razlika u ceni za m_2 poremećaja za koje funkcija cilja raste. Onda se stopa prihvatanja može aproksimirati sledećom formulom:

$$AR \approx \frac{m_1 + m_2 \cdot \exp(\Delta f^{-(+)}/T)}{m_1 + m_2} \quad (7.6.3)$$

odakle se dobija

$$T = \frac{\Delta f^{-(+)}}{\ln(m_2 AR - m_1(1 - AR)) - \ln(m_2)} \quad (7.6.4).$$

Temperatura T_0 se može sračunati na sledeći način: inicirati T iz (6a.3) sa nulom. Zatim generisati m poremećaja tako da se zna m_1 , m_2 , AR i $\Delta f^{-(+)}$ pri čemu je $m = m_1 + m_2$. Jednačine

7. Razvoj algoritama simuliranog kaljenja sa osvrtom na mehanizam poremećaja i mehanizam hlađenja

(7.6.3) i (7.6.4) treba rekurzivno ponavljati dok AR ne dostigne prethodno specificiranu vrednost. Krajnja temperatura T dobijena na ovaj način uzima se za početnu temperaturu T_0 .

2.2) Dekrement funkcija temperature T_{k+1}

Ako je dekrement temperature T_k veliki, potrebno je duže vreme za uspostavljanje kvaziekvilibrija na T_{k+1} . Zato treba pravilno proceniti brzo smanjenje temperature i dužinu Markov-ljevog lanca. Primenjena je sledeća formula:

$$T_{k+1} = \frac{T_k}{1 + \frac{T_k \ln(1 + \delta)}{3\sigma_{T_k}}} \quad (7.6.5)$$

u kojoj je σ standardna devijacija funkcija cilja generisanih na T_k , a δ je konstanta nazvana parametar odstojanja. Pri malim vrednostima δ dobijaju se mali dekrementi T_k .

2.3) Dužina Markov-ljevih lanaca:

Smatra se da je dovoljna dužina lanca preko 100 poremećaja.

2.4) Krajnja temperatura:

Algoritam terminira ako za neko k imamo

$$\frac{T_k}{\langle f \rangle_\infty} * \left. \frac{\partial \langle f \rangle_T}{\partial T} \right|_{T=T_k} < \varepsilon \quad (7.6.6)$$

gde je $\langle f \rangle_\infty \approx \langle f \rangle_{T_0}$ srednja cena na inicijalnoj temperaturi T_0 , $\langle f \rangle_{T_k}$ je srednja cena kod k -og Markov-ljevog lanca, $\partial \langle f \rangle_T / \partial T|_{T=T_k}$ je stopa promene srednje cene na T_k , a ε je pozitivan broj. Pod ε podrazumava se parametar zaustavljanja, a jednačina (7.6.6) je kriterijum terminiranja.

7.7. Ž.N. Popović, V.Đ. Kerleta i D.S. Popović

Primenjeni mehanizam poremećaja i mehanizam hlađenja, iz reference [110], dati su u tekstu koji sledi.

1) Mehanizam poremećaja

U dizajniranju struktura susednih tekućoj strukturi (susednih rešenja) dva kontradiktorna kriterijuma se moraju uzeti u obzir: istraživanje dopustivog prostora (diverzifikacija) i eksploatacija najboljeg pronađenog rešenja (intenzifikacija). U procesu intenzifikacije se obećavajući regioni dopustivog prostora, određeni na osnovu dobijenih „dobrih rešenja“, detaljno istražuju u nadi da će se pronaći bolje rešenje. U procesu diverzifikacije neistraženi regioni dopustivog prostora moraju biti razmatrani da bi se obezbedilo da svi regioni dopustivog prostora budu ravnomerno istraženi i da detaljne pretrage ne budu ograničene na redukovani broj regiona. Mehanizam intenzifikacije zasnovan je na tehnici izmene grana.

2) Mehanizam hlađenja

2.1) Početna temperatura T_{\max} :

$$T_{\max} = \frac{\mu * f(x^0)}{-\ln(\phi)}$$

gde je $\phi[\%]$ procenat susednih skupljih rešenja koja su $\mu[\%]$ lošija od početnog rešenja $f(x^0)$ prihvaćenog na početnoj temperaturi T_{\max} .

2.2) $T_{k+1} = \alpha(T_k)T_k$, $\alpha \in [0.5 - 0.99]$.

2.3) Broj iteracija koji će se izvršiti na svakoj temperaturi zavisi od dimenzije problema.

7. Razvoj algoritama simuliranog kaljenja sa osvrtom na mehanizam poremećaja i mehanizam hlađenja

2.4) Algoritam simuliranog kaljenja se zaustavlja kad temperatura dostigne najnižu definisanu vrednost (npr. $T_{\min} = 0.01 \text{ C}^\circ$) ili kada ni jedno novo rešenje nije prihvaćeno u toku diverzifikacionog koraka.

7.8. Diskusija

Nepovoljna strana algoritma simuliranog kaljenja je da su parametri mehanizma hlađenja u pogledu podešavanja vrlo komplikovani i nedovoljno proučeni [84]. Ne postoji izbor parametara simuliranog kaljenja koji bi bio dobar za sve probleme tako da nema generalnog puta za iznalaženje najboljeg izbora za konkretan problem.

7.9. Mehanizmi primenjeni u ovoj doktorskoj disertaciji

U ovoj doktorskoj disertaciji primenjen je mehanizam hlađenja opisan u Poglavlju 6.4.2 a mehanizam poremećaja je opisan u tekstu koji sledi.

Upotrebljen je krajnje prost mehanizam poremećaja koji koristi generator slučajnih brojeva. On stalno generiše onoliko različitih brojeva koliko ima otvorenih grana (iz opsega koji odgovara ukupnom broju grana koji uključuje sve grane mreže, kako otvorene tako i zatvorene). Ako je mreža konektovana, ovo je dovoljan uslov za ispunjenje i uslova radikalnosti [91]. Na ovaj način, ispunjen je princip diverzifikacije, ravnomerno se pretražuju sve regije prostora konfiguracija (populacije). Princip intenzifikacije zadovoljen je Metropolis kriterijumom koji sa snižavanjem temperature prednost daje konfiguracijama sa manjom funkcijom cilja. Glavni doprinos ove disertacije je upravo implementiranje ovako prostog mehanizma poremećaja u algoritam simuliranog kaljenja primenjenog na problem rekonfiguracije distributivne mreže.

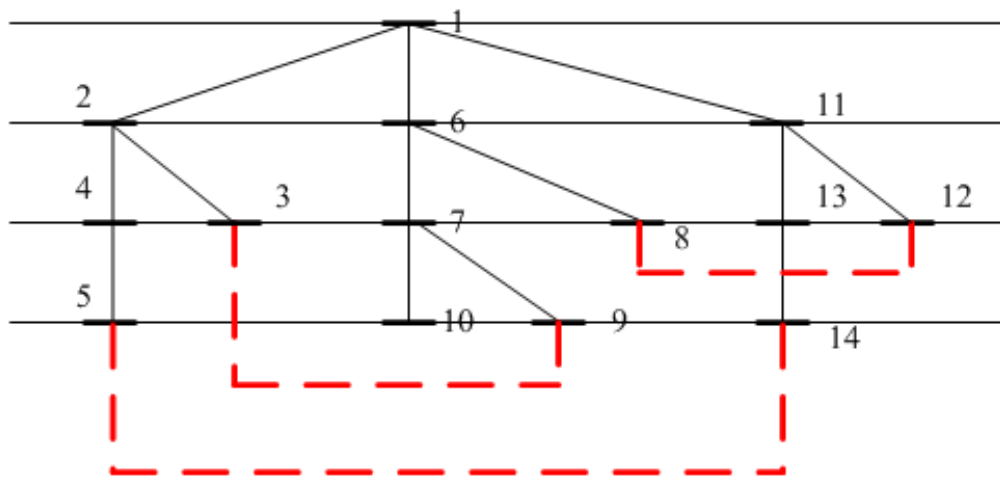
8. NUMERIČKI REZULTATI

U ovom poglavlju prikazani su rezultati simulacije primenjenih programa na test sisteme. Dozvoljene vrednosti za struje grana mreže, nisu proveravane u nedostatku podataka. Za dozvoljeno odstupanje napona čvorova mreže uzeta je vrednost $\pm 10\%$, u odnosu na vrednost napona balansnog čvora. Pretpostavljeno je da se svaka grana može otvoriti ili zatvoriti pomoću komutacione opreme. Predložena metoda je primenjena i obrađena na računaru (Pentium IV PC; Intel core i7-4770, 3,4 GHz; 32 GB RAM), nehomogenim algoritmom, pomoću preciznog algoritma tokova snaga MATPOWER okruženja (Newton-ova metoda, konvergencija za najviše 10 iteracija) uputstvo [90], u MATLAB 2010a programskom jeziku.

Na kraju ovog poglavlja je obrađen i problem višekriterijumske optimizacije.

8.1. Najprostija mreža Civanlar i Grainger

Na Slici 8.1. prikazana je najprostija analizirana mreža iz reference [7].



Slika 8.1. Najprostija mreža Civanlar i Grainger

Usvojeni su sledeći ulazni podaci:

1. stopa prihvatanja, manja od 0.001,
2. broj iteracija 3000 i
3. pravilo snižavanja temperature $T=0.95 \cdot T$.

Tabele 8.1.1. i 8.1.2. predstavljaju ulazne podatke i rezultate tačnog algoritma tokova snaga za polaznu i optimalnu konfiguraciju (nule u kolonama A, MW i MVar označavaju koje su grane otvorene).

Osenčene brojke u koloni $|V|$ p.u. označavaju najniži napon čvora.

Tabela 8.1.1. Ulazni podaci i rezultati MATPOWER tokova snaga ($P_{loss}=514.43$ kW) za polaznu konfiguraciju 5-14, 3-9 i 8-12 grane otvorene (Slika 8.1., nule u A koloni), bazna snaga 100 MVA, $U_n=12.66$ kV

vod broj	grana	R (r.j.)	X (r.j.)	aktivna potrošnja čvora (MW)	reaktivna potrošnja čvora (MVar)	$ V $ (r.j.)	modul struje grane (A)	grana aktivni gubici snage Ploss (MW)	grana reaktivni gubici snage Qloss (MVar)
1	0-1	0.0750	0.1000	2.0000	1.6000	0.991		0.062	0.08
2	1-2	0.0800	0.1100	3.0000	0.4000	0.988		0.008	0.01
3	1-3	0.0900	0.1800	2.0000	-0.4000	0.986		0.012	0.02
4	3-4	0.0400	0.0400	1.5000	1.2000	0.985		0.002	0.00

8. Numerički rezultati

5	0-5	0.1100	0.1100	4.0000	2.7000	0.979		0.278	0.28
6	5-6	0.0800	0.1100	5.0000	1.8000	0.971		0.087	0.12
7	5-7	0.1100	0.1100	1.0000	0.9000	0.977		0.002	0.00
8	6-8	0.1100	0.1100	0.6000	-0.5000	0.971		0.001	0.00
9	6-9	0.0800	0.1100	4.5000	-1.7000	0.969		0.020	0.03
10	0-10	0.1100	0.1100	1.0000	0.9000	0.994		0.029	0.03
11	10-11	0.0900	0.1200	1.0000	-1.1000	0.995		0.002	0.00
12	10-12	0.1100	0.1100	1.0000	0.9000	0.991		0.011	0.01
13	12-13	0.0400	0.0400	2.1000	-0.8000	0.990		0.002	0.00
14	2-8	0.0400	0.0400				0	0.000	0.00
15	7-11	0.0400	0.0400				0	0.000	0.00
16	4-13	0.1200	0.1200				0	0.000	0.00

Tabela 8.1.2. Ulazni podaci i rezultati MATPOWER tokova snaga ($P_{loss}=469.14$ kW) za globalni optimum 5-14, 7-9 i 6-8 grane otvorene (nule u A koloni), bazna snaga 100 MVA, $U_n=12.66$ kV

vod broj	grana	R (r.j.)	X (r.j.)	aktivna potrošnja čvora (MW)	reaktivna potrošnja čvora (MVar)	V (r.j.)	modul struje grane (A)	grana aktivni gubici snage P_{loss} (MW)	grana reaktivni gubici snage Q_{loss} (MVar)
1	0-1	0.0750	0.1000	2.0000	1.6000	0.991		0.068	0.09
2	1-2	0.0800	0.1100	3.0000	0.4000	0.988		0.011	0.01
3	1-3	0.0900	0.1800	2.0000	-0.4000	0.986		0.012	0.02
4	3-4	0.0400	0.0400	1.5000	1.2000	0.985		0.002	0.00
5	0-5	0.1100	0.1100	4.0000	2.7000	0.981		0.221	0.22
6	5-6	0.0800	0.1100	5.0000	1.8000	0.973		0.077	0.11
7	5-7	0.1100	0.1100	1.0000	0.9000	0.990	0	0.000	0.00
8	6-8	0.1100	0.1100	0.6000	-0.5000	0.988	0	0.000	0.00
9	6-9	0.0800	0.1100	4.5000	-1.7000	0.972		0.020	0.03
10	0-10	0.1100	0.1100	1.0000	0.9000	0.992		0.043	0.04
11	10-11	0.0900	0.1200	1.0000	-1.1000	0.991		0.004	0.00
12	10-12	0.1100	0.1100	1.0000	0.9000	0.989		0.011	0.01
13	12-13	0.0400	0.0400	2.1000	-0.8000	0.988		0.002	0.00
14	2-8	0.0400	0.0400					0.000	0.00
15	7-11	0.0400	0.0400					0.001	0.00
16	4-13	0.1200	0.1200				0	0.000	0.00

Diskusija:

- Za vreme računanja od nekoliko sekundi pronađen je globalni optimum.
- Najniži napon je pre rekonfiguracije izneo 0.969 r.j., da bi nakon rekonfiguracije porastao na 0.972 r.j.
- Zasenčeni gubici aktivne snage grana (Tabela 8.1.2.) su veći nego u polaznoj konfiguraciji.

8.2. Test mreža Baran-a i Wu-a

Primenjen je algoritam na test mrežu [6] Slika 3.1. Broj mogućih kombinacija je $\binom{37}{5}$.

Ukupna aktivna i reaktivna potrošnja mreže iznose 3715 kW i 2300 kVAr. Gubici aktivne snage su 202.675 kW što je 5,5% aktivne potrošnje.

Najniži napon polazne konfiguracije iznosi 0.9131 r.j.

Usvojeni su sledeći parametri:

1. stopa prihvatanja, manja od 0.001,
2. broj iteracija 20000 i
3. pravilo snižavanja temperature $T=0.95 \cdot T$.

Za CPU vreme (vreme računanja) od 3 minuta dostignut je ciljani optimum, globalni optimum (Slika 8.2.5.) koji je poznat jer je naveden u referencama [26,112].

8. Numerički rezultati

Tabele 8.2.1. i 8.2.2. predstavljaju ulazne podatke i rezultate tačnog algoritma tokova snaga za polaznu i optimalnu konfiguraciju (nule u kolonama A, kW i kVAr označavaju koje su grane otvorene).

Osenčene brojke u koloni modul struje grane označavaju struje grana koje su veće u odnosu na polaznu konfiguraciju.

Tabela 8.2.1. Ulazni podaci i rezultati preciznog programa tokova snaga ($P_{\text{loss}}=202.6$ kW) za početnu konfiguraciju 33, 34, 35, 36 i 37 otvorene grane (nule u A, kW i kVAr kolonama)

grana	R (Ω)	X (Ω)	aktivna potrošnja čvora (kW)	reaktivna potrošnja čvora (kVAr)	V r.j.	modul struje grane (A)	grana aktivni gubici snage Ploss (kW)	grana reaktivni gubici snage Qloss (kVAr)
0-1	0.0922	0.0470	100.00	60.00	0.9970	364.3	12.2	6.2
1-2	0.4930	0.2511	90.00	40.00	0.9829	324.1	51.7	26.3
2-3	0.3660	0.1864	120.00	80.00	0.9755	233.1	19.9	10.1
3-4	0.3811	0.1941	60.00	30.00	0.9681	221.5	18.6	9.5
4-5	0.8190	0.7070	60.00	20.00	0.9497	216.1	38.2	33.0
5-6	0.1872	0.6188	200.00	100.00	0.9462	101.1	1.9	6.3
6-7	0.7114	0.2351	200.00	100.00	0.9413	82.4	4.8	1.5
7-8	1.0300	0.7400	60.00	20.00	0.9351	63.7	4.1	3.0
8-9	1.0440	0.7400	60.00	20.00	0.9292	58.4	3.5	2.5
9-10	0.1966	0.0650	45.00	30.00	0.9284	53.0	0.5	0.1
10-11	0.3744	0.1238	60.00	35.00	0.9269	48.5	0.8	0.2
11-12	1.4680	1.1550	60.00	35.00	0.9208	42.6	2.6	2.0
12-13	0.5416	0.7129	120.00	80.00	0.9185	36.6	0.7	0.9
13-14	0.5910	0.5260	60.00	10.00	0.9171	24.5	0.3	0.3
14-15	0.7463	0.5450	60.00	20.00	0.9157	19.4	0.2	0.2
15-16	1.2890	1.7210	60.00	20.00	0.9137	13.9	0.2	0.3
16-17	0.7320	0.5740	90.00	40.00	0.9131	8.5	0.05	0.04
1-18	0.1640	0.1565	90.00	40.00	0.9965	31.3	0.1	0.1
18-19	1.5042	1.3554	90.00	40.00	0.9929	23.5	0.8	0.7
19-20	0.4095	0.4784	90.00	40.00	0.9922	15.6	0.1	0.1
20-21	0.7089	0.9373	90.00	40.00	0.9916	7.8	0.04	0.05
2-22	0.4512	0.3083	90.00	50.00	0.9794	83.9	3.1	2.1
22-23	0.8980	0.7091	420.00	200.00	0.9727	75.6	5.1	4.0
23-24	0.8960	0.7011	420.00	200.00	0.9694	37.9	1.2	1.0
5-25	0.2030	0.1034	60.00	25.00	0.9477	113.1	2.6	1.3
25-26	0.2842	0.1447	60.00	25.00	0.9452	108.2	3.3	1.6
26-27	1.0590	0.9337	60.00	20.00	0.9337	103.3	11.3	9.9
27-28	0.8042	0.7006	120.00	70.00	0.9255	98.6	7.8	6.8
28-29	0.5075	0.2585	200.00	600.00	0.9220	87.6	3.8	1.9
29-30	0.9744	0.9630	150.00	70.00	0.9178	40.4	1.5	1.5
30-31	0.3105	0.3619	210.00	100.00	0.9169	26.2	0.2	0.2
31-32	0.3410	0.5302	60.00	40.00	0.9166	6.2	0.01	0.02
7-20, 33	2.000	2.000				0	0	0
8-14, 34	2.000	2.000				0	0	0
11-21, 35	2.000	2.000				0	0	0
17-32, 36	0.500	0.500				0	0	0
24-28, 37	0.500	0.500				0	0	0

Tabela 8.2.2. Ulazni podaci i rezultati preciznog programa tokova snaga ($P_{loss}=139.5$ kW) za ciljnu optimum konfiguraciju 7, 9, 14, 32 i 37 otvorene grane (nule u A, kW i kVAr kolonama)

grana	R (Ω)	X (Ω)	aktivna potrošnja čvora (kW)	reaktivna potrošnja čvora (kVAr)	V r.j.	modul struje grane (A)	grana aktivni gubici snage Ploss (kW)	grana reaktivni gubici snage 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

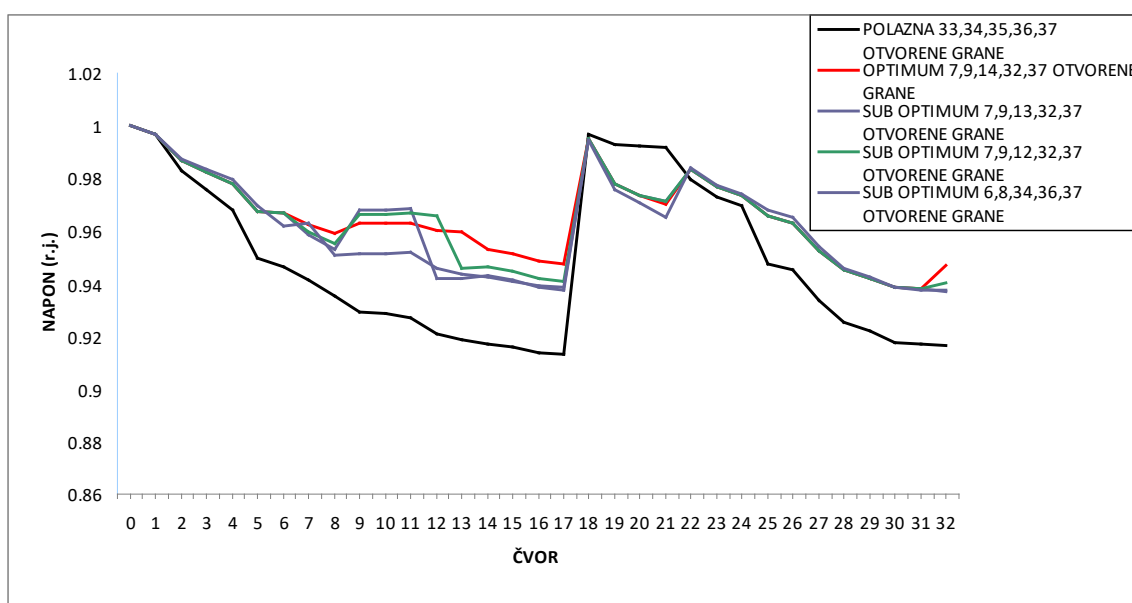
Ovaj primer mreže je takođe rešavan homogenom metodom simuliranog kaljenja, modifikovanim algoritmom tokova snaga koji je približan i fleksibilan. On ne daje tačne gubitke ali zadržava sekvencu tačnih vrednosti gubitaka, naime manji gubici u tačnom algoritmu [9, 102] će ostati manji i kod modifikovanog algoritma. Ova najvažnija karakteristika modifikovanog algoritma je ilustrovana u Tabeli 8.2.3. Neznatno odstupanje predstavlja podoptimum dobijen nehomogenim algoritmom.

8. Numerički rezultati

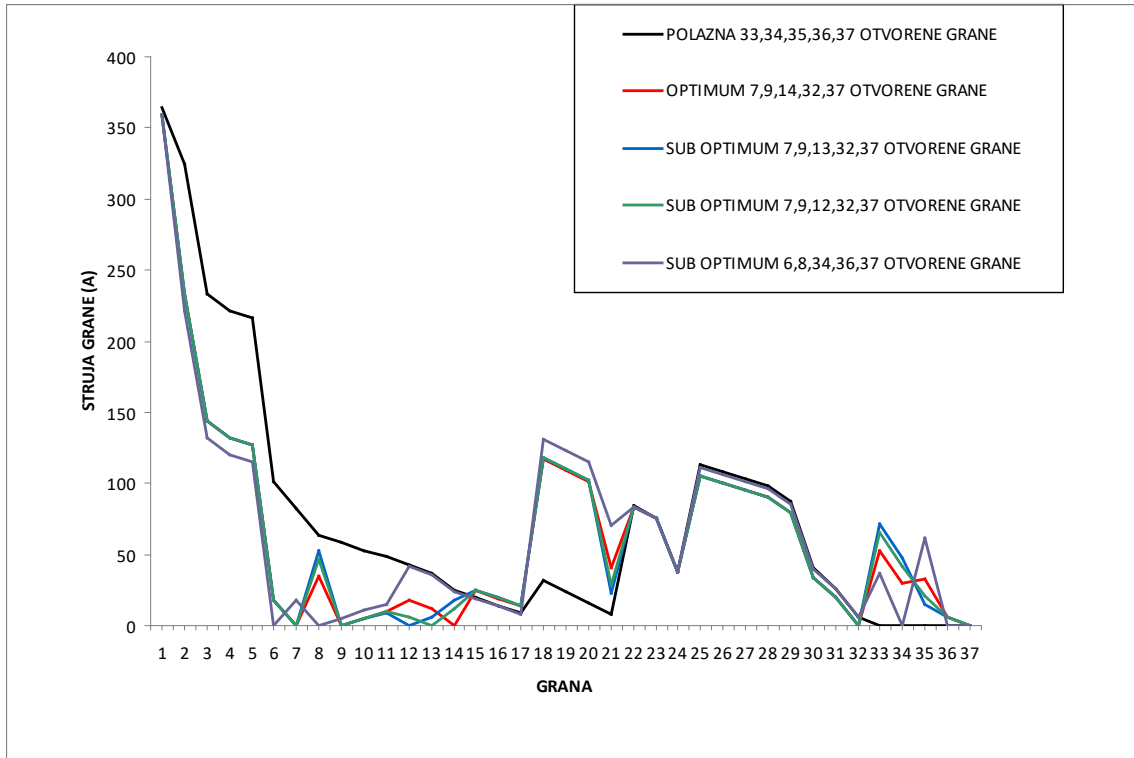
Tabela 8.2.3. Ilustracija primenljivosti modifikovanog algoritma tokova snaga prikazana na primeru mreže Baran-a i Wu-a

konfiguracija	početna 33 34 35 36 37 otvorene	Baran i Wu optimum [6] 6 11 28 31 34 otvorene	pod- optimum 6 8 34 36 37 otvorene	pod- optimum 7 9 12 32 37 otvorene	nehomogeni algoritam pod- optimum 11 28 33 34 36 otvorene	pod- optimum 7 9 13 32 37 otvorene	ciljni optimum 7 9 14 32 37 otvorene
modifikovani (kW)	153.4	141.2885	120.47	120.46	119.14	116	114.5
Shirmoham- madi, Stojanović [9, 102] (kW)	202.6	159.841	147.025	146.016	146.04	143	139.5

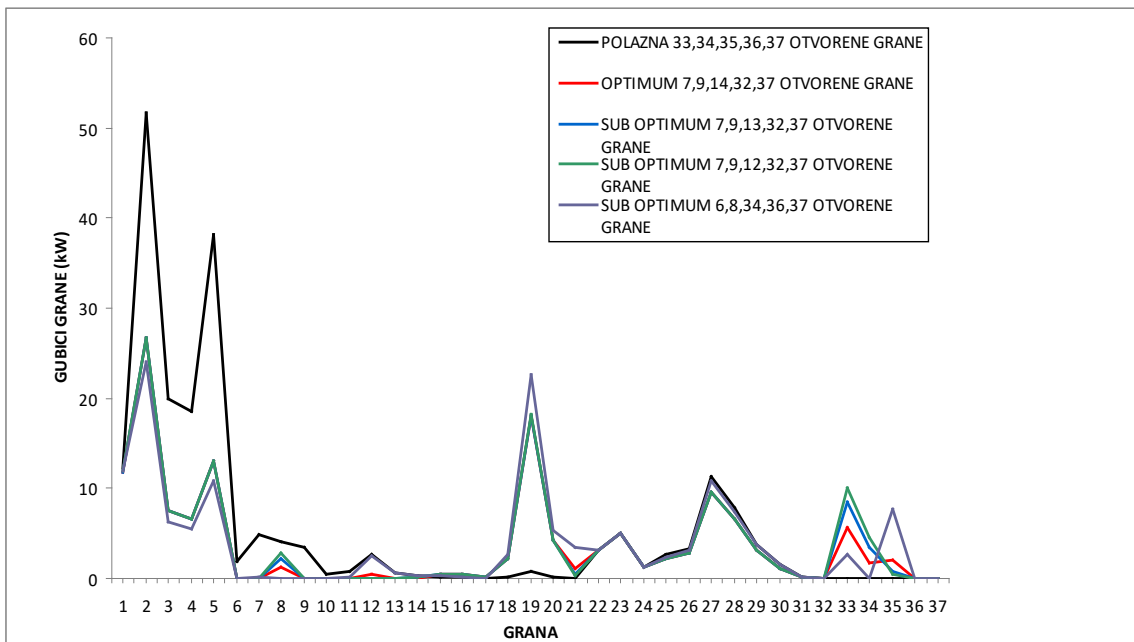
Tabelarni rezultati su predstavljeni i graficima na Slici 8.2.1. (naponi čvorova), 8.2.2. (struje grana), 8.2.3. (aktivni gubici grana) i 8.2.4. (reaktivni gubici grana) za polaznu, optimalnu konfiguraciju i suboptimalne konfiguracije (homogeni algoritam) dobijene modifikovanim algoritmom.



Slika 8.2.1. Naponski profil mreže za početnu, optimalnu i suboptimalne konfiguracije (neke krive se poklapaju)

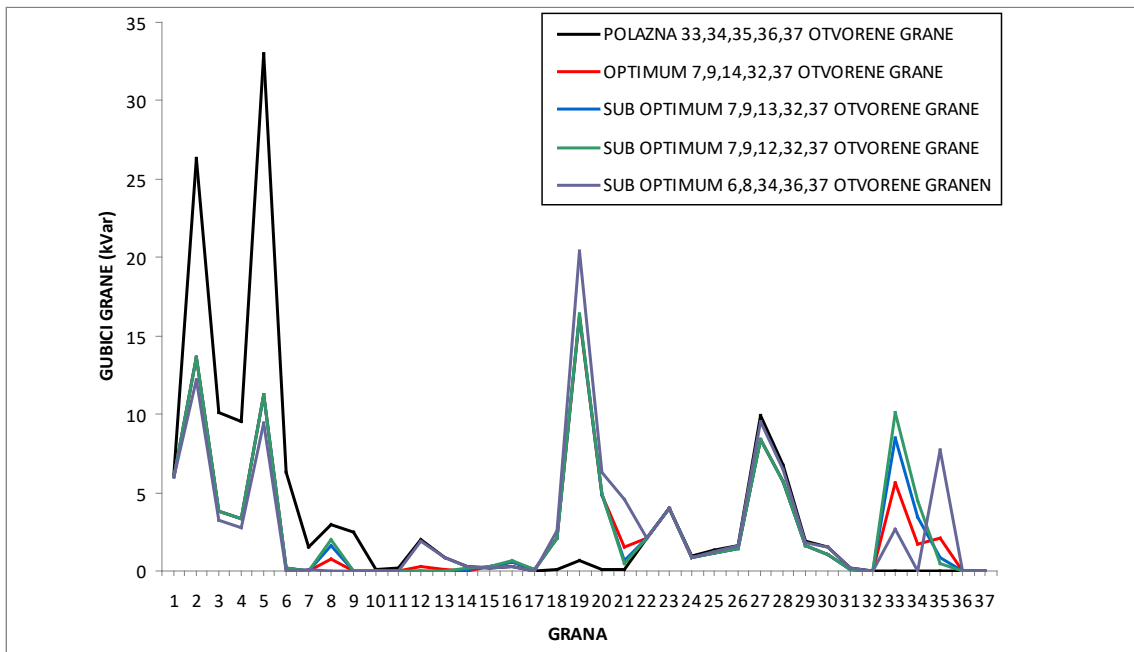


Slika 8.2.2. Struje mreže za početnu, optimalnu i suboptimalne konfiguracije (neke krive se poklapaju)



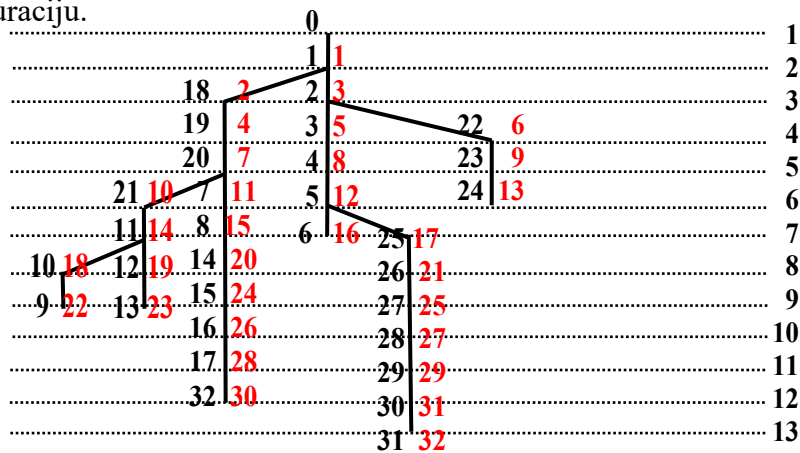
Slika 8.2.3. Aktivni gubici mreže za početnu, optimalnu i suboptimalne konfiguracije (neke krive se poklapaju)

8. Numerički rezultati

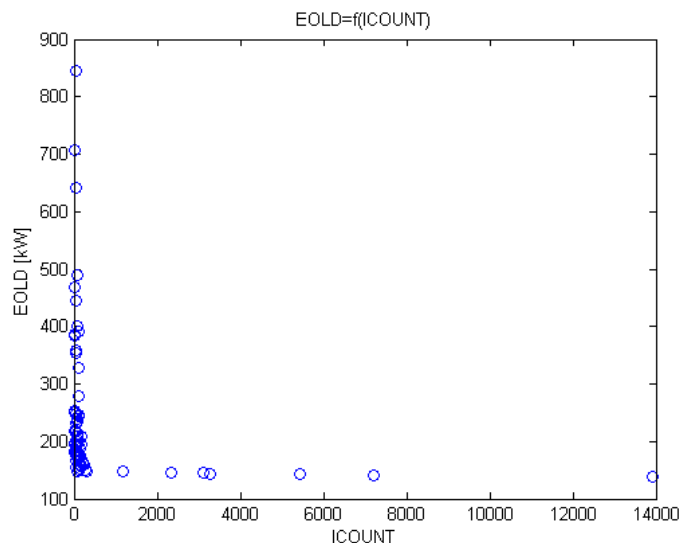


Slika 8.2.4. Reaktivni gubici mreže za početnu, optimalnu i suboptimalne konfiguracije (neke krive se poklapaju)

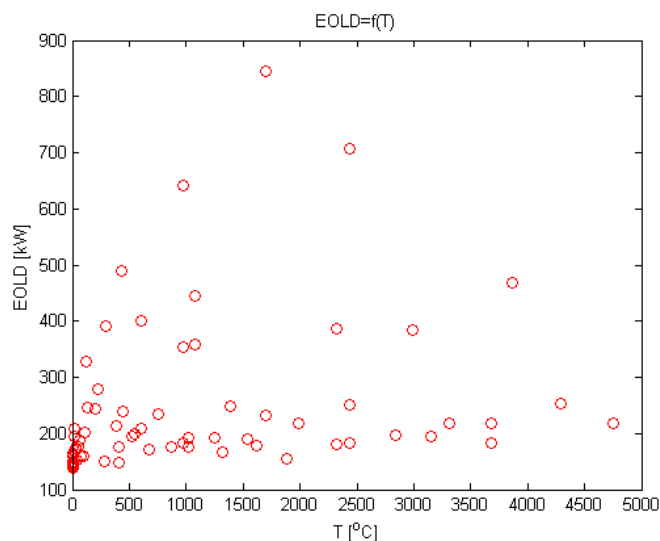
Na Slikama 8.2.6. i 8.2.7. dati su dijagrami konvergencije za programom dobijenu optimalnu konfiguraciju.



Slika 8.2.5. Globalni optimum



Slika 8.2.6. Graf konvergencije (zavisnost prihvaćenih rešenja od broja iteracija kojih ima 20000)



Slika 8.2.7. Graf konvergenције (zavisnost prihvaćenih rešenja od temperature, početna 5000 °C)

Analizirana mreža je uzeta iz članka Baran i Wu [6]. Njihovo rešenje daje konfiguraciju sa sledećim otvorenim granama 6, 11, 28, 31 i 34. Tačan iznos gubitaka ove konfiguracije iznosi 159.841 kW i veći je od gubitaka globalnog optimuma.

Goswami i Basu [15] za rešenje dobijaju ciljnu optimalnu konfiguraciju (7, 9, 14, 32 i 37 grane otvorene).

Thomas McDermoth [5] iznalazi svojim algoritmom takođe ciljni optimum.

Abul Wafa [28] dobija za rešenje neizvodljivu konfiguraciju (s obzirom na numeraciju grana dobija se nepovezana konfiguracija).

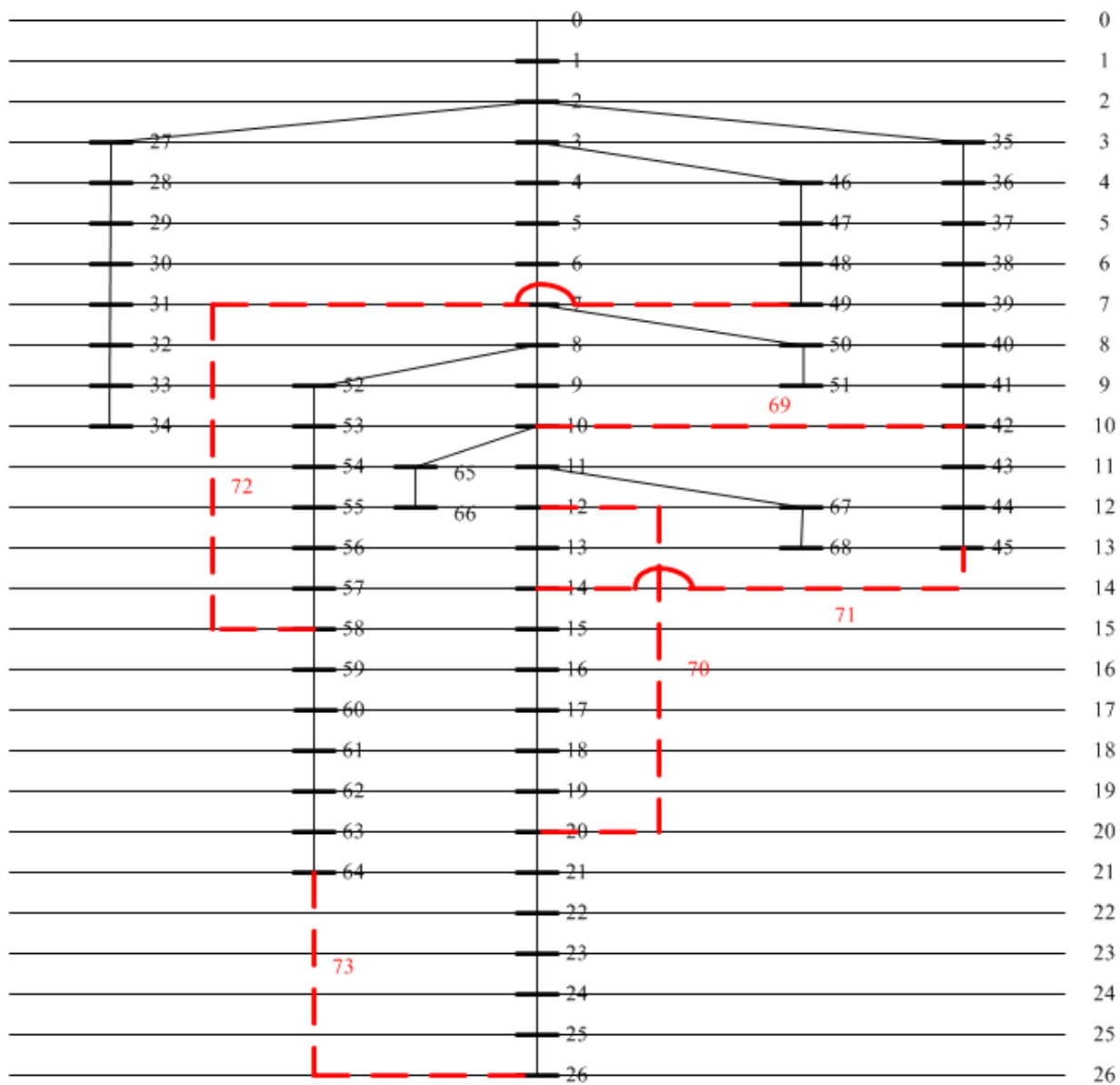
Niko od pomenutih autora ne prilaže svoj program na proveru.

Autori ne navode CPU vreme izvršenja njihovih programa.

Kada se ima na umu da je rekonfiguracija opravdana na sezonskom nivou sa malim mesečnim korekcijama metoda prikazana u ovom radu je u potpunosti prihvatljiva.

8.3. Složenija mreža Jiang

Na Slici 8.3.1. prikazana je složenija analizirana mreža iz reference [101].



Slika 8.3.1. Složenija mreža Jiang

Usvojeni su sledeći parametri:

1. stopa prihvatanja, manja od 0.001,
2. broj iteracija 100000 i
3. pravilo snižavanja temperature $T=0.99 \cdot T$.

Tabele 8.3.1. i 8.3.2. predstavljaju ulazne podatke i rezultate tačnog algoritma tokova snaga za polaznu i optimalnu konfiguraciju (nule u kolonama A, MW i MVAR označavaju koje su grane otvorene).

8. Numerički rezultati

Tabela 8.3.1. Ulazni podaci i rezultati MATPOWER tokova snaga (Ploss=225 kW) za polaznu konfiguraciju 69, 70, 71, 72 i 73 grane otvorene (Slika 8.3.1., nule u A koloni), bazna snaga 100 MVA, Un=12.66 kV

vod broj	grana	R (r.j.)	X (r.j.)	aktivna potrošnja čvora (MW)	reaktivna potrošnja čvora (MVar)	V (r.j.)	modul struje grane (A)	grana aktivni gubici snage Ploss (MW)	grana reaktivni gubici snage Qloss (MVar)
1	0-1	0.0003	0.0007	0.0000	0.0000	1.000		0.000	0.00
2	1-2	0.0003	0.0007	0.0000	0.0000	1.000		0.000	0.00
3	2-3	0.0009	0.0022	0.0000	0.0000	1.000		0.000	0.00
4	3-4	0.0157	0.0183	0.0000	0.0000	0.999		0.002	0.00
5	4-5	0.2284	0.1163	0.0026	0.0022	0.990		0.028	0.01
6	5-6	0.2378	0.1211	0.0404	0.0300	0.981		0.029	0.01
7	6-7	0.0575	0.0293	0.0750	0.0540	0.979		0.007	0.00
8	7-8	0.0308	0.0157	0.0300	0.0220	0.977		0.003	0.00
9	8-9	0.5110	0.1689	0.0280	0.0190	0.972		0.005	0.00
10	9-10	0.1168	0.0386	0.1450	0.1040	0.971		0.001	0.00
11	10-11	0.4439	0.1467	0.1450	0.1040	0.968		0.002	0.00
12	11-12	0.6426	0.2121	0.0080	0.0055	0.965		0.001	0.00
13	12-13	0.6514	0.2153	0.0080	0.0055	0.962		0.001	0.00
14	13-14	0.6601	0.2181	0.0000	0.0000	0.959		0.001	0.00
15	14-15	0.1227	0.0406	0.0455	0.0300	0.959		0.000	0.00
16	15-16	0.2336	0.0772	0.0600	0.0350	0.958		0.000	0.00
17	16-17	0.0029	0.0009	0.0600	0.0350	0.958		0.000	0.00
18	17-18	0.2044	0.0676	0.0000	0.0000	0.958		0.000	0.00
19	18-19	0.1314	0.0434	0.0010	0.0006	0.957		0.000	0.00
20	19-20	0.2131	0.0704	0.1140	0.0810	0.957		0.000	0.00
21	20-21	0.0087	0.0029	0.0053	0.0035	0.957		0.000	0.00
22	21-22	0.0993	0.0328	0.0000	0.0000	0.957		0.000	0.00
23	22-23	0.2161	0.0714	0.0280	0.0200	0.957		0.000	0.00
24	23-24	0.4672	0.1544	0.0000	0.0000	0.956		0.000	0.00
25	24-25	0.1927	0.0637	0.0140	0.0100	0.956		0.000	0.00
26	25-26	0.1081	0.0357	0.0140	0.0100	0.956		0.000	0.00
27	2-27	0.0027	0.0067	0.0260	0.0186	1.000		0.000	0.00
28	27-28	0.0399	0.0976	0.0260	0.0186	1.000		0.000	0.00
29	28-29	0.2482	0.0820	0.0000	0.0000	1.000		0.000	0.00
30	29-30	0.0438	0.0145	0.0000	0.0000	1.000		0.000	0.00
31	30-31	0.2190	0.0724	0.0000	0.0000	1.000		0.000	0.00
32	31-32	0.5235	0.1757	0.0140	0.0100	0.999		0.000	0.00
33	32-33	1.0657	0.3523	0.0195	0.0140	0.999		0.000	0.00
34	33-34	0.9197	0.3040	0.0060	0.0040	0.999		0.000	0.00
35	2-35	0.0027	0.0067	0.0260	0.0185	1.000		0.000	0.00
36	35-36	0.0399	0.0976	0.0260	0.0185	1.000		0.000	0.00
37	36-37	0.0657	0.0767	0.0000	0.0000	1.000		0.000	0.00
38	37-38	0.0190	0.0221	0.0240	0.0170	1.000		0.000	0.00
39	38-39	0.0011	0.0013	0.0240	0.0170	1.000		0.000	0.00
40	39-40	0.4544	0.5309	0.0012	0.0010	0.999		0.000	0.00
41	40-41	0.1934	0.2260	0.0000	0.0000	0.999		0.000	0.00
42	41-42	0.0256	0.0298	0.0060	0.0043	0.999		0.000	0.00
43	42-43	0.0057	0.0072	0.0000	0.0000	0.999		0.000	0.00
44	43-44	0.0679	0.0857	0.0392	0.0263	0.998		0.000	0.00
45	44-45	0.0005	0.0007	0.0392	0.0263	0.998		0.000	0.00
46	3-46	0.0021	0.0052	0.0000	0.0000	1.000		0.000	0.00
47	46-47	0.0531	0.1300	0.0790	0.0564	0.999		0.001	0.00
48	47-48	0.1808	0.4424	0.3847	0.2745	0.995		0.002	0.00
49	48-49	0.0513	0.1255	0.3847	0.2745	0.994		0.000	0.00

8. Numerički rezultati

50	7-50	0.0579	0.0295	0.0405	0.0283	0.979		0.000	0.00
51	50-51	0.2071	0.0695	0.0036	0.0027	0.979		0.000	0.00
52	8-52	0.1086	0.0553	0.0043	0.0035	0.975		0.006	0.00
53	52-53	0.1267	0.0645	0.0264	0.0190	0.971		0.007	0.00
54	53-54	0.1773	0.0903	0.0240	0.0172	0.967		0.009	0.00
55	54-55	0.1755	0.0894	0.0000	0.0000	0.963		0.009	0.00
56	55-56	0.9920	0.3330	0.0000	0.0000	0.940		0.050	0.02
57	56-57	0.4890	0.1641	0.0000	0.0000	0.929		0.024	0.01
58	57-58	0.1898	0.0628	0.1000	0.0720	0.925		0.010	0.00
59	58-59	0.2409	0.0731	0.0000	0.0000	0.920		0.011	0.00
60	59-60	0.3166	0.1613	1.2440	0.8880	0.912		0.014	0.01
61	60-61	0.0608	0.0309	0.0320	0.0230	0.912		0.000	0.00
62	61-62	0.0905	0.0460	0.0000	0.0000	0.912		0.000	0.00
63	62-63	0.4433	0.2258	0.2270	0.1620	0.910		0.001	0.00
64	63-64	0.6495	0.3308	0.0590	0.0420	0.909		0.000	0.00
65	10-65	0.1255	0.0381	0.0180	0.0130	0.971		0.000	0.00
66	65-66	0.0029	0.0008	0.0180	0.0130	0.971		0.000	0.00
67	11-67	0.4613	0.1525	0.0280	0.0200	0.968		0.000	0.00
68	67-68	0.0029	0.0009	0.0280	0.0200	0.968		0.000	0.00
69	10-42	0.3120	0.3120				0	0.000	0.00
70	12-20	0.3120	0.3120				0	0.000	0.00
71	14-45	0.6239	0.6239				0	0.000	0.00
72	49-58	1.2479	1.2479				0	0.000	0.00
73	26-64	0.6239	0.6239				0	0.000	0.00

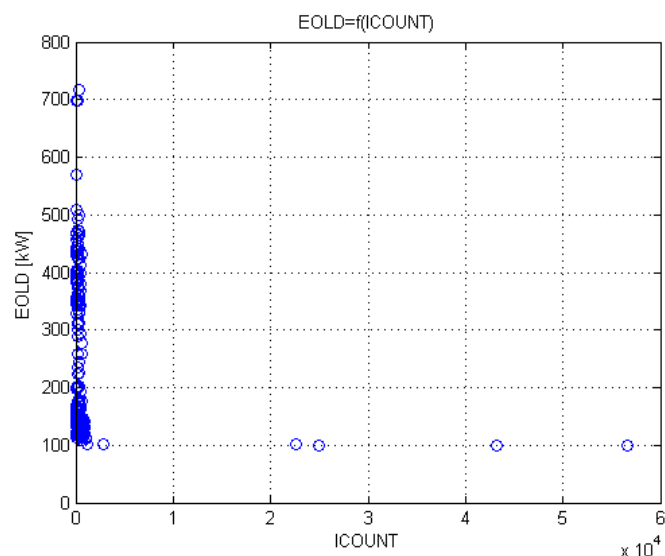
Tabela 8.3.2. Ulazni podaci i rezultati MATPOWER tokova snaga ($P_{loss}=99.6052$ kW) za optimalnu konfiguraciju 70, 69, 61, 57 i 14 grane otvorene (nule u A koloni), bazna snaga 100 MVA, $U_n=12.66$ kV

vod broj	grana	R (r.j.)	X (r.j.)	aktivna potrošnja čvora (MW)	reaktivna potrošnja čvora (MVar)	V (r.j.)	modul struje grane (A)	grana aktivni gubici snage P_{loss} (MW)	grana reaktivni gubici snage Q_{loss} (MVar)
1	0-1	0.0003	0.0007	0.0000	0.0000	1.000		0.000	0.00
2	1-2	0.0003	0.0007	0.0000	0.0000	1.000		0.000	0.00
3	2-3	0.0009	0.0022	0.0000	0.0000	1.000		0.000	0.00
4	3-4	0.0157	0.0183	0.0000	0.0000	1.000		0.000	0.00
5	4-5	0.2284	0.1163	0.0026	0.0022	0.998		0.002	0.00
6	5-6	0.2378	0.1211	0.0404	0.0300	0.995		0.002	0.00
7	6-7	0.0575	0.0293	0.0750	0.0540	0.995		0.000	0.00
8	7-8	0.0308	0.0157	0.0300	0.0220	0.995		0.000	0.00
9	8-9	0.5110	0.1689	0.0280	0.0190	0.992		0.001	0.00
10	9-10	0.1168	0.0386	0.1450	0.1040	0.991		0.000	0.00
11	10-11	0.4439	0.1467	0.1450	0.1040	0.990		0.000	0.00
12	11-12	0.6426	0.2121	0.0080	0.0055	0.990		0.000	0.00
13	12-13	0.6514	0.2153	0.0080	0.0055	0.990		0.000	0.00
14	13-14	0.6601	0.2181	0.0000	0.0000	0.980	0	0	0
15	14-15	0.1227	0.0406	0.0455	0.0300	0.979		0.001	0.00
16	15-16	0.2336	0.0772	0.0600	0.0350	0.977		0.001	0.00
17	16-17	0.0029	0.0009	0.0600	0.0350	0.977		0.000	0.00
18	17-18	0.2044	0.0676	0.0000	0.0000	0.976		0.001	0.00
19	18-19	0.1314	0.0434	0.0010	0.0006	0.975		0.001	0.00
20	19-20	0.2131	0.0704	0.1140	0.0810	0.974		0.001	0.00
21	20-21	0.0087	0.0029	0.0053	0.0035	0.974		0.000	0.00
22	21-22	0.0993	0.0328	0.0000	0.0000	0.973		0.000	0.00
23	22-23	0.2161	0.0714	0.0280	0.0200	0.972		0.000	0.00

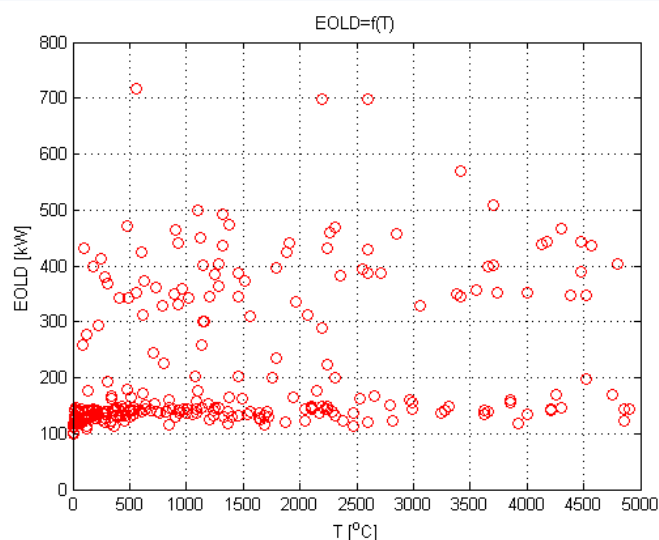
8. Numerički rezultati

24	23-24	0.4672	0.1544	0.0000	0.0000	0.970		0.001	0.00
25	24-25	0.1927	0.0637	0.0140	0.0100	0.969		0.000	0.00
26	25-26	0.1081	0.0357	0.0140	0.0100	0.969		0.000	0.00
27	2-27	0.0027	0.0067	0.0260	0.0186	1.000		0.000	0.00
28	27-28	0.0399	0.0976	0.0260	0.0186	1.000		0.000	0.00
29	28-29	0.2482	0.0820	0.0000	0.0000	1.000		0.000	0.00
30	29-30	0.0438	0.0145	0.0000	0.0000	1.000		0.000	0.00
31	30-31	0.2190	0.0724	0.0000	0.0000	1.000		0.000	0.00
32	31-32	0.5235	0.1757	0.0140	0.0100	0.999		0.000	0.00
33	32-33	1.0657	0.3523	0.0195	0.0140	0.999		0.000	0.00
34	33-34	0.9197	0.3040	0.0060	0.0040	0.999		0.000	0.00
35	2-35	0.0027	0.0067	0.0260	0.0185	1.000		0.000	0.00
36	35-36	0.0399	0.0976	0.0260	0.0185	0.999		0.000	0.00
37	36-37	0.0657	0.0767	0.0000	0.0000	0.998		0.001	0.00
38	37-38	0.0190	0.0221	0.0240	0.0170	0.998		0.000	0.00
39	38-39	0.0011	0.0013	0.0240	0.0170	0.998		0.000	0.00
40	39-40	0.4544	0.5309	0.0012	0.0010	0.991		0.004	0.00
41	40-41	0.1934	0.2260	0.0000	0.0000	0.989		0.002	0.00
42	41-42	0.0256	0.0298	0.0060	0.0043	0.988		0.000	0.00
43	42-43	0.0057	0.0072	0.0000	0.0000	0.988		0.000	0.00
44	43-44	0.0679	0.0857	0.0392	0.0263	0.987		0.001	0.00
45	44-45	0.0005	0.0007	0.0392	0.0263	0.987		0.000	0.00
46	3-46	0.0021	0.0052	0.0000	0.0000	1.000		0.000	0.00
47	46-47	0.0531	0.1300	0.0790	0.0564	0.996		0.004	0.01
48	47-48	0.1808	0.4424	0.3847	0.2745	0.985		0.013	0.03
49	48-49	0.0513	0.1255	0.3847	0.2745	0.983		0.003	0.01
50	7-50	0.0579	0.0295	0.0405	0.0283	0.995		0.000	0.00
51	50-51	0.2071	0.0695	0.0036	0.0027	0.995		0.000	0.00
52	8-52	0.1086	0.0553	0.0043	0.0035	0.995		0.000	0.00
53	52-53	0.1267	0.0645	0.0264	0.0190	0.994		0.000	0.00
54	53-54	0.1773	0.0903	0.0240	0.0172	0.994		0.000	0.00
55	54-55	0.1755	0.0894	0.0000	0.0000	0.994		0.000	0.00
56	55-56	0.9920	0.3330	0.0000	0.0000	0.994		0.000	0.00
57	56-57	0.4890	0.1641	0.0000	0.0000	0.952	0	0	0
58	57-58	0.1898	0.0628	0.1000	0.0720	0.952		0.000	0.00
59	58-59	0.2409	0.0731	0.0000	0.0000	0.948		0.006	0.00
60	59-60	0.3166	0.1613	1.2440	0.8880	0.943		0.008	0.00
61	60-61	0.0608	0.0309	0.0320	0.0230	0.963	0	0	0
62	61-62	0.0905	0.0460	0.0000	0.0000	0.963		0.000	0.00
63	62-63	0.4433	0.2258	0.2270	0.1620	0.963		0.000	0.00
64	63-64	0.6495	0.3308	0.0590	0.0420	0.965		0.001	0.00
65	10-65	0.1255	0.0381	0.0180	0.0130	0.991		0.000	0.00
66	65-66	0.0029	0.0008	0.0180	0.0130	0.991		0.000	0.00
67	11-67	0.4613	0.1525	0.0280	0.0200	0.990		0.000	0.00
68	67-68	0.0029	0.0009	0.0280	0.0200	0.990		0.000	0.00
69	10-42	0.3120	0.3120				0	0	0
70	12-20	0.3120	0.3120				0	0	0
71	14-45	0.6239	0.6239					0.004	0.00
72	49-58	1.2479	1.2479					0.038	0.04
73	26-64	0.6239	0.6239					0.001	0.00

Na Slikama 8.3.2. i 8.3.3. dati su dijagrami konvergencije za programom dobijenu optimalnu konfiguraciju.



Slika 8.3.2. Graf konvergencije (zavisnost prihvaćenih rešenja od broja iteracija kojih ima 100000)



Slika 8.3.3. Graf konvergencije (zavisnost prihvaćenih rešenja od temperature, početna 5000 °C)

Diskusija:

- Za vreme računanja manje od 30 minuta pronađeno je bolje rešenje nego u referenci [101]. U ovoj referenci za optimalnu konfiguraciju (otvorene grane 57 63 17 45 i 69) dobijeni su gubici 119.91 kW za vreme proračuna od 101.81 sec na računaru DecStation 5000/200.
- Najniži napon je pre rekonfiguracije izneo 0.909 r.j., da bi nakon rekonfiguracije porastao na 0.943 r.j.
- Zasenčeni gubici aktivne snage grana (Tabela 8.3.2.) su veći nego u polaznoj konfiguraciji.

8.4. Najsloženija mreža

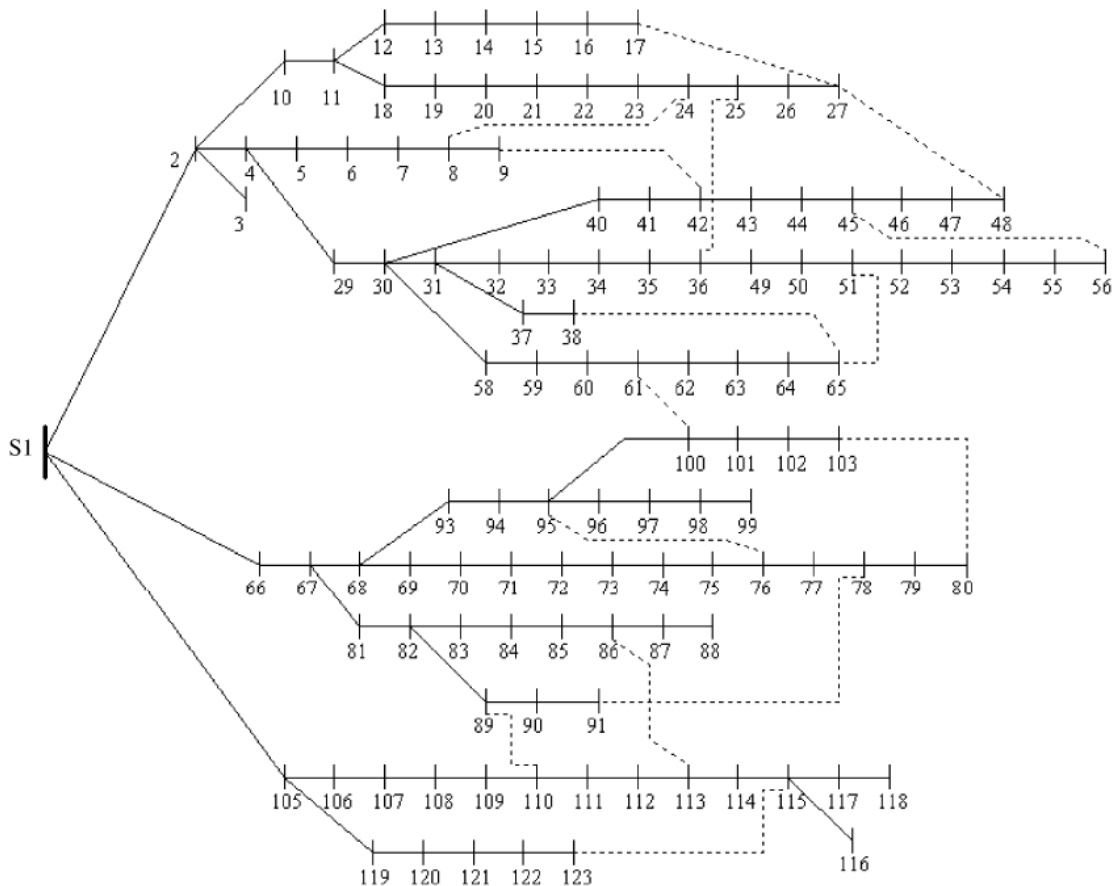
Na Slici 8.4.1. prikazana je najsloženija analizirana mreža iz reference [51].

Usvojeni su sledeći ulazni podaci:

1. stopa prihvatanja, manja od 0.0001,
2. broj iteracija 10000 i
3. pravilo snižavanja temperature $T=0.95 \cdot T$.

8. Numerički rezultati

Tabele 8.4.1. i 8.4.2. predstavljaju ulazne podatke i rezultate tačnog algoritma tokova snaga za polaznu i dobijenu konfiguraciju (nule u kolonama A, MW i MVAr označavaju koje su grane otvorene).



Slika 8.4.1. Najslabija analizirana mreža

Tabela 8.4.1. Ulazni podaci i rezultati MATPOWER tokova snaga ($P_{loss}=1298.1$ kW) za polaznu konfiguraciju 118-132 grane otvorene (Slika 8.4.1., nule u A koloni), bazna snaga 100 MVA, $U_n=11$ kV

vod broj	grana	R (r.j.)	X (r.j.)	aktivna potrošnja čvora (MW)	reaktivna potrošnja čvora (MVar)	V r.j.	modul struje grane (A)	grana aktivni gubici snage P_{loss} (MW)	grana reaktivni gubici snage Q_{loss} (MVar)
1	1-2	0.0298	0.0107	0.13384	0.10114	0.996		0.055	0.02
2	2-3	0.0273	0.0098	0.016214	0.011292	0.996		0.000	0.00
3	2-4	0.0372	0.0134	0.034315	0.021845	0.992		0.043	0.02
4	4-5	0.0124	0.0446	0.073016	0.063602	0.992		0.000	0.00
5	5-6	0.0124	0.0446	0.14420	0.068604	0.992		0.000	0.00
6	6-7	0.0124	0.0103	0.10447	0.061725	0.992		0.000	0.00
7	7-8	0.0149	0.0116	0.028547	0.011503	0.992		0.000	0.00
8	8-9	0.0174	0.0521	0.087560	0.051073	0.991		0.000	0.00
9	2-10	0.1372	0.1111	0.19820	0.10677	0.991		0.009	0.01
10	10-11	0.0926	0.0652	0.14680	0.075995	0.989		0.005	0.00
11	11-12	0.1545	0.2587	0.026040	0.018687	0.988		0.000	0.00
12	12-13	0.1174	0.1250	0.052100	0.023220	0.987		0.000	0.00
13	13-14	0.1488	0.0975	0.14190	0.11750	0.986		0.000	0.00
14	14-15	0.1240	0.0372	0.021870	0.028790	0.986		0.000	0.00

8. Numerički rezultati

15	15-16	0.1322	0.1488	0.03370	0.026450	0.986	0.000	0.00
16	16-17	0.1298	0.1413	0.032430	0.025230	0.986	0.000	0.00
17	11-18	0.1802	0.2355	0.020234	0.011906	0.984	0.006	0.01
18	18-19	0.0975	0.1529	0.15694	0.078523	0.981	0.003	0.00
19	19-20	0.1322	0.1620	0.54629	0.35140	0.978	0.003	0.00
20	20-21	0.0992	0.1562	0.18031	0.16420	0.976	0.001	0.00
21	21-22	0.0992	0.0652	0.093167	0.054594	0.975	0.000	0.00
22	22-23	1.1653	0.5975	0.085180	0.039650	0.968	0.004	0.00
23	23-24	0.2421	0.1114	0.16810	0.095178	0.967	0.001	0.00
24	24-25	0.1099	0.0860	0.12511	0.15022	0.967	0.000	0.00
25	25-26	0.1471	0.1107	0.016030	0.024620	0.966	0.000	0.00
26	26-27	0.1471	0.1107	0.026030	0.024620	0.966	0.000	0.00
27	4-28	0.0124	0.0245	0.59456	0.52262	0.989	0.013	0.03
28	28-29	0.0099	0.0228	0.12062	0.059117	0.987	0.009	0.02
29	29-30	0.0992	0.2286	0.10238	0.099554	0.973	0.038	0.09
30	30-31	0.1736	0.2008	0.51340	0.31850	0.961	0.041	0.05
31	31-32	0.0992	0.0446	0.47525	0.45614	0.956	0.018	0.01
32	32-33	0.1471	0.1934	0.15143	0.13679	0.948	0.019	0.02
33	33-34	0.1471	0.1934	0.20538	0.083302	0.940	0.016	0.02
34	34-35	0.1273	0.1339	0.13160	0.093082	0.934	0.012	0.01
35	30-36	0.1545	0.2157	0.44840	0.36979	0.970	0.002	0.00
36	36-37	0.1099	0.0818	0.44052	0.32164	0.970	0.000	0.00
37	29-38	0.2727	0.1603	0.11254	0.055134	0.981	0.011	0.01
38	38-39	0.2562	0.1603	0.053963	0.038998	0.975	0.009	0.01
39	39-40	0.1074	0.1603	0.39305	0.34260	0.972	0.004	0.01
40	40-41	0.2314	0.1240	0.32674	0.27856	0.968	0.004	0.00
41	41-42	0.9752	0.7025	0.53626	0.24024	0.958	0.008	0.01
42	42-43	0.3471	0.2031	0.076247	0.06652	0.957	0.000	0.00
43	43-44	0.2231	0.0803	0.053520	0.039760	0.956	0.000	0.00
44	44-45	0.2802	0.1009	0.040328	0.031964	0.956	0.000	0.00
45	45-46	0.2231	0.1470	0.039653	0.020758	0.956	0.000	0.00
46	35-47	0.1736	0.1143	0.066195	0.042361	0.928	0.015	0.01
47	47-48	0.0992	0.0652	0.073904	0.051653	0.925	0.008	0.01
48	48-49	0.1240	0.0816	0.11477	0.057965	0.921	0.009	0.01
49	49-50	0.1240	0.0816	0.91837	1.2015	0.917	0.009	0.01
50	50-51	0.1983	0.1307	0.21030	0.14666	0.914	0.002	0.00
51	51-52	0.0992	0.0652	0.066680	0.056608	0.914	0.001	0.00
52	52-53	0.3347	0.1205	0.042207	0.040184	0.911	0.001	0.00
53	53-54	0.3347	0.1205	0.43374	0.28341	0.909	0.001	0.00
54	29-55	0.3231	0.1165	0.062100	0.026860	0.984	0.004	0.00
55	55-56	0.3355	0.1207	0.092460	0.088380	0.980	0.004	0.00
56	56-57	0.3355	0.1207	0.085188	0.055436	0.977	0.003	0.00
57	57-58	0.5835	0.4513	0.34530	0.33240	0.971	0.004	0.00
58	58-59	0.2793	0.1007	0.022500	0.016830	0.970	0.000	0.00
59	59-60	0.2793	0.1007	0.080551	0.049156	0.969	0.000	0.00
60	60-61	0.1711	0.0617	0.095860	0.090758	0.968	0.000	0.00
61	61-62	0.2041	0.7374	0.062920	0.047700	0.968	0.000	0.00
62	1-63	0.0231	0.0345	0.47880	0.46374	0.996	0.021	0.03
63	63-64	0.0967	0.1666	0.12094	0.052006	0.981	0.078	0.13
64	64-65	0.2107	0.0759	0.13911	0.10034	0.968	0.076	0.03
65	65-66	0.1736	0.0627	0.39178	0.19350	0.961	0.026	0.01
66	66-67	0.3165	0.1140	0.027741	0.026713	0.949	0.038	0.01
67	67-68	0.4165	0.2730	0.052814	0.025257	0.932	0.048	0.03
68	68-69	0.3355	0.1207	0.066890	0.038713	0.921	0.038	0.01
69	69-70	0.7950	0.6289	0.46750	0.39514	0.888	0.085	0.07

8. Numerički rezultati

70	70-71	0.1364	0.0496	0.59485	0.23974	0.884		0.009	0.00
71	71-72	0.2504	0.0902	0.13250	0.084363	0.879		0.009	0.00
72	72-73	0.2504	0.0902	0.052699	0.022482	0.875		0.007	0.00
73	73-74	0.1702	0.1190	0.86979	0.614775	0.871		0.004	0.00
74	74-75	0.1926	0.0694	0.031349	0.029817	0.871		0.000	0.00
75	75-76	0.4884	0.1465	0.19239	0.12243	0.869		0.001	0.00
76	76-77	0.1041	0.0374	0.065750	0.045370	0.869		0.000	0.00
77	64-78	0.4620	0.3047	0.23815	0.22322	0.965		0.037	0.02
78	78-79	0.1537	0.1014	0.29455	0.16247	0.960		0.010	0.01
79	79-80	0.1537	0.1014	0.48557	0.43792	0.957		0.004	0.00
80	80-81	0.2149	0.1149	0.24353	0.18303	0.955		0.002	0.00
81	81-82	0.1273	0.1223	0.24353	0.18303	0.954		0.000	0.00
82	82-83	0.1901	0.1058	0.13425	0.11929	0.954		0.000	0.00
83	83-84	0.2083	0.0876	0.022710	0.027960	0.953		0.000	0.00
84	84-85	0.1488	0.1223	0.49513	0.026515	0.953		0.000	0.00
85	79-86	0.1322	0.1504	0.38378	0.25716	0.959		0.000	0.00
86	86-87	0.1653	0.1901	0.049640	0.020600	0.959		0.000	0.00
87	87-88	0.1322	0.3248	0.022473	0.011806	0.959		0.000	0.00
88	65-89	0.5529	0.1993	0.062930	0.042960	0.957		0.021	0.01
89	89-90	0.2198	0.1014	0.030670	0.034930	0.952		0.008	0.00
90	90-91	0.2198	0.1014	0.062530	0.066790	0.948		0.007	0.00
91	91-92	0.2198	0.1014	0.11457	0.081748	0.947		0.000	0.00
92	92-93	0.2198	0.1014	0.081292	0.066526	0.946		0.000	0.00
93	93-94	0.1926	0.0950	0.031733	0.015960	0.946		0.000	0.00
94	94-95	0.4099	0.1140	0.033320	0.060480	0.946		0.000	0.00
95	91-96	0.1620	0.1488	0.53128	0.22485	0.945		0.003	0.00
96	96-97	0.1620	0.1488	0.50703	0.36742	0.943		0.001	0.00
97	97-98	0.1542	0.1008	0.26390	0.011700	0.943		0.000	0.00
98	98-99	0.0617	0.2628	0.045990	0.030392	0.943		0.000	0.00
99	1-100	0.0517	0.0219	0.10066	0.047572	0.996		0.024	0.01
100	100-101	0.1240	0.1934	0.45648	0.35030	0.983		0.046	0.07
101	101-102	0.1113	0.0734	0.52256	0.44929	0.976		0.033	0.02
102	102-103	0.1907	0.0994	0.40843	0.16846	0.966		0.043	0.02
103	103-104	0.3694	0.1329	0.14148	0.13425	0.950		0.069	0.02
104	104-105	0.1349	0.0486	0.10443	0.066024	0.944		0.023	0.01
105	105-106	0.2727	0.0818	0.096793	0.083647	0.934		0.044	0.01
106	106-107	0.1289	0.0464	0.49392	0.41934	0.929		0.019	0.01
107	107-108	0.3156	0.1136	0.22538	0.13588	0.919		0.032	0.01
108	108-109	0.1344	0.0483	0.50921	0.38721	0.915		0.011	0.00
109	109-110	0.3156	0.1136	0.18850	0.17346	0.908		0.015	0.01
110	110-111	0.2021	0.0726	0.91803	0.89855	0.905		0.004	0.00
111	110-112	0.1726	0.0622	0.30508	0.21537	0.907		0.000	0.00
112	112-113	0.1902	0.0684	0.054380	0.040970	0.907		0.000	0.00
113	100-114	0.5043	0.1815	0.21114	0.19290	0.993		0.002	0.00
114	114-115	0.1542	0.1050	0.067009	0.053336	0.992		0.000	0.00
115	115-116	0.3084	0.2033	0.16207	0.090321	0.991		0.000	0.00
116	116-117	0.3347	0.3033	0.048785	0.029156	0.991		0.000	0.00
117	117-118	0.4041	0.3620	0.033900	0.018980	0.991		0.000	0.00
118	27-46	0.4345	0.2417				0		
119	17-27	0.4345	0.2410				0		
120	8-24	0.3531	0.1272				0		
121	43-54	0.3967	0.1428				0		
122	49-62	0.2975	0.1071				0		
123	37-62	0.4711	0.4727				0		

8. Numerički rezultati

124	9-40	0.4380	0.2767				0		
125	58-96	0.3270	0.1178				0		
126	73-91	0.5620	0.5355				0		
127	75-88	0.3357	0.1210				0		
128	77-99	0.3823	0.1383				0		
129	83-108	0.5380	0.1934				0		
130	86-105	0.6715	0.2417				0		
131	110-118	0.5859	0.2110				0		
132	25-35	0.4132	0.4132				0		

Tabela 8.4.2. Ulazni podaci i rezultati MATPOWER tokova snaga (Ploss=1131.8 kW) za dobijenu konfiguraciju 126, 124, 109, 97, 85, 82, 74, 60, 55, 52, 47, 45, 32, 20, 15 grane otvorene (nule u A koloni), bazna snaga 100 MVA, Un=11 kV

vod broj	grana	R (r.j.)	X (r.j.)	aktivna potrošnja čvora (MW)	reaktivna potrošnja čvora (MVar)	V r.j.	modul struje grane (A)	grana aktivni gubici snage Ploss (MW)	grana reaktivni gubici snage Qloss (MVar)
1	1-2	0.0298	0.0107	0.13384	0.10114	0.996		0.047	0.02
2	2-3	0.0273	0.0098	0.016214	0.011292	0.996		0.000	0.00
3	2-4	0.0372	0.0134	0.034315	0.021845	0.992		0.044	0.02
4	4-5	0.0124	0.0446	0.073016	0.063602	0.991		0.001	0.00
5	5-6	0.0124	0.0446	0.14420	0.068604	0.991		0.001	0.00
6	6-7	0.0124	0.0103	0.10447	0.061725	0.990		0.000	0.00
7	7-8	0.0149	0.0116	0.028547	0.011503	0.990		0.001	0.00
8	8-9	0.0174	0.0521	0.087560	0.051073	0.990		0.000	0.00
9	2-10	0.1372	0.1111	0.19820	0.10677	0.993		0.003	0.00
10	10-11	0.0926	0.0652	0.14680	0.075995	0.992		0.002	0.00
11	11-12	0.1545	0.2587	0.026040	0.018687	0.991		0.000	0.00
12	12-13	0.1174	0.1250	0.052100	0.023220	0.991		0.000	0.00
13	13-14	0.1488	0.0975	0.14190	0.11750	0.990		0.000	0.00
14	14-15	0.1240	0.0372	0.021870	0.028790	0.990		0.000	0.00
15	15-16	0.1322	0.1488	0.03370	0.026450	0.981	0	0	0
16	16-17	0.1298	0.1413	0.032430	0.025230	0.981		0.000	0.00
17	11-18	0.1802	0.2355	0.020234	0.011906	0.990		0.001	0.00
18	18-19	0.0975	0.1529	0.15694	0.078523	0.988		0.001	0.00
19	19-20	0.1322	0.1620	0.54629	0.35140	0.987		0.001	0.00
20	20-21	0.0992	0.1562	0.18031	0.16420	0.978	0	0	0
21	21-22	0.0992	0.0652	0.093167	0.054594	0.978		0.000	0.00
22	22-23	1.1653	0.5975	0.085180	0.039650	0.983		0.001	0.00
23	23-24	0.2421	0.1114	0.16810	0.095178	0.984		0.000	0.00
24	24-25	0.1099	0.0860	0.12511	0.15022	0.982		0.001	0.00
25	25-26	0.1471	0.1107	0.016030	0.024620	0.982		0.000	0.00
26	26-27	0.1471	0.1107	0.026030	0.024620	0.982		0.000	0.00
27	4-28	0.0124	0.0245	0.59456	0.52262	0.990		0.009	0.02
28	28-29	0.0099	0.0228	0.12062	0.059117	0.988		0.006	0.01
29	29-30	0.0992	0.2286	0.10238	0.099554	0.977		0.025	0.06
30	30-31	0.1736	0.2008	0.51340	0.31850	0.973		0.003	0.00
31	31-32	0.0992	0.0446	0.47525	0.45614	0.973		0.000	0.00
32	32-33	0.1471	0.1934	0.15143	0.13679	0.977	0	0	0
33	33-34	0.1471	0.1934	0.20538	0.083302	0.978		0.000	0.00
34	34-35	0.1273	0.1339	0.13160	0.093082	0.978		0.000	0.00
35	30-36	0.1545	0.2157	0.44840	0.36979	0.968		0.020	0.03
36	36-37	0.1099	0.0818	0.44052	0.32164	0.964		0.010	0.01

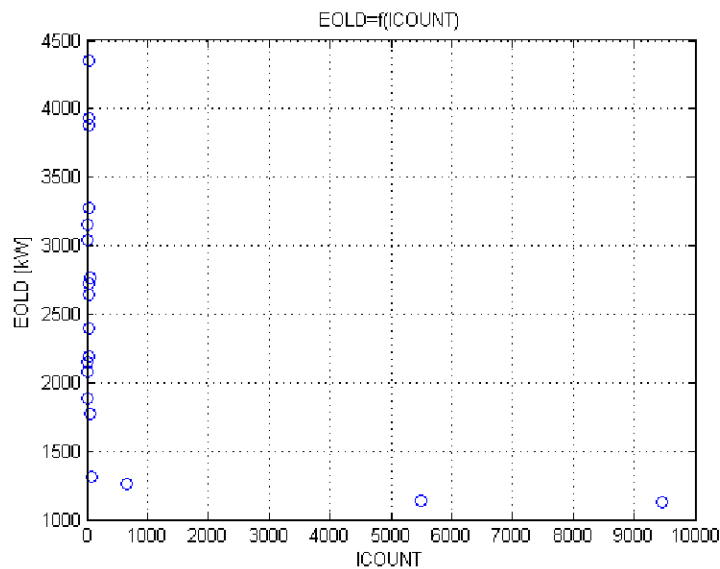
8. Numerički rezultati

37	29-38	0.2727	0.1603	0.11254	0.055134	0.980		0.019	0.01
38	38-39	0.2562	0.1603	0.053963	0.038998	0.972		0.016	0.01
39	39-40	0.1074	0.1603	0.39305	0.34260	0.968		0.006	0.01
40	40-41	0.2314	0.1240	0.32674	0.27856	0.963		0.008	0.00
41	41-42	0.9752	0.7025	0.53626	0.24024	0.946		0.021	0.01
42	42-43	0.3471	0.2031	0.076247	0.06652	0.942		0.002	0.00
43	43-44	0.2231	0.0803	0.053520	0.039760	0.942		0.000	0.00
44	44-45	0.2802	0.1009	0.040328	0.031964	0.942		0.000	0.00
45	45-46	0.2231	0.1470	0.039653	0.020758	0.981	0	0	0
46	35-47	0.1736	0.1143	0.066195	0.042361	0.978		0.000	0.00
47	47-48	0.0992	0.0652	0.073904	0.051653	0.941	0	0	0
48	48-49	0.1240	0.0816	0.11477	0.057965	0.941		0.000	0.00
49	49-50	0.1240	0.0816	0.91837	1.2015	0.939		0.005	0.00
50	50-51	0.1983	0.1307	0.21030	0.14666	0.938		0.000	0.00
51	51-52	0.0992	0.0652	0.066680	0.056608	0.938		0.000	0.00
52	52-53	0.3347	0.1205	0.042207	0.040184	0.940	0	0	0
53	53-54	0.3347	0.1205	0.43374	0.28341	0.940		0.000	0.00
54	29-55	0.3231	0.1165	0.062100	0.026860	0.988		0.000	0.00
55	55-56	0.3355	0.1207	0.092460	0.088380	0.930	0	0	0
56	56-57	0.3355	0.1207	0.085188	0.055436	0.930		0.000	0.00
57	57-58	0.5835	0.4513	0.34530	0.33240	0.932		0.000	0.00
58	58-59	0.2793	0.1007	0.022500	0.016830	0.932		0.000	0.00
59	59-60	0.2793	0.1007	0.080551	0.049156	0.931		0.000	0.00
60	60-61	0.1711	0.0617	0.095860	0.090758	0.947	0	0	0
61	61-62	0.2041	0.7374	0.062920	0.047700	0.947		0.000	0.00
62	1-63	0.0231	0.0345	0.47880	0.46374	0.996		0.019	0.03
63	63-64	0.0967	0.1666	0.12094	0.052006	0.982		0.070	0.12
64	64-65	0.2107	0.0759	0.13911	0.10034	0.968		0.086	0.03
65	65-66	0.1736	0.0627	0.39178	0.19350	0.962		0.021	0.01
66	66-67	0.3165	0.1140	0.027741	0.026713	0.952		0.029	0.01
67	67-68	0.4165	0.2730	0.052814	0.025257	0.937		0.037	0.02
68	68-69	0.3355	0.1207	0.066890	0.038713	0.927		0.028	0.01
69	69-70	0.7950	0.6289	0.46750	0.39514	0.898		0.063	0.05
70	70-71	0.1364	0.0496	0.59485	0.23974	0.895		0.006	0.00
71	71-72	0.2504	0.0902	0.13250	0.084363	0.892		0.005	0.00
72	72-73	0.2504	0.0902	0.052699	0.022482	0.888		0.004	0.00
73	73-74	0.1702	0.1190	0.86979	0.614775	0.886		0.002	0.00
74	74-75	0.1926	0.0694	0.031349	0.029817	0.941	0	0	0
75	75-76	0.4884	0.1465	0.19239	0.12243	0.939		0.001	0.00
76	76-77	0.1041	0.0374	0.065750	0.045370	0.939		0.000	0.00
77	64-78	0.4620	0.3047	0.23815	0.22322	0.971		0.018	0.01
78	78-79	0.1537	0.1014	0.29455	0.16247	0.968		0.004	0.00
79	79-80	0.1537	0.1014	0.48557	0.43792	0.965		0.003	0.00
80	80-81	0.2149	0.1149	0.24353	0.18303	0.964		0.001	0.00
81	81-82	0.1273	0.1223	0.24353	0.18303	0.963		0.000	0.00
82	82-83	0.1901	0.1058	0.13425	0.11929	0.939	0	0	0
83	83-84	0.2083	0.0876	0.022710	0.027960	0.939		0.000	0.00
84	84-85	0.1488	0.1223	0.49513	0.026515	0.939		0.000	0.00
85	79-86	0.1322	0.1504	0.38378	0.25716	0.946	0	0	0
86	86-87	0.1653	0.1901	0.049640	0.020600	0.944		0.000	0.00
87	87-88	0.1322	0.3248	0.022473	0.011806	0.943		0.000	0.00
88	65-89	0.5529	0.1993	0.062930	0.042960	0.952		0.042	0.02
89	89-90	0.2198	0.1014	0.030670	0.034930	0.946		0.016	0.01
90	90-91	0.2198	0.1014	0.062530	0.066790	0.940		0.015	0.01
91	91-92	0.2198	0.1014	0.11457	0.081748	0.939		0.000	0.00
92	92-93	0.2198	0.1014	0.081292	0.066526	0.938		0.000	0.00

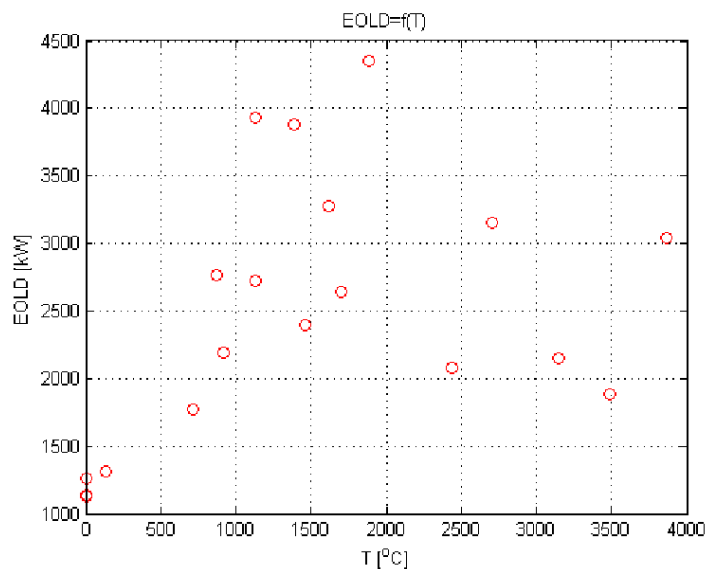
8. Numerički rezultati

93	93-94	0.1926	0.0950	0.031733	0.015960	0.938		0.000	0.00
94	94-95	0.4099	0.1140	0.033320	0.060480	0.938		0.000	0.00
95	91-96	0.1620	0.1488	0.53128	0.22485	0.935		0.008	0.01
96	96-97	0.1620	0.1488	0.50703	0.36742	0.934		0.001	0.00
97	97-98	0.1542	0.1008	0.26390	0.011700	0.939	0	0	0
98	98-99	0.0617	0.2628	0.045990	0.030392	0.939		0.000	0.00
99	1-100	0.0517	0.0219	0.10066	0.047572	0.996		0.033	0.01
100	100-101	0.1240	0.1934	0.45648	0.35030	0.985		0.033	0.05
101	101-102	0.1113	0.0734	0.52256	0.44929	0.979		0.023	0.02
102	102-103	0.1907	0.0994	0.40843	0.16846	0.970		0.029	0.01
103	103-104	0.3694	0.1329	0.14148	0.13425	0.957		0.043	0.02
104	104-105	0.1349	0.0486	0.10443	0.066024	0.953		0.014	0.01
105	105-106	0.2727	0.0818	0.096793	0.083647	0.947		0.012	0.00
106	106-107	0.1289	0.0464	0.49392	0.41934	0.945		0.005	0.00
107	107-108	0.3156	0.1136	0.22538	0.13588	0.941		0.005	0.00
108	108-109	0.1344	0.0483	0.50921	0.38721	0.940		0.001	0.00
109	109-110	0.3156	0.1136	0.18850	0.17346	0.934	0	0	0
110	110-111	0.2021	0.0726	0.91803	0.89855	0.931		0.004	0.00
111	110-112	0.1726	0.0622	0.30508	0.21537	0.933		0.000	0.00
112	112-113	0.1902	0.0684	0.054380	0.040970	0.933		0.000	0.00
113	100-114	0.5043	0.1815	0.21114	0.19290	0.982		0.039	0.01
114	114-115	0.1542	0.1050	0.067009	0.053336	0.977		0.010	0.01
115	115-116	0.3084	0.2033	0.16207	0.090321	0.968		0.018	0.01
116	116-117	0.3347	0.3033	0.048785	0.029156	0.958		0.017	0.01
117	117-118	0.4041	0.3620	0.033900	0.018980	0.946		0.019	0.02
118	27-46	0.4345	0.2417					0.000	0.00
119	17-27	0.4345	0.2410					0.000	0.00
120	8-24	0.3531	0.1272					0.010	0.00
121	43-54	0.3967	0.1428					0.001	0.00
122	49-62	0.2975	0.1071					0.014	0.01
123	37-62	0.4711	0.4727					0.027	0.03
124	9-40	0.4380	0.2767				0	0	0
125	58-96	0.3270	0.1178					0.003	0.00
126	73-91	0.5620	0.5355				0	0	0
127	75-88	0.3357	0.1210					0.001	0.00
128	77-99	0.3823	0.1383					0.000	0.00
129	83-108	0.5380	0.1934					0.000	0.00
130	86-105	0.6715	0.2417					0.007	0.00
131	110-118	0.5859	0.2110					0.026	0.01
132	25-35	0.4132	0.4132					0.002	0.00

Na Slikama 8.4.2. i 8.4.3. dati su dijagrami konvergencije za programom dobijenu konfiguraciju.



Slika 8.4.2. Graf konvergencije (zavisnost prihvaćenih rešenja od broja iteracija kojih ima 10000)



Slika 8.4.3. Graf konvergencije (zavisnost prihvaćenih rešenja od temperature, početna 5000 °C)

Diskusija:

- Za vreme računanja manje od 48 sati pronađeno je suboptimalno rešenje sa gubicima 1131.8 kW koje je gore nego rešenje u literaturi [51], gubici 869.8371 kW, kada su otvorene grane 42, 26, 23, 51, 122, 58, 39, 95, 74, 71, 97, 129, 130, 109 i 34.
- Najniži napon je pre rekonfiguracije izneo 0.869 r.j., a nakon nje 0.886 r.j.
- Zasenčeni gubici aktivne snage grana (Tabela 8.4.2.) su veći nego u polaznoj konfiguraciji.
- Kod velikih mreža kakva je ova, s obzirom na vreme proračuna i izgenerisanu konfiguraciju, prednost treba dati drugim metodama a metodu simuliranog kaljenja prevashodno koristiti u fazi planiranja.

Zbog velike vrednosti dobijenih gubitaka izvršeno je ponovo puštanje programa sa rigoroznijim ulaznim podacima koji su:

1. stopa prihvatanja, manja od 0.00001,
2. broj iteracija 100000 i
3. pravilo snižavanja temperature $T=0.97*T$.

Tabela 8.4.3. predstavlja ulazne podatke i rezultate tačnog algoritma tokova snaga za novodobijenu konfiguraciju (nule u kolonama A, MW i MVar označavaju koje su grane otvorene).

8. Numerički rezultati

Tabela 8.4.3. Ulazni podaci i rezultati MATPOWER tokova snaga ($P_{loss}=917.6$ kW) za novodobijenu konfiguraciju 129, 109, 95, 87, 85, 76, 72, 61, 52, 47, 42, 38, 33, 25, 21 grane otvorene (nule u A koloni), bazna snaga 100 MVA, $U_n=11$ kV

vod broj	grana	R (r.j.)	X (r.j.)	aktivna potrošnja čvora (MW)	reaktivna potrošnja čvora (MVar)	V r.j.	modul struje grane (A)	grana aktivni gubici snage P_{loss} (MW)	grana reaktivni gubici snage Q_{loss} (MVar)
1	1-2	0.0298	0.0107	0.13384	0.10114	0.996		0.066	0.02
2	2-3	0.0273	0.0098	0.016214	0.011292	0.996		0.000	0.00
3	2-4	0.0372	0.0134	0.034315	0.021845	0.991		0.052	0.02
4	4-5	0.0124	0.0446	0.073016	0.063602	0.990		0.001	0.00
5	5-6	0.0124	0.0446	0.14420	0.068604	0.989		0.001	0.00
6	6-7	0.0124	0.0103	0.10447	0.061725	0.988		0.001	0.00
7	7-8	0.0149	0.0116	0.028547	0.011503	0.988		0.001	0.00
8	8-9	0.0174	0.0521	0.087560	0.051073	0.987		0.001	0.00
9	2-10	0.1372	0.1111	0.19820	0.10677	0.991		0.011	0.01
10	10-11	0.0926	0.0652	0.14680	0.075995	0.988		0.006	0.00
11	11-12	0.1545	0.2587	0.026040	0.018687	0.984		0.003	0.00
12	12-13	0.1174	0.1250	0.052100	0.023220	0.982		0.002	0.00
13	13-14	0.1488	0.0975	0.14190	0.11750	0.979		0.002	0.00
14	14-15	0.1240	0.0372	0.021870	0.028790	0.978		0.001	0.00
15	15-16	0.1322	0.1488	0.03370	0.026450	0.976		0.001	0.00
16	16-17	0.1298	0.1413	0.032430	0.025230	0.974		0.001	0.00
17	11-18	0.1802	0.2355	0.020234	0.011906	0.984		0.002	0.00
18	18-19	0.0975	0.1529	0.15694	0.078523	0.983		0.001	0.00
19	19-20	0.1322	0.1620	0.54629	0.35140	0.981		0.001	0.00
20	20-21	0.0992	0.1562	0.18031	0.16420	0.980		0.000	0.00
21	21-22	0.0992	0.0652	0.093167	0.054594	0.982	0	0	0
22	22-23	1.1653	0.5975	0.085180	0.039650	0.983		0.000	0.00
23	23-24	0.2421	0.1114	0.16810	0.095178	0.984		0.000	0.00
24	24-25	0.1099	0.0860	0.12511	0.15022	0.983		0.000	0.00
25	25-26	0.1471	0.1107	0.016030	0.024620	0.970	0	0	0
26	26-27	0.1471	0.1107	0.026030	0.024620	0.970		0.000	0.00
27	4-28	0.0124	0.0245	0.59456	0.52262	0.989		0.009	0.02
28	28-29	0.0099	0.0228	0.12062	0.059117	0.987		0.006	0.01
29	29-30	0.0992	0.2286	0.10238	0.099554	0.976		0.026	0.06
30	30-31	0.1736	0.2008	0.51340	0.31850	0.972		0.004	0.00
31	31-32	0.0992	0.0446	0.47525	0.45614	0.971		0.001	0.00
32	32-33	0.1471	0.1934	0.15143	0.13679	0.970		0.000	0.00
33	33-34	0.1471	0.1934	0.20538	0.083302	0.980	0	0	0
34	34-35	0.1273	0.1339	0.13160	0.093082	0.980		0.000	0.00
35	30-36	0.1545	0.2157	0.44840	0.36979	0.967		0.018	0.03
36	36-37	0.1099	0.0818	0.44052	0.32164	0.963		0.009	0.01
37	29-38	0.2727	0.1603	0.11254	0.055134	0.987		0.000	0.00
38	38-39	0.2562	0.1603	0.053963	0.038998	0.979	0	0	0
39	39-40	0.1074	0.1603	0.39305	0.34260	0.979		0.000	0.00
40	40-41	0.2314	0.1240	0.32674	0.27856	0.976		0.002	0.00
41	41-42	0.9752	0.7025	0.53626	0.24024	0.969		0.004	0.00
42	42-43	0.3471	0.2031	0.076247	0.06652	0.959	0	0	0
43	43-44	0.2231	0.0803	0.053520	0.039760	0.961		0.001	0.00
44	44-45	0.2802	0.1009	0.040328	0.031964	0.963		0.002	0.00
45	45-46	0.2231	0.1470	0.039653	0.020758	0.965		0.002	0.00

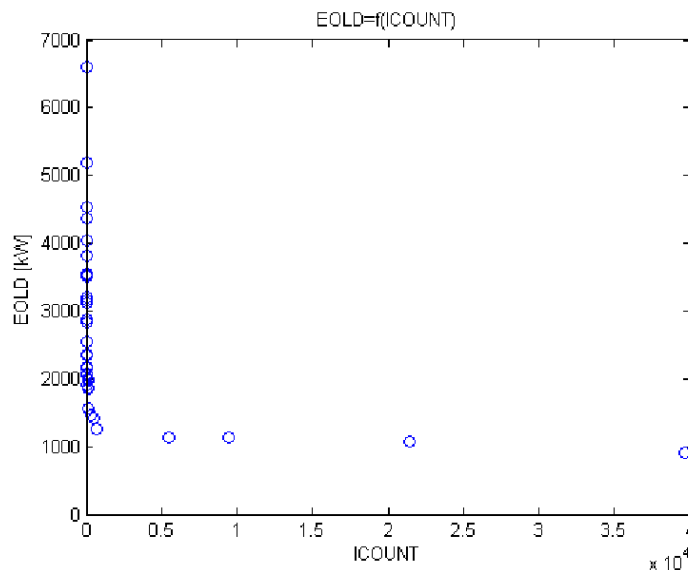
8. Numerički rezultati

46	35-47	0.1736	0.1143	0.066195	0.042361	0.980		0.000	0.00
47	47-48	0.0992	0.0652	0.073904	0.051653	0.941	0	0	0
48	48-49	0.1240	0.0816	0.11477	0.057965	0.942		0.000	0.00
49	49-50	0.1240	0.0816	0.91837	1.2015	0.939		0.005	0.00
50	50-51	0.1983	0.1307	0.21030	0.14666	0.938		0.000	0.00
51	51-52	0.0992	0.0652	0.066680	0.056608	0.938		0.000	0.00
52	52-53	0.3347	0.1205	0.042207	0.040184	0.957	0	0	0
53	53-54	0.3347	0.1205	0.43374	0.28341	0.957		0.000	0.00
54	29-55	0.3231	0.1165	0.062100	0.026860	0.979		0.020	0.01
55	55-56	0.3355	0.1207	0.092460	0.088380	0.970		0.020	0.01
56	56-57	0.3355	0.1207	0.085188	0.055436	0.962		0.018	0.01
57	57-58	0.5835	0.4513	0.34530	0.33240	0.946		0.028	0.02
58	58-59	0.2793	0.1007	0.022500	0.016830	0.945		0.000	0.00
59	59-60	0.2793	0.1007	0.080551	0.049156	0.945		0.000	0.00
60	60-61	0.1711	0.0617	0.095860	0.090758	0.944		0.000	0.00
61	61-62	0.2041	0.7374	0.062920	0.047700	0.948	0	0	0
62	1-63	0.0231	0.0345	0.47880	0.46374	0.997		0.013	0.02
63	63-64	0.0967	0.1666	0.12094	0.052006	0.985		0.044	0.08
64	64-65	0.2107	0.0759	0.13911	0.10034	0.976		0.040	0.01
65	65-66	0.1736	0.0627	0.39178	0.19350	0.972		0.008	0.00
66	66-67	0.3165	0.1140	0.027741	0.026713	0.966		0.009	0.00
67	67-68	0.4165	0.2730	0.052814	0.025257	0.958		0.011	0.01
68	68-69	0.3355	0.1207	0.066890	0.038713	0.953		0.008	0.00
69	69-70	0.7950	0.6289	0.46750	0.39514	0.938		0.018	0.01
70	70-71	0.1364	0.0496	0.59485	0.23974	0.937		0.001	0.00
71	71-72	0.2504	0.0902	0.13250	0.084363	0.936		0.000	0.00
72	72-73	0.2504	0.0902	0.052699	0.022482	0.943	0	0	0
73	73-74	0.1702	0.1190	0.86979	0.614775	0.940		0.004	0.00
74	74-75	0.1926	0.0694	0.031349	0.029817	0.939		0.000	0.00
75	75-76	0.4884	0.1465	0.19239	0.12243	0.938		0.000	0.00
76	76-77	0.1041	0.0374	0.065750	0.045370	0.938	0	0	0
77	64-78	0.4620	0.3047	0.23815	0.22322	0.973		0.024	0.02
78	78-79	0.1537	0.1014	0.29455	0.16247	0.969		0.006	0.00
79	79-80	0.1537	0.1014	0.48557	0.43792	0.966		0.004	0.00
80	80-81	0.2149	0.1149	0.24353	0.18303	0.964		0.002	0.00
81	81-82	0.1273	0.1223	0.24353	0.18303	0.963		0.000	0.00
82	82-83	0.1901	0.1058	0.13425	0.11929	0.963		0.000	0.00
83	83-84	0.2083	0.0876	0.022710	0.027960	0.962		0.000	0.00
84	84-85	0.1488	0.1223	0.49513	0.026515	0.962		0.000	0.00
85	79-86	0.1322	0.1504	0.38378	0.25716	0.958	0	0	0
86	86-87	0.1653	0.1901	0.049640	0.020600	0.958		0.000	0.00
87	87-88	0.1322	0.3248	0.022473	0.011806	0.939	0	0	0
88	65-89	0.5529	0.1993	0.062930	0.042960	0.964		0.024	0.01
89	89-90	0.2198	0.1014	0.030670	0.034930	0.959		0.009	0.00
90	90-91	0.2198	0.1014	0.062530	0.066790	0.955		0.008	0.00
91	91-92	0.2198	0.1014	0.11457	0.081748	0.954		0.000	0.00
92	92-93	0.2198	0.1014	0.081292	0.066526	0.953		0.000	0.00
93	93-94	0.1926	0.0950	0.031733	0.015960	0.953		0.000	0.00
94	94-95	0.4099	0.1140	0.033320	0.060480	0.953		0.000	0.00
95	91-96	0.1620	0.1488	0.53128	0.22485	0.941	0	0	0
96	96-97	0.1620	0.1488	0.50703	0.36742	0.939		0.001	0.00
97	97-98	0.1542	0.1008	0.26390	0.011700	0.939		0.000	0.00
98	98-99	0.0617	0.2628	0.045990	0.030392	0.939		0.000	0.00
99	1-100	0.0517	0.0219	0.10066	0.047572	0.996		0.027	0.01

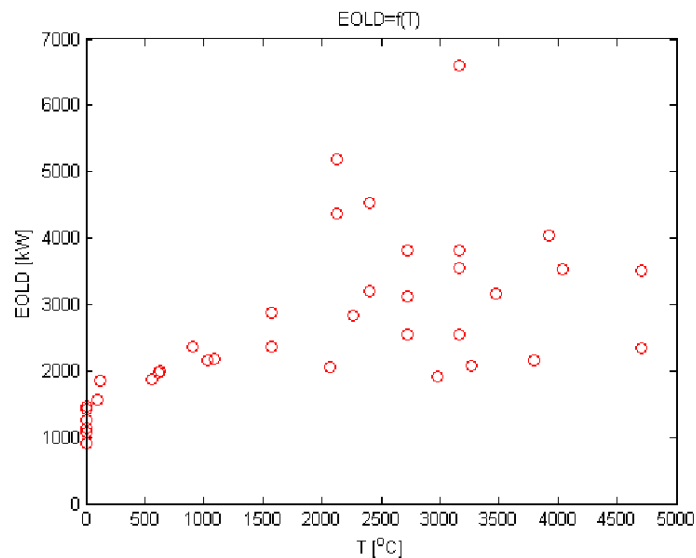
8. Numerički rezultati

100	100-101	0.1240	0.1934	0.45648	0.35030	0.987		0.023	0.04
101	101-102	0.1113	0.0734	0.52256	0.44929	0.982		0.016	0.01
102	102-103	0.1907	0.0994	0.40843	0.16846	0.975		0.018	0.01
103	103-104	0.3694	0.1329	0.14148	0.13425	0.965		0.025	0.01
104	104-105	0.1349	0.0486	0.10443	0.066024	0.962		0.008	0.00
105	105-106	0.2727	0.0818	0.096793	0.083647	0.957		0.008	0.00
106	106-107	0.1289	0.0464	0.49392	0.41934	0.955		0.003	0.00
107	107-108	0.3156	0.1136	0.22538	0.13588	0.952		0.003	0.00
108	108-109	0.1344	0.0483	0.50921	0.38721	0.951		0.001	0.00
109	109-110	0.3156	0.1136	0.18850	0.17346	0.935	0	0	0
110	110-111	0.2021	0.0726	0.91803	0.89855	0.932		0.004	0.00
111	110-112	0.1726	0.0622	0.30508	0.21537	0.934		0.000	0.00
112	112-113	0.1902	0.0684	0.054380	0.040970	0.934		0.000	0.00
113	100-114	0.5043	0.1815	0.21114	0.19290	0.982		0.039	0.01
114	114-115	0.1542	0.1050	0.067009	0.053336	0.977		0.010	0.01
115	115-116	0.3084	0.2033	0.16207	0.090321	0.969		0.018	0.01
116	116-117	0.3347	0.3033	0.048785	0.029156	0.959		0.016	0.01
117	117-118	0.4041	0.3620	0.033900	0.018980	0.947		0.019	0.02
118	27-46	0.4345	0.2417					0.003	0.00
119	17-27	0.4345	0.2410					0.004	0.00
120	8-24	0.3531	0.1272					0.004	0.00
121	43-54	0.3967	0.1428					0.001	0.00
122	49-62	0.2975	0.1071					0.014	0.01
123	37-62	0.4711	0.4727					0.024	0.02
124	9-40	0.4380	0.2767					0.012	0.01
125	58-96	0.3270	0.1178					0.007	0.00
126	73-91	0.5620	0.5355					0.013	0.01
127	75-88	0.3357	0.1210					0.000	0.00
128	77-99	0.3823	0.1383					0.000	0.00
129	83-108	0.5380	0.1934				0	0	0
130	86-105	0.6715	0.2417					0.002	0.00
131	110-118	0.5859	0.2110					0.026	0.01
132	25-35	0.4132	0.4132					0.001	0.00

Na Slikama 8.4.4. i 8.4.5. dati su dijagrami konvergencije za programom novodobijenu konfiguraciju.



Slika 8.4.4. Graf konvergencije (zavisnost prihvaćenih rešenja od broja iteracija kojih ima 100000)



Slika 8.4.5. Graf konvergencije (zavisnost prihvaćenih rešenja od temperature, početna 5000 °C)

Diskusija:

- Za vreme računanja od 18 dana pronađeno je suboptimalno rešenje sa gubicima 917.6 kW koje je gore nego rešenje u literaturi [51] kod koga su gubici 869.8371 kW, a otvorene grane 42, 26, 23, 51, 122, 58, 39, 95, 74, 71, 97, 129, 130, 109 i 34.
- Najniži napon je pre rekonfiguracije izneo 0.869 r.j., a nakon nje 0.932 r.j. što je znatno bolje i veće je od 0.9 r.j.
- Zasenčeni gubici aktivne snage grana (Tabela 8.4.3.) su veći nego u polaznoj konfiguraciji.
- Sa grafika na Slici 8.4.4. se vidi da je poslednje poboljšanje funkcije cilja ostvareno nakon 40000 itreacija tako da bi se shodno tome vreme proračuna moglo prepoloviti ako se sa 100000 iteracija program inicira sa 40000 iteracija.
- Kod velikih mreža kakva je ova, s obzirom na vreme proračuna i izgenerisanu konfiguraciju, prednost treba dati drugim metodama a metodu simuliranog kaljenja prevashodno koristiti u fazi planiranja.

8.5. Višekriterijumska optimizacija

Jednokriterijumska optimizacija sa minimizacijom gubitaka snage kao funkcijom cilja je u literaturi mnogo prisutnija od višekriterijumske [2, 43, 60, 68, 70-74].

Komponente funkcije cilja kod višekriterijumske optimizacije su najčešće gubici aktivne snage, maksimalni pad napona, simetriranje opterećenja (struja deonica u odnosu na njihove nominalne vrednosti), minimalan broj komutacija (za koji bi bilo najkorektnije pri primeni poznavati cenu komutacije), pouzdanost, itd. Svi ovi faktori ulaze u funkciju cilja sa unapred izabranim težinskim koeficijentima.

Najnoviji, sve prisutniji vid višekriterijumske optimizacije je minimizacija gubitaka na isporučenu električnu energiju (koliko god da ima nivoa potrošnje), maksimalnu snagu (za vršni nivo opterećenja), cenu ugrađenih kondenzatorskih baterija (koje su uvek dobro došle kod slabo kompenzovanih mreža) i sve češće prisutnost distribuiranih generatora, kakva god da je njihova ekonomska pozadina ugradnje.

Analize u vezi poslednjeg komentara vezanog za distribuirane generatore prevazilaze obim ove disertacije.

Gore rečeno znači da su se distributivni inženjeri, u najnovijim istraživanjima, umesto jednostrukoj optimizaciji po gubicima, okrenuli složenijim ekonomskim i praktičnim problemima rada distributivnih mreža.

U ovom radu analizirana je višekriterijumska funkcija cilja koja se sastoji od gubitaka snage u kW i maksimalnog pada napona u procentima sa jediničnim težinskim koeficijentima i druga, ekonomska funkcija cilja koja se sastoji od cene gubitaka aktivne snage u \$ (120\$/kW), cene ugrađenih kondenzatorskih baterija pomnožene godišnjom stopom (0.15) ako se ugrađuju kondenzatorske baterije u \$ i cene komutacija u \$, za mrežu Baran-a i Wu-a [6] i mrežu Jiang [101]. Mreža [51] sa 15 spojnih grana nije analizirana zbog predugačkog vremena egzekucije programa (duže od 10 dana) da bi se dobila prihvatljiva rešenja.

Cena kondenzatorske baterije data je u Tabeli 8.5.1.

Tabela 8.5.1. Cena kondenzatorske baterije (\$)

snaga baterije	> 0, ≤ 300 kVar	> 300, ≤ 600 kVar	> 600, ≤ 900 kVar	> 900, ≤ 1200 kVar	> 1200 kVar
cena	1900 \$	3200 \$	4500 \$	5400 \$	6000 \$
Cena održavanja i montaže uključena je u fiksni deo cene kondenzatorske baterije					

Za cenu komutacija uzeta je vrednost od 50\$/komutaciji nezavisno da li se radi o otvaranju ili zatvaranju rasklopnog uređaja. U literaturi [22] ova vrednost je 23\$/komutaciji. Cena je ista za oba tipa rastavnih uređaja (ručni ili automatski) jer se radi o dugoročnom planiranju za jedan isti nivo potrošnje (nominalni). Analiza cene komutacija za nekoliko nivoa potrošnje (godišnja) je izostala zbog složenosti (zapamćivanja polaznog statusa rasklopnih uređaja za svaki nivo potrošnje). Ograničenje maksimalnog broja komutacija po jednom rastavnom uređaju kod višekriterijumske optimizacije za jedan nivo potrošnje nema smisla analizirati jer on u posmatranom periodu komutuje jedanput (otvara se ili zatvara).

Rezultati gore opisane višekriterijumske optimizacije dati su tabelarno (Tabela 8.5.2. za mrežu Baran-a i Wu-a [6] i Tabela 8.5.3. za mrežu Jiang [101]) nakon čega sledi njihova analiza.

8. Numerički rezultati

Tabela 8.5.2. Rezultati višekriterijumske optimizacije za mrežu Baran-a i Wu-a [6], primenjen nehomogeni algoritam simuliranog kaljenja sa sledećim parametrima $ICOUNT < 20000$, pravilo snižavanja temperature $T = 0.95 * T$ i stopa prihvatanja a.r. < 0.001

Višekriterijumska funkcija (1)	P_{loss} (kW) (2)	cos ϕ ulazni faktor snage (3)	otvorene grane (4)	minimalni napon čvora ** (r.j.) (5)	baterija (MVar)/čvor*** (6)	broj komutacija (7)	funkcija cilja (8)	cena (\$) (9)	vreme izvršenja programa (min) (10)
polazna konfiguracija	202.6771	0.8490	33 34 35 36 37	0.913 (18)	/	/	/	/	/
gubitak aktivne snage (kW)	139.5513	0.8486	37 32 14 9 7	0.938 (32)	/	/	139.5513	/	3* min
gubitak aktivne snage (kW) + max pad napona (%)	139.5513	0.8486	37 32 14 9 7	0.938 (32)	/	/	145.7694	/	3* min
gubitak aktivne snage (kW) *120\$/kW+ broj komutacija* 50\$/komutaciji	139.5513	0.8486	37 32 14 9 7	0.938 (32)	/	4 zatvaranja + 4 otvaranja	17146\$	17146	6* min
gubitak aktivne snage (kW) *120\$/kW+ cena kondenzatorskih baterija (\$) *0.15	97.9408	0.9890	37 36 34 11 7	0.956 (33)	0.6 (12) 0.3 (23) 0.9 (29)	/	13193\$	13193	ICOUNT<3000 MATLAB 7 Pentium IV PC 2,4 GHz; 512 MB RAM, 15 min
gubitak aktivne snage (kW) *120\$/kW+ cena kondenzatorskih baterija (\$) *0.15+ broj komutacija* 50\$/komutaciji	97.9408	0.9890	37 36 34 11 7	0.956 (33)	0.6 (12) 0.3 (23) 0.9 (29)	2 zatvaranja + 2 otvaranja	13393\$	13393	ICOUNT<3000 MATLAB 7 Pentium IV PC 2,4 GHz; 512 MB RAM, 26 min

* Računar: Pentium IV PC; Intel core i7-4770, 3,4 GHz, 32 GB RAM, MATLAB R2010a, ** sa nultim čvorom, *** bez nultog čvora.

8. Numerički rezultati

Tabela 8.5.3. Rezultati višekriterijumske optimizacije za mrežu Jiang [101], primenjen nehomogeni algoritam simuliranog kaljenja sa sledećim parametrima $ICOUNT < 100000$, pravilo snižavanja temperature $T = 0.99 * T$ i stopa prihvatanja $a.r. < 0.001$

Višekriterijumska funkcija (1)	P_{loss} (kW) (2)	cos ϕ ulazni faktor snage (3)	otvorene grane (4)	minimalni napon čvora ** (r.j.) (5)	baterija (MVar)/čvor*** (6)	broj komutacija (7)	funkcija cilja (8)	cena (\$) (9)	vreme izvršenja programa (min) (10)
polazna konfiguracija	225.0006	0.8212	69 70 71 72 73	0.909 (65)	/	/	/	/	/
gubitak aktivne snage (kW)	99.6052	0.8113	70 69 61 57 14	0.943 (61)	/	/	99.6052	/	30* min
gubitak aktivne snage (kW) + max pad napona (%)	99.6052	0.8113	70 69 61 57 14	0.943 (61)	/	/	105.3052	/	30* min
gubitak aktivne snage (kW) *120\$/kW+ broj komutacija* 50\$/komutaciji	99.6052	0.8113	70 69 61 57 14	0.943 (61)	/	3 zatvaranja + 3 otvaranja	12253\$	12253	54* min
gubitak aktivne snage (kW) *120\$/kW+ cena kondenzatorskih baterija (\$) *0.15	79.4439	0.9253	63 54 18 14 9	0.955 (61)	0.6 (21) 0.3 (60) 0.3 (62)	/	10583\$	10583	62* min
gubitak aktivne snage (kW) *120\$/kW+ cena kondenzatorskih baterija (\$) *0.15+ broj komutacija* 50\$/komutaciji	83.0913	0.9004	69 61 54 15 12	0.954 (62)	0.9 (60)	4 zatvaranja + 4 otvaranja	11046\$	11046	81* min

* Računar: Pentium IV PC; Intel core i7-4770, 3,4 GHz, 32 GB RAM, MATLAB R2010a, ** sa nultim čvorom, *** bez nultog čvora.

Analizom rezultata Tabele 8.5.2. za posmatranu mrežu [6] zaključuje se:

1. Kada funkcija cilja minimizira vrednosti gubitaka aktivne snage kojoj je još dodat maksimalni pad napona nezavisnog čvora u procentima, dobija se ista konfiguracija kao kada se minimizira samo gubitak aktivne snage (u iznetom primeru to je i globalni optimum). Ovim je dokazan zaključak autora [30] da rekonfiguracija u svrhu smanjenja gubitaka implicitno popravlja naponsku sliku mada optimizacija samo po gubicima i samo po naponu ne mora uvek dati istu konfiguraciju. U analizama je prihvaćena tolerancija napona od 10% u odnosu na nulti čvor koja je zadovoljena.
2. Kada funkcija cilja minimizira cenu gubitaka aktivne snage kojoj je dodata i cena izvršenog broja komutacija dobija se opet ista konfiguracija kao kada se minimiziraju samo gubici aktivne snage (globalni optimum). Dobijeni rezultat se može tumačiti da gubici aktivne snage zbog velikog penalizacionog faktora (težinskog koeficijenta od 120\$/kW) imaju primat.
3. Za obe gore navedene konfiguracije ulazni faktor snage ($\cos\phi$), kod napojnog čvora, je manji od 0.85 što je usvojeno kao minimalna dozvoljena vrednost pa mrežu treba kompenzovati otočnim kondenzatorskim baterijama.
4. Za minimiziranje cene gubitaka i cene otočnih kondenzatorskih baterija dobija se drugačija konfiguracija (potrošnje reaktivne snage u nezavisnim čvorovima su se promenile). Ulazni faktor snage je u ovom slučaju nakon optimizacije veći od 0.85. Dobijena cena je manja od cene u prethodnom slučaju kada se penališu gubici aktivne snage sa svojom cenom i broj komutacija sa svojom.
5. Poslednji analizirani slučaj uzima u obzir trostruku funkciju cilja (minimizira se cena gubitaka, cena kondenzatorskih baterija i cena komutacija). Dobijena je ista konfiguracija kao u prethodnom slučaju minimizacije cene gubitaka aktivne snage i cene kondenzatorskih baterija za mrežu primer što ne mora biti i generalno pravilo.

Analizom rezultata Tabele 8.5.3. za posmatranu mrežu [101] zaključuje se:

1. Kada funkcija cilja minimizira vrednosti gubitaka aktivne snage kojoj je još dodat maksimalni pad napona nezavisnog čvora u procentima, dobija se ista konfiguracija kao kada se minimizira samo gubitak aktivne snage (u iznetom primeru se ne zna globalni optimum). Ovim je dokazan zaključak autora [30] da rekonfiguracija u svrhu smanjenja gubitaka implicitno popravlja naponsku sliku mada optimizacija samo po gubicima i samo po naponu ne mora uvek dati istu konfiguraciju. U analizama je prihvaćena tolerancija napona od 10% u odnosu na nulti čvor koja je zadovoljena.
2. Kada funkcija cilja minimizira cenu gubitaka aktivne snage kojoj je dodata i cena izvršenog broja komutacija dobija se opet ista konfiguracija kao kada se minimiziraju samo gubici aktivne snage. Dobijeni rezultat se može tumačiti da gubici aktivne snage zbog velikog penalizacionog faktora (težinskog koeficijenta od 120\$/kW) imaju primat.
3. Za obe gore navedene konfiguracije ulazni faktor snage ($\cos\phi$), kod napojnog čvora, je manji od 0.85 što je usvojeno kao minimalna dozvoljena vrednost pa mrežu treba kompenzovati otočnim kondenzatorskim baterijama.
4. Za minimiziranje cene gubitaka i cene otočnih kondenzatorskih baterija dobija se drugačija konfiguracija (potrošnje reaktivne snage u nezavisnim čvorovima su se promenile). Ulazni faktor snage je u ovom slučaju nakon optimizacije veći od 0.85. Dobijena cena je manja od cene u prethodnom slučaju kada se penališu gubici aktivne snage sa svojom cenom i broj komutacija sa svojom.
5. Poslednji analizirani slučaj uzima u obzir trostruku funkciju cilja (minimizira se cena gubitaka, cena kondenzatorskih baterija i cena komutacija). Dobijena je različita konfiguracija nego u prethodnom slučaju minimizacije cene gubitaka aktivne snage i cene kondenzatorskih baterija (što nije važno za primer mreže [6]), što znači da u ovom slučaju odluku treba doneti nakon analize rezultata odgovarajućeg programa.

8.6. Pareto višekriterijumska optimizacija

Pri rešavanju problema višekriterijumske optimizacije operater je zainteresovan za Pareto optimalna rešenja pre nego za optimizaciju pojedinačnih komponenti funkcije cilja. Kako algoritam simuliranog kaljenja pretražuje prostor različitih konfiguracija mreže on je sposoban da izgeneriše višestruka Pareto optimalna rešenja istovremeno. Ako sve funkcije cilja treba minimizirati podobno rešenje x dominira nad drugim podobnim rešenjem y ($x < y$), ako i samo ako $z_i(x) \leq z_i(y)$ za $i=1, \dots, k$ i $z_j(x) < z_j(y)$ za najmanje jednu komponentu funkcije cilja (jednostruku funkciju cilja) j . $z_i, i=1, \dots, k$ su komponente funkcije cilja. Za rešenje se kaže da je Pareto optimalno ako njemu ne dominira nijedno drugo rešenje iz prostora rešenja. Pareto optimalno rešenje se ne može popraviti u pogledu bilo koje komponente a da se ne „pokvari“ najmanje jedna od komponenti funkcije cilja. Skup svih podobnih nedominantnih rešenja u prostoru rešenja se naziva Pareto optimalnim skupom i za njega se odgovarajuće vrednosti funkcija cilja, u prostoru rešenja, nazivaju Pareto front. Metodom simuliranog kaljenja se lako iznalazi skup nedominantnih rešenja.

Osnovna razlika višekriterijumske optimizacije iz Poglavlja 9.5. i optimizacije iz reference [113] je u normalizovanim elementima funkcije cilja koji ih čine samerljivim.

Funkcija cilja F ima sledeću formu:

$$F = \omega_1 f_1 + \omega_2 f_2 + \omega_3 f_3 \quad (8.6.1)$$

U izrazu (8.6.1) ω_1, ω_2 i ω_3 su težinski koeficijenti koje bira operater dajući pojedinačnim funkcijama cilja f_1, f_2 i f_3 veću ili manju važnost.

$$f_1 = \min \sum_{i=1}^{N_{br}} R_i \frac{P_{r,i}^2 + Q_{r,i}^2}{|U_{r,i}|^2}$$

$$f_2 = \min \left(\max_{i \in [1, N_{nod}]} (1 - |U_i|) * 100 \right) \quad (8.6.2)$$

$$f_3 = \min \sum_{i=1}^{N_{br}} \frac{|I_i|}{I_{max}}$$

U izrazu (8.6.2) f_1 predstavlja ukupne gubitke aktivne snage, f_2 je maksimalni pad napona za posmatranu mrežu a f_3 je suma relativnih vrednosti struja grana normalizovanih maksimalnom strujom grane za kompletnu mrežu i predstavlja faktor simetriranja opterećenja kako je koncipiran u ovoj disertaciji (moguće su i druge formulacije [50]).

Ostale oznake u jednakosti (8.6.2) imaju sledeće značenje:

R_i - aktivna otpornost grane i ,

$P_{r,i}$ - aktivna snaga injektirana u granu i na njenom prijemnom čvoru,

$Q_{r,i}$ - reaktivna snaga injektirana u granu i na njenom prijemnom čvoru,

$U_{r,i}$ - efektivna vrednost napona na kraju grane i ,

U_i - efektivna vrednost napona čvora i u r.j. (relativnim jedinicama u odnosu na napon napojnog čvora),

I_i - efektivna vrednost struje grane i ,

I_{max} - maksimalna struja za posmatranu mrežu,

N_{br} - broj grana mreže i

N_{nod} - broj čvorova mreže.

Funkcije cilja f_1, f_2 i f_3 u izrazu (8.6.1) su normalizovane:

$$f_{iT} = \frac{f_i + f_{i \min}}{f_{i \max} + f_{i \min}} \quad (8.6.3)$$

f_i - i -ta funkcija cilja generisana potprogramom,

$f_{i\min}$ - minimalna vrednost i -te funkcije cilja generisane potprogramom do trenutka njenog sračunavanja,

$f_{i\max}$ - maksimalna vrednost i -te funkcije cilja generisane potprogramom do trenutka njenog sračunavanja,

f_{iT} - i -ta normalizovana funkcija cilja.

Blok dijagram glavnog programa primenjenog algoritma dat je na Slici 5.4.2. s tim što sada više nije reč o jednokriterijumskoj optimizacija pa umesto izraza P_{loss} treba da stoji F .

Pareto optimizacija simuliranim kaljenjem podrazumeva generisanje funkcija cilja, najmanjih do trenutka njihovog izračunavanja potprogramom s tim što se mogu prihvatiti i veće funkcije cilja kako je to regulisano samim algoritmom čime se izbegava terminiranje algoritma u lokalnom optimumu.

Mehanizam poremećaja algoritma omogućava diverzifikaciju, ravnomerno pretraživanje prostora konfiguracija svojom probabilističkom formulacijom (generator slučajnih brojeva) i intenzifikaciju (zaustavljanje na regiji globalnog optimuma i njenom pretraživanju) primenom Metropolis algoritma kako se sistem polako hladi.

Rezultati optimizacije dati su u Tabelama 8.6.1. i 8.6.2.

Tabela 8.6.1. Rezultati Pareto višekriterijumske optimizacije za mrežu Baran-a i Wu-a [6], primenjen nehomogeni algoritam simuliranog kaljenja sa sledećim parametrima ICOUNT<20000, pravilo snižavanja temperature $T=0.95*T$ i stopa prihvatanaj a.r.<0.001

Provera	Težinski koeficijenti			Konfiguracija	Kriterijumske funkcije			CPU min*
	ω_1	ω_2	ω_3		f1(kW)	f2(%)	f3(r.j.)	
polazna	-	-	-	33 34 35 36 37	202.6771	8.6910	7.6084	-
1	1	0	0	37 34 32 11 6	144.4119	6.433	6.7485	3
2	0	1	0	36 34 28 8 6	152.4084	6.1448	5.9870	4
3	0	0	1	36 27 14 11 7	146.6939	6.3674	5.7892	4
4	0.7	0.3	0	36 28 13 10 7	145.8678	6.2210	5.7950	4
5	0.3	0.7	0	36 34 28 8 6	152.4084	6.1448	5.9870	3
6	0.8	0	0.2	36 28 13 10 7	145.8678	6.2210	5.7950	4
7	0.5	0	0.5	36 28 13 10 7	145.8678	6.2210	5.7950	5
8	0	0.7	0.3	36 28 13 10 7	145.8678	6.2210	5.7950	4
9	0	0.3	0.7	36 28 13 10 7	145.8678	6.2210	5.7950	4
10	0.33	0.33	0.33	36 28 13 10 7	145.8678	6.2210	5.7950	4
11	0.3	0.4	0.3	36 28 13 10 7	145.8678	6.2210	5.7950	4
12	0.5	0.2	0.3	36 28 13 10 7	145.8678	6.2210	5.7950	6

*Računar: Pentium IV PC, Intel core i7-4770, 3,4 GHz, 32 GB RAM

Tabela 8.6.2. Rezultati Pareto višekriterijumske optimizacije za mrežu Jiang [101], primenjen nehomogeni algoritam simuliranog kaljenja sa sledećim parametrima ICOUNT<100000, pravilo snižavanja temperature $T=0.99*T$ i stopa prihvatanja a.r.<0.001

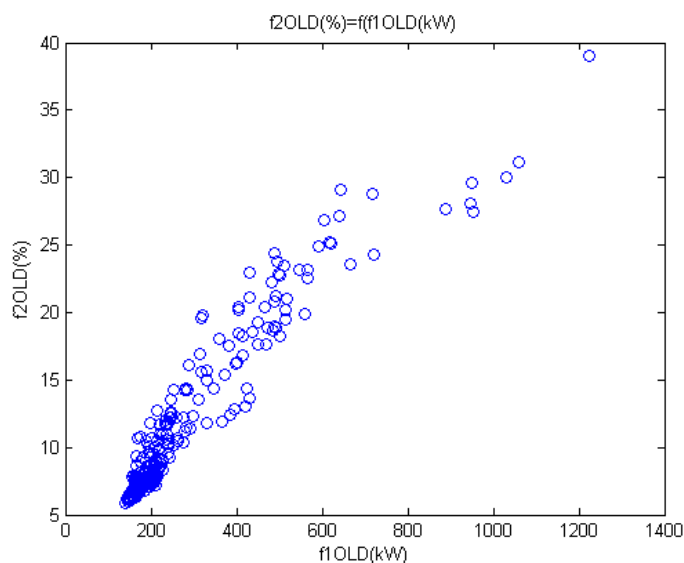
Provera	Težinski koeficijenti			Konfiguracija	Kriterijumske funkcije			CPU min*
	ω_1	ω_2	ω_3		f1(kW)	f2(%)	f3(r.j.)	
polazna	-	-	-	69 70 71 72 73	225.006	9.0811	13.1791	-
1	1	0	0	70 69 61 57 14	99.6052	5.7242	11.2176	33
2	0	1	0	70 61 58 13 4	116.2531	5.7225	11.7968	32
3	0	0	1	69 58 24 17 14	130.0169	7.5718	9.5992	32

8. Numerički rezultati

4	0.7	0.3	0	70 69 61 57 14	99.6052	5.7242	11.2176	31
5	0.3	0.7	0	70 69 61 57 14	99.6052	5.7242	11.2176	-
6	0.8	0	0.2	69 62 55 18 13	106.7393	5.8605	10.2022	31
7	0.5	0	0.5	73 69 56 19 14	125.3168	7.3655	9.6316	31
8	0	0.7	0.3	69 61 58 17 14	109.9868	5.7252	10.2923	31
9	0	0.3	0.7	69 64 58 17 13	121.3916	7.0066	9.7103	33
10	0.33	0.33	0.33	69 62 55 18 13	106.7393	5.8605	10.2022	36
11	0.3	0.4	0.3	69 61 57 18 13	106.1690	5.7256	10.3068	32
12	0.5	0.2	0.3	69 62 55 18 13	106.7393	5.8605	10.2022	34

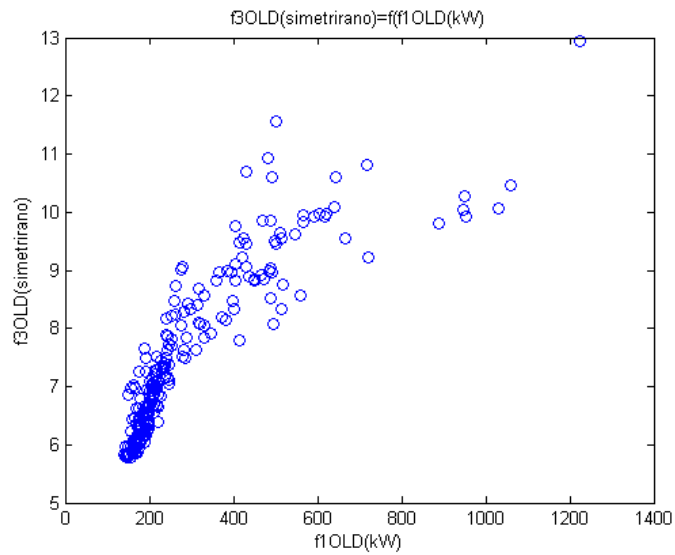
*Računar: Pentium IV PC, Intel core i7-4770, 3,4 GHz, 32 GB RAM

Zavisnosti $f_2=f(f_1)$, $f_3=f(f_1)$, $f_3=f(f_2)$, $f_3=f(f_1, f_2)$, $F=f(\text{ICOUNT})$ i $F=f(T)$ date su na Slikama 8.6.1.- 8.6.6. respektivno, za mrežu Baran-a i Wu-a [6], provera 12. OLD je oznaka za prihvaćenu vrednost funkcije cilja tokom izvršenja algoritma.

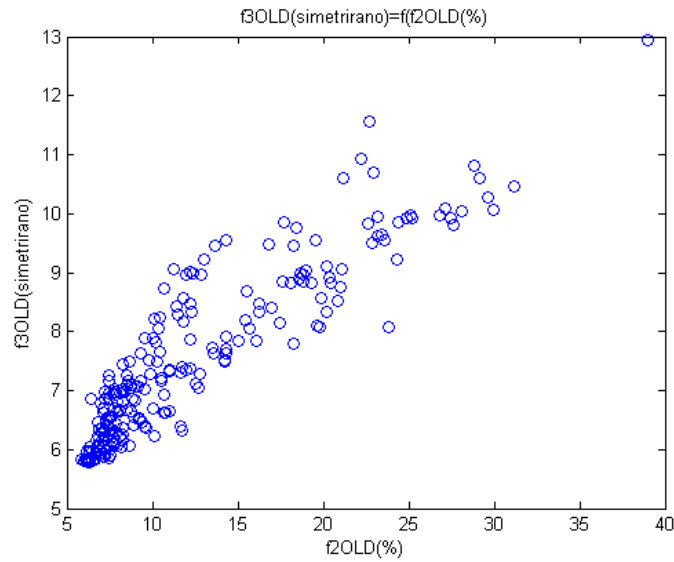


Slika 8.6.1. Zavisnost $f_2=f(f_1)$ za mrežu Baran-a i Wu-a, provera 12

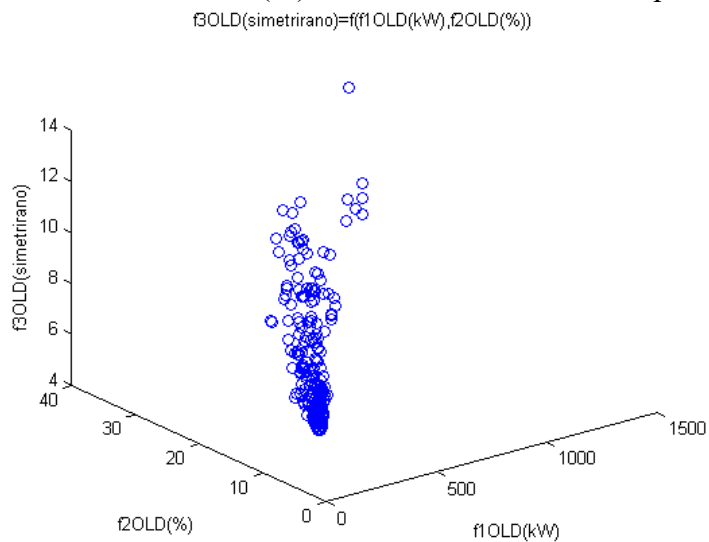
8. Numerički rezultati



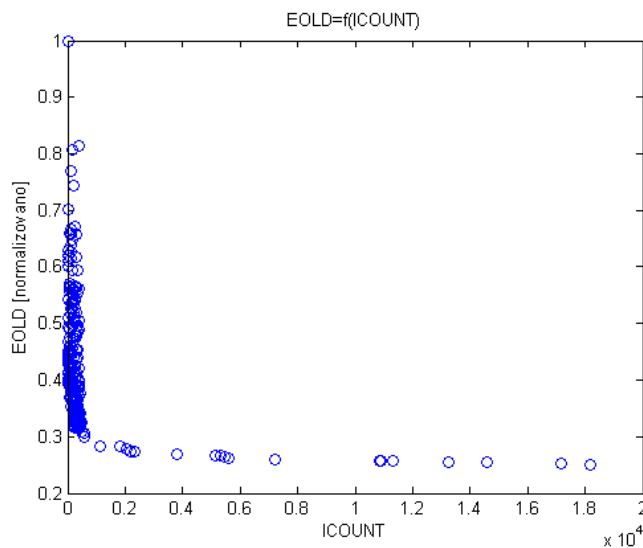
Slika 8.6.2. Zavisnost $f3=f(f1)$ za mrežu Baran-a i Wu-a, provera 12



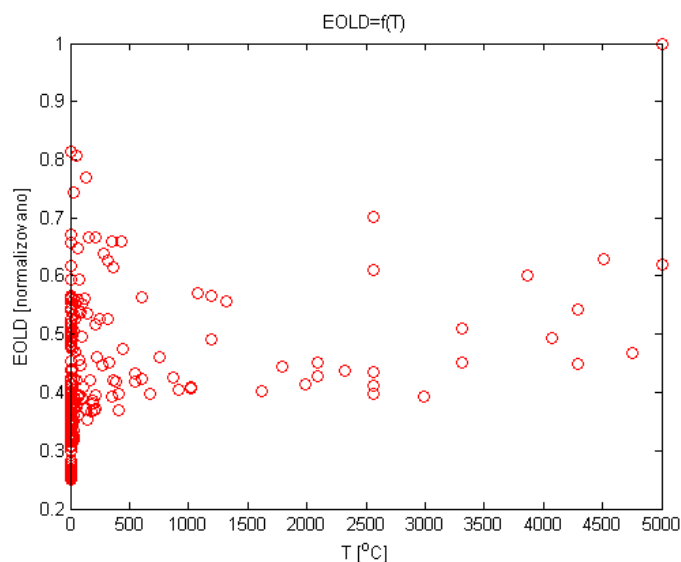
Slika 8.6.3. Zavisnost $f3=f(f2)$ za mrežu Baran-a i Wu-a, provera 12



Slika 8.6.4. Zavisnost $f3=f(f1, f2)$ za mrežu Baran-a i Wu-a, provera 12



Slika 8.6.5. Zavisnost $F=f(\text{ICOUNT})$, $F=\text{EOLD}$ (normalizovano) za mrežu Baran-a i Wu-a, provera 12



Slika 8.6.6. Zavisnost $F=f(T)$, $F=\text{EOLD}$ (normalizovano) za mrežu Baran-a i Wu-a, provera 12

Analiza rezultata Tabela 8.6.1. i 8.6.2. pokazuje da se u svim slučajevima dobijaju vrednosti bolje nego kod polazne konfiguracije. Takođe je prisutan i slučaj identičnih konfiguracija kod različitih funkcija cilja.

Analiza se može vršiti i za drugačije koncipirane funkcije cilja ali smo u ovoj disertaciji sledili primer iz reference [113].

9. SIMULTANA REKONFIGURACIJA I OTOČNA KOMPENZACIJA DISTRIBUTIVNIH MREŽA PRIMENOM METODE SIMULIRANOG KALJENJA

Optimalna rekonfiguracija i otočna kompenzacija omogućavaju ekonomičan i pouzdan rad distributivne mreže smanjujući gubitke aktivne snage, poboljšavajući naponsku sliku i popravljajući ulazni faktor snage koji je mnogo bolji nego samo kod primenjene rekonfiguracije mreže (Tabela 8.5.2. i 8.5.3. Poglavlje 8.5.). Problemi rekonfiguracije i otočne kompenzacije pojedinačno su detaljno razmatrani u literaturi [6, 7, 9, 40, 41, 114, 115 i dr.] već duže vremena. Problem rekonfiguracije distributivne mreže detaljno je opisan u Poglavljima 1.1. i 1.2. ove disertacije. Sam problem otočne kompenzacije ogleda se u iznalaženju optimalne lokacije (čvora mreže), veličine i tipa kondenzatorske baterije za ugradnju. Oba navedena problema su NP kompleksni kombinatorijski optimizacioni problemi sa nediferencijabilnom funkcijom cilja (kod rekonfiguracije mreže prostor pretraživanja je diskontinualan sobzirom na binarni status zatvoreno-otvoreno prekidača dok je kod kompenzacije funkcija cene kondenzatorskih baterija stepenasta i nediferencijabilna) gde NP označava da oni nisu vremenski rešivi polinomom dimenzije problema (eng. *Non-deterministically in Polynomial-bounded time*) već da vreme rešavanja raste eksponencijalno sa dimenzijom problema. Metode prevođenja nediferencijabilne funkcije cilja u diferencijabilnu [83] još kod nas nisu u potpunosti prihvaćene, tako da rešavanje ova dva problema gledanih kao jedan primenom metode simuliranog kaljenja dobija pun smisao. Kod rekonfiguracije mreže dimenzija problema je broj komutujućih elemenata a kod otočne kompenzacije broj potencijalnih čvorova za ugradnju kondenzatorskih baterija. Sama otočna kompenzacija je često primenjivana radi korekcije faktora snage, smanjenja gubitaka aktivne snage, smanjenja gubitaka na isporučenu električnu energiju, regulaciju napona i povećanja proizvodnih kapaciteta u pogledu prividne snage. Svaka od navedenih koristi i njihov obim u velikoj meri zavise od mesta, veličine i tipa ugrađenih kondenzatorskih baterija ali i od njihove cene. Generalni problem postavljanja kondenzatorskih baterija primenom metode simuliranog kaljenja analiziran je u referencama [114, 115].

Neophodnost uzimanja u obzir oba već navedena metoda radi smanjenja gubitaka aktivne snage distributivne mreže prezentovana je u referencama [43, 78-80, 101, 111]. U njima je zaključeno da se gubici najviše smanjuju pri simultanoj rekonfiguraciji i otočnoj kompenzaciji u poređenju sa pojedinačnim primenama ovih algoritama nezavisno od toga koji je prvi. U obzir nije uzeta cena ugrađenih kondenzatorskih baterija već samo veličina gubitaka što nije realno. U analizi koja sledi na primeru mreže Baran-a i Wu-a biće pokazano da je za ovu mrežu najmanja cena postignuta kada se prvo dobije globalni optimum rekonfiguracijom a zatim primeni otočna kompenzacija sa vrlo strogim parametrima metode simuliranog kaljenja (ICOUNT= 10 000 000 dužina Markov-ljevog lanca, EPOCH<0.00001 i a.r.<0.00001 stopa prihvatanja). Posmatra se nominalni nivo opterećenja. Funkcija cilja se sastoji od cene gubitaka aktivne snage u \$ (120\$/kW) i cene ugrađenih kondenzatorskih baterija pomnožene godišnjom stopom (0.15). Obe ove vrednosti i cena ugrađenih kondenzatorskih baterija data u Tabeli 8.5.1. (Poglavlje 8.5.) uzete su iz reference [116]. Pri tome je gubitak na isporučenu električnu energiju zanemaren. Za svaku izgenerisanu konfiguraciju (rešenje) sračunavan je minimalni napon čvora mreže i njen ulazni faktor snage.

Prvi deo ovog poglavlja posvećen je rekonfiguraciji distributivne mreže i njenoj otočnoj kompenzaciji kada je zanemaren gubitak na isporučenu električnu energiju (uzet u obzir jedan nivo potrošnje), na primeru mreže Baran-a i Wu-a, a drugi simultanoj rekonfiguraciji i otočnoj kompenzaciji u svrhu smanjenja gubitaka na isporučenu električnu energiju sa prisutnim kako fiksnim tako i regulacionim kondenzatorskim baterijama koji nije mnogo obrađivan u literaturi [55, 56, 66, 73, 82-84,]. U referencama [66, 73] analiziraju se još i distribuirani generatori što nije tema ove disertacije.

U oba dela se pominje maksimalna i minimalna snaga ugrađenih kondenzatorskih baterija pa će prvo ona biti analizirana.

Neka se usvoje sledeće oznake:

9. Simultana rekonfiguracija i otočna kompenzacija distributivnih mreža primenom metode simuliranog kaljenja

Q_{bmax} - maksimalna ukupna snaga instalisanih kondenzatorskih baterija za određeni nivo potrošnje (kVAr),

Q_{loss} - gubici reaktivne snage za „suvu” mrežu, mrežu bez ugrađenih kondenzatorskih baterija za određeni nivo potrošnje (kVAr),

Q_{dem} - reaktivna potrošnja određenog nivoa (kVAr),

Q_{bmin} - minimalna ukupna snaga instalisanih kondenzatorskih baterija za određeni nivo potrošnje (kVAr) i

P_{00} - aktivna snaga napojnog čvora za određeni nivo potrošnje (kW).

Moraju da budu ispunjena sledeća dva uslova, jednakost (9.1) da mreža ne bi bila prekompenzovana i (9.2) da bi se imao ulazni faktor snage ($\cos \varphi$), kod napojnog čvora, veći od 0.85:

$$Q_{bmax} = Q_{loss} + Q_{dem} \quad (9.1)$$

$$Q_{bmin} = Q_{loss} + Q_{dem} - P_{00} * \frac{\sqrt{1 - 0.85^2}}{0.85} \quad (9.2).$$

Gornje dve jednakosti daju samo grube granice i ograničavaju prostor konfiguracija (populaciju) a realnu situaciju je potrebno konkretno proveriti (u pogledu prekompenzovanosti i ulaznog faktora snage).

9.1. Rekonfiguracija distributivne mreže i otočna kompenzacija kada su zanemareni gubici na isporučenu električnu energiju

Na Slici 9.1.1. dat je blok dijagram za slučaj simultane rekonfiguracije i otočne kompenzacije.

Korišćene su sledeće oznake:

T - temperatura (početna 5000),

$QBKOLD$ - „suva” mreža, mreža bez ugrađenih kondenzatorskih baterija,

$E = (E_1 * 0.15 + 120 * P_{loss})$ - funkcija cilja za tekuću konfiguraciju (\$),

E_1 - ukupna cena svih ugrađenih kondenzatorskih baterija (\$),

P_{loss} - 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 \$,

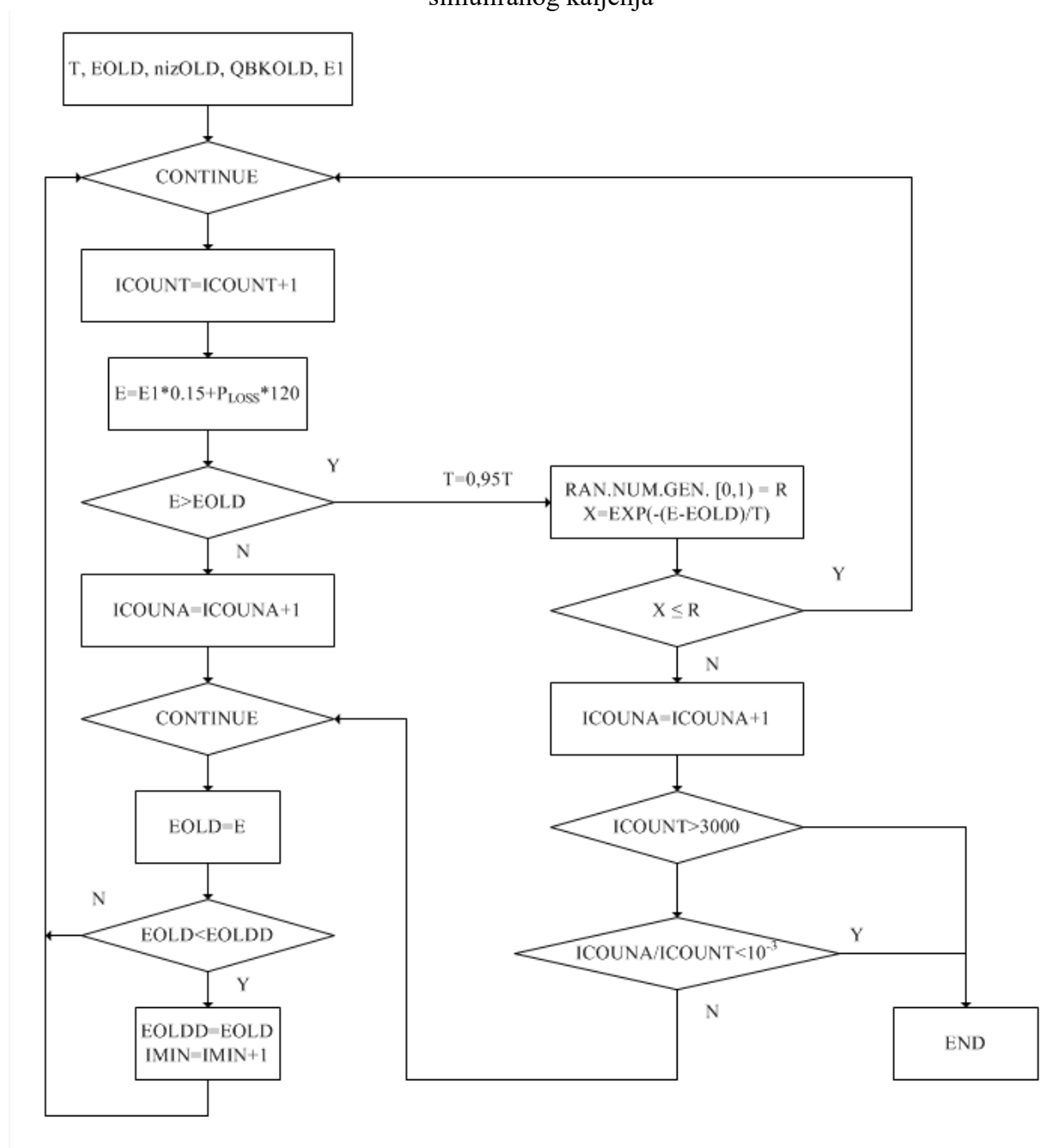
Niz - vektor koji označava otvorene grane za tekuću konfiguraciju,

$nizOLD$ - 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 9.1.1. prikazan je nehomogeni algoritam.



Slika 9.1.1. Blok dijagram za slučaj simultane rekonfiguracije i otočne kompenzacije (nehomogeni algoritam)

Tabele 9.1.1., 9.1.2. i 9.1.3. 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) za mrežu Baran-a i Wu-a.

Zasenčene cifre u | V | r.j. koloni označavaju najniži napon sabirnice.

Zasenčene cifre u koloni grana Ploss označavaju gubitke u granama koji su veći nego kod polazne konfiguracije.

9. Simultana rekonfiguracija i otopna kompenzacija distributivnih mreža primenom metode simuliranog kaljenja

Tabela 9.1.1. Ulazni podaci i rezultati preciznog programa tokova snaga (Ploss=93.8 kW) za konfiguraciju sa sledećim otvorenim granama 37 32 14 9 i 7

(nule u A koloni),

čvor 8 (0.3 MVar baterija), čvor 24 (0.3 MVar baterija) i čvor 29 (0.9 MVar baterija),
 $\cos\varphi=0.9749$ (rekonfiguracija pa kompenzacija, 12511\$, Slika 8.5.)

grana	R (Ω)	X (Ω)	aktivna potrošnja čvora (kW)	reaktivna potrošnja čvora (kVAr)	V r.j.	modul struje grane (A)	grana aktivni gubici snage Ploss (MW)	grana reaktivni gubici snage 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	-	-

9. Simultana rekonfiguracija i otočna kompenzacija distributivnih mreža primenom metode simuliranog kaljenja

Tabela 9.1.2. Ulazni podaci i rezultati preciznog programa tokova snaga ($P_{loss}=93.3997$ kW) za konfiguraciju sa sledećim otvorenim granama 37 32 14 9 i 7 (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), $\cos\varphi=0.9890$ (kompenzacija pa rekonfiguracija, 12738\$)

grana	R (Ω)	X (Ω)	aktivna potrošnja čvora (kW)	reaktivna potrošnja čvora (kVAr)	V r.j.	modul struje grane (A)	grana aktivni gubici snage Ploss (MW)	grana reaktivni gubici snage 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		0.017	0.01
2-3	0.3660	0.1864	120.00	80.00	0.987		0.004	0.00
3-4	0.3811	0.1941	60.00	30.00	0.984		0.004	0.00
4-5	0.8190	0.7070	60.00	20.00	0.979		0.007	0.01
5-6	0.1872	0.6188	200.00	100.00	0.980		0.000	0.00
6-7	0.7114	0.2351	200.00	100.00	0.967	0	0	0.00
7-8	1.0300	0.7400	60.00	20.00	0.964		0.001	0.00
8-9	1.0440	0.7400	60.00	20.00	0.973	0	0	0.00
9-10	0.1966	0.0650	45.00	30.00	0.973		0.000	0.00
10-11	0.3744	0.1238	60.00	35.00	0.973		0.000	0.00
11-12	1.4680	1.1550	60.00	35.00	0.973		0.001	0.00
12-13	0.5416	0.7129	120.00	80.00	0.974		0.000	0.00
13-14	0.5910	0.5260	60.00	10.00	0.958	0	0	0
14-15	0.7463	0.5450	60.00	20.00	0.956		0.000	0.00
15-16	1.2890	1.7210	60.00	20.00	0.953		0.000	0.00
16-17	0.7320	0.5740	90.00	40.00	0.952		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	0.976		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	0.982		0.004	0.00
23-24	0.8960	0.7011	420.00	200.00	0.980		0.001	0.00
5-25	0.2030	0.1034	60.00	25.00	0.978		0.001	0.00
25-26	0.2842	0.1447	60.00	25.00	0.977		0.001	0.00
26-27	1.0590	0.9337	60.00	20.00	0.972		0.004	0.00
27-28	0.8042	0.7006	120.00	70.00	0.968		0.003	0.00
28-29	0.5075	0.2585	200.00	600.00	0.967		0.001	0.00
29-30	0.9744	0.9630	150.00	70.00	0.963		0.001	0.00
30-31	0.3105	0.3619	210.00	100.00	0.963		0.000	0.00
31-32	0.3410	0.5302	60.00	40.00	0.952	0	0	0
7-20, 33	2.000	2.000					0.006	0.01
8-14, 34	2.000	2.000					0.002	0.00
11-21, 35	2.000	2.000					0.002	0.00
17-32, 36	0.500	0.500					0.000	0.00
24-28, 37	0.500	0.500				0	0	0

9. Simultana rekonfiguracija i otočna kompenzacija distributivnih mreža primenom metode simuliranog kaljenja

Tabela 9.1.3. Ulazni podaci i rezultati preciznog programa tokova snaga ($P_{loss}=97.9408$ kW) za konfiguraciju sa sledećim otvorenim granama 36, 37, 34, 11 i 7 (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)	aktivna potrošnja čvora (kW)	reaktivna potrošnja čvora (kVAr)	V r.j.	modul struje grane (A)	grana aktivni gubici snage Ploss (MW)	grana reaktivni gubici snage 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	-	-

Najjeftinija konfiguracija se dobija posle rekonfiguracije (za nju se zna ciljni optimum) pa nakon nje izvršenjem kompenzacije (ICOUNT=10 000 000 dužina Markov-ljevog 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 93.8866 kW a cena je 12511\$. Zatim dolazi konfiguracija kod koje se prvo primenjuje kompenzacija pa rekonfiguracija (93.3997 kW i 12738\$). Poslednja je konfiguracija pri simultanom izvršenju rekonfiguracije i kompenzacije (97.9408 kW i 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. Treba napomenuti da su postignute znatne uštede u svim slučajevima jer je cena polazne konfiguracije 24312\$ (202.6 kW). Najmanji gubici su u slučaju prvo primene kompenzacije, pa onda rekonfiguracije (93.3997 kW), zatim kod rekonfiguracije, pa kompenzacije (93.8866 kW) i tek na kraju kod simultane rekonfiguracije i kompenzacije (97.9408 kW). Konfiguracije kada je prvo rekonfiguracija i kada je prvo kompenzacija su identične, razlikuju se samo u instalisanim baterijama i baš zbog cene baterija jeftinija je konfiguracija prvo primenjene rekonfiguracije mada ona ima neznatno veće gubitke. Gubici nisu najmanji kod simultane rekonfiguracije i kompenzacije kao što je to zaključeno u [101]. Naime, oni su najveći. Iz izvršene analize ne može se zaključiti koji prilaz je najbolji mada je simultani najbrži jer je CPU vreme najmanje i iznosi 26 min na računaru Pentium IV PC; 2,4 GHz; 512 MB u programskom jeziku MATLAB 7.

9.2. Rekonfiguracija i otočna kompenzacija distributivne mreže u svrhu smanjenja gubitaka na električnu energiju

Simultani problem rekonfiguracije mreže i otočne kompenzacije u svrhu smanjenja gubitaka na isporučenu električnu energiju sa prisutnim kako fiksnim tako i regulacionim kondenzatorskim baterijama nije mnogo obrađivan [54, 56, 66, 73, 82, 83, 84] pri čemu su njima pridodati još i distribuirani generatori [66, 73]. Glavni nedostatak pomenutih članaka je da nezavisno od test primera (bilo da su oni teoretske prirode ili uzeti iz prakse) redosled hijerarhije snaga uglavnom nije ispoštovan. Pod hijerarhijom snaga se podrazumeva da gubici aktivne snage usvojenih konfiguracija moraju da opadaju sa nivoom potrošnje što važi i za snage usvojenih regulacionih kondenzatorskih baterija a konačno i za distribuirane generatore koji nisu predmet ove disertacije.

Za funkciju cilja, kod ovog problema, korišćena je sledeća formula:

$$E_1 * 0.15 + P_{loss\ max} * 120 + 0.03 * (P_{loss\ max} * 1000 + P_{loss\ nom} * 6760 + P_{loss\ min} * 1000) \quad (9.2.1)$$

E_1 - cena kondenzatorskih baterija za maksimalni nivo opterećenja (\$),

0.15- godišnja stopa cene kondenzatorskih baterija,

$P_{loss\ max}$ - gubici aktivne snage maksimalnog nivoa potrošnje, vrednost maksimalnog nivoa potrošnje iznosi 150% vrednosti nominalnog nivoa potrošnje, (kW),

120 – penalizacioni faktor gubitaka aktivne snage (120 \$/kW),

0.03 – cena gubitaka na električnu energiju (0.03 \$/kWh),

1000 – trajanje maksimalnog nivoa potrošnje (1000 h, zima),

$P_{loss\ nom}$ - gubici aktivne snage nominalnog nivoa potrošnje, kW,

6760 – trajanje nominalnog nivoa potrošnje (6760 h, proleće i jesen),

$P_{loss\ min}$ - gubici aktivne snage minimalnog nivoa potrošnje, vrednost minimalnog nivoa potrošnje iznosi 80% vrednosti nominalnog nivoa potrošnje, (kW) i

1000 – trajanje minimalnog nivoa potrošnje (1000h, leto).

Cena ugrađenih kondenzatorskih baterija data u Tabeli 8.5.1. (Poglavlje 8.5.) uzeta je iz reference [116]. Analizirana je mreža Baran-a i Wu-a.

Blok dijagram nehomogenog algoritma simuliranog kaljenja primenjenog na slučaj postavljanja fiksnih kondenzatorskih baterija dat je na Slici 9.2.1. a za slučaj postavljanja regulacionih baterija na Slici 9.2.2.

Za unutrašnju petlju kompenzacije, program za regulacione baterije, primenjeno je pretraživanje svih izgenerisanih konfiguracija u pogledu najmanjeg gubitka aktivne snage distributivne mreže za srednji i minimalni nivo potrošnje.

Usvojene su sledeće oznake na blok dijagramima:

P_{loss} - gubici aktivne snage tekuće konfiguracije (kW),

9. Simultana rekonfiguracija i otočna kompenzacija distributivnih mreža primenom metode simuliranog kaljenja

E - funkcija cilja za poslednju izgenerisanu konfiguraciju algoritmom simuliranog kaljenja (\$),
 $EOLD$ - funkcija cilja za poslednju prihvaćenu konfiguraciju algoritmom simuliranog kaljenja (\$),
 $EOLDD$ - minimalna funkcija cilja tokom celog algoritma simuliranog kaljenja („pohlepno“ pretraživanje svih izgenerisanih konfiguracija) u \$,

niz - vektor koji označava grane poslednje izgenerisane konfiguracije algoritmom simuliranog kaljenja,

$nizOLD$ - vektor koji označava otvorene grane za poslednju prihvaćenu konfiguraciju algoritmom simuliranog kaljenja,

$nizOLDD$ - vektor koji označava otvorene grane vezan za $EOLDD$ funkciju cilja,

QBK - vektor koji označava instalirane kondenzatorske baterije algoritmom za poslednju izgenerisanu konfiguraciju (kVAr),

$QBKOLD$ - vektor koji označava instalirane kondenzatorske baterije algoritmom za poslednju prihvaćenu konfiguraciju (kVAr),

$QBKOLDD$ - vektor koji označava instalirane kondenzatorske baterije vezane za $EOLDD$ funkciju cilja,

$IMIN$ - broj izgenerisanih minimalnih konfiguracija (monitorisanjem „pohlepnog“ pretraživanja u opadajućem redosledu),

1,2,3 - brojevi koji označavaju maksimalni, nominalni i minimalni nivo opterećenja,

$floor$ - naredba za zaokružnje na celobrojnu vrednost,

$P_{loss1} - P_{loss\ max}$,

$P_{loss2} - P_{loss\ nom}$ tekući gubici nominalnog nivoa potrošnje za unutrašnju petlju kompenzacije i

$P_{loss3} - P_{loss\ min}$ tekući gubici minimalnog nivoa potrošnje za unutrašnju petlju kompenzacije.

U slučaju instaliranja fiksnih kondenzatorskih baterija, primenjenim programom, su dobijeni rezultati predstavljeni u Tabeli 9.2.1.

Tabela 9.2.1. Rezultati razvijenog programa u slučaju postavljanja fiksnih kondenzatorskih baterija

MATLAB	2010a
PC	Pentium IV PC; Intel core i7-4770; 3,4 GHz; 32 GB RAM
S.A. nehomogeni algoritam	T=5000, ICOUNT<20000, T=0.95*T, ICOUNA/ICOUNT<0.001
T krajnje	-
OPTIMALNA KONFIGURACIJA	
Vršni nivo opterećenja (1,5 Load, 1000 h)	33 32 28 13 10 otvorene grane 271.0213 kW, $\cos\phi=0.9389$, $U_{min}=0.911$ r.j.
Nominalni nivo opterećenja (1,0 Load, 6760 h)	36 26 12 9 7 otvorene grane 113.0167 kW, $\cos\phi=0.9740$, $U_{min}=0.945$ r.j.
Minimalni nivo opterećenja (0,8 Load, 1000 h)	35 34 32 22 19 otvorene grane 172.9208 kW, $\cos\phi=0.9894$, $U_{min}=0.923$ r.j.
QBK	29 čvor (1.2 MVar) 30 čvor (0.3 MVar)
Funkcija cilja dobijene konfiguracije	69856 \$
POLAZNA KONFIGURACIJA	
Vršni nivo opterećenja (1,5 Load, 1000 h)	33 34 35 36 37 otvorene grane 496.35 kW, $\cos\phi=0.8489$, $U_{min}=0.863$ r.j.
Nominalni nivo opterećenja (1,0 Load, 6760 h)	33 34 35 36 37 otvorene grane 202.6 kW, $\cos\phi=0.8493$, $U_{min}=0.9131$ r.j.
Minimalni nivo opterećenja (0,8 Load, 1000 h)	33 34 35 36 37 otvorene grane 125.80 kW, $\cos\phi=0.8501$, $U_{min}=0.932$ r.j.
QBK	-
Funkcija cilja polazne konfiguracije	119310 \$
UŠTEDA	49454 \$

9. Simultana rekonfiguracija i otočna kompenzacija distributivnih mreža primenom metode simuliranog kaljenja

Penalizacioni faktori	120\$/peakkW, 0.03\$/kWh
Godišnja stopa cene kondenzatorske baterije	0.15
CPU vreme	32 min

U pogledu gubitaka aktivne snage pri minimalnom nivou opterećenja polazna konfiguracija je bolja i sa njome bi se imale veće uštede. Verovatnoća da generator slučajnih brojeva izgeneriše ovu konfiguraciju je mala pogotovu kada postoje tri generatora slučajnih brojeva, za svaki nivo opterećenja po jedan. Zbog ovoga je neophodna heuristična korekcija. Heuristična korekcija koja daje bolje rešenje jeste započeti sa konfiguracijom kojoj su pridodate kondenzatorske baterije generisane programom pa je minimizirati u pogledu gubitaka za minimalni nivo opterećenja. Dobijeni su sledeći rezultati: 28 17 14 10 7 grane otvorene, 98.2971 kW gubici aktivne snage, $\cos\phi=0.9919$, $U_{min}=0.970$ r.j., QBK 29 čvor (1.2 MVar) i 30 čvor (0.3 MVar). Odgovarajuća funkcija cilja je 66794 \$. Mreža nije prekompenzovana a ulazni faktor snage joj je $\cos\phi>0.85$. Ostvarena ušteda iznosi 52516 \$. Vreme izvršenja heuristične korekcije sa identičnim parametrima simuliranog kaljenja na računaru, čiji su podaci dati u gornjoj tabeli, iznosi 3 min. Napominjemo da je $U_{min}=0.863$ r.j. za polaznu konfiguraciju vršnog nivoa opterećenja dok je $U_{min}=0.911$ r.j. za isti nivo opterećenja kod izgenerisane konfiguracije tako da nije neophodno ugraditi naponske regulatore.

U slučaju instaliranja regulacionih kondenzatorskih baterija, primenjenim programom, dobijeni su rezultati predstavljeni u Tabeli 9.2.2.

Tabela 9.2.2. Rezultati razvijenog programa u slučaju postavljanja regulacionih kondenzatorskih baterija

MATLAB	2010a
PC	Pentium IV PC; Intel core i7-4770; 3,4 GHz; 32 GB RAM
S.A. nehomogeni	T=10000, ICOUNT<100, MLG<500 (maksimalan broj iteracija u petlji kompenzacije)
T final	-
DOBIJENA KONFIGURACIJA BEZ KOREKCIJA	
Vršni nivo opterećenja (1,5 Load, 1000 h)	36 26 12 10 7 otvorene grane 255.2459 kW, $\cos\phi=0.9870$, $U_{min}=0.929$ r.j.
Nominalni nivo opterećenja (1,0 Load, 6760 h)	37 33 17 11 7 otvorene grane 113.6102 kW, $\cos\phi=0.9971$, $U_{min}=0.942$ r.j.
Minimalni nivo opterećenja (0,8 Load, 1000 h)	35 26 15 11 2 otvorene grane 374.0325 kW, $\cos\phi=0.9997$, $U_{min}=0.863$ r.j.
QBK (vršno)	2 čvor (0.6 MVar), 12 čvor (0.6 MVar), 26 čvor (0.6 MVar) i 29 čvor (0.9 MVar)
QBK (nominalno)	2 čvor (0.6 MVar), 12 čvor (0.3 MVar), 26 čvor (0.3 MVar) i 29 čvor (0.9 MVar)
QBK (minimalno)	2 čvor (0.6 MVar), 12 čvor (0.3 MVar), 26 čvor (0.3 MVar) i 29 čvor (0.9 MVar)
Dobijena funkcija cilja	74663 \$
UŠTEDA	44647 \$
CPU vreme	<3 h 15 min
HEURISTIČNA KOREKCIJA	
Vršni nivo opterećenja (1,5 Load, 1000 h) primena SA za ovaj nivo opterećenja sa polaznom konfiguracijom i programom pridodatim kondenzatorskim baterijama	37 17 14 10 7 otvorene grane 233.3480 kW, $\cos\phi=0.9877$, $U_{min}=0.919$ r.j.
Nominalni nivo opterećenja (1,0 Load, 6760 h)	37 33 17 11 7 otvorene grane 113.6102 kW, $\cos\phi=0.9971$, $U_{min}=0.942$ r.j.
Minimalni nivo opterećenja (0,8 Load,	28 17 14 11 7 otvorene grane

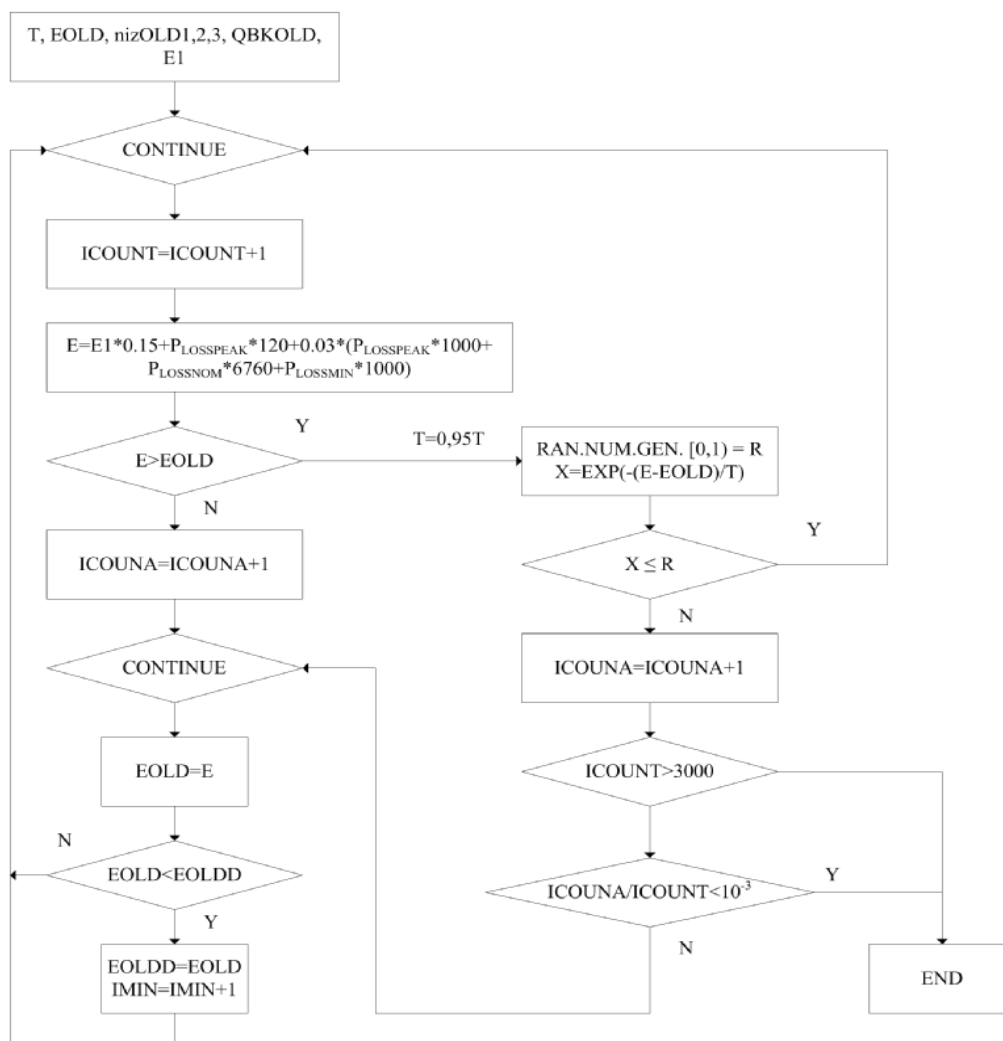
9. Simultana rekonfiguracija i otočna kompenzacija distributivnih mreža primenom metode simuliranog kaljenja

1000 h primena SA za ovaj nivo opterećenja sa polaznom konfiguracijom i programom pridodatim kondenzatorskim baterijama	63.0339 kW, $\cos\phi=0.9976$, $Q_{ul}=-0.21$ MVar, $U_{min}=0.965$ r.j.
QBK (vršno)	2 čvor (0.6 MVar), 12 čvor (0.6 MVar), 26 čvor (0.6 MVar) i 29 čvor (0.9 MVar)
QBK (nominalno)	2 čvor (0.6 MVar), 12 čvor (0.3 MVar), 26 čvor (0.3 MVar) i 29 čvor (0.9 MVar)
QBK (minimalno)	2 čvor (0.6 MVar), 12 čvor (0.3 MVar), 26 čvor (0.3 MVar) i 29 čvor (0.9 MVar)
Dobijena funkcija cilja	62048 \$
UŠTEDA	57262 \$

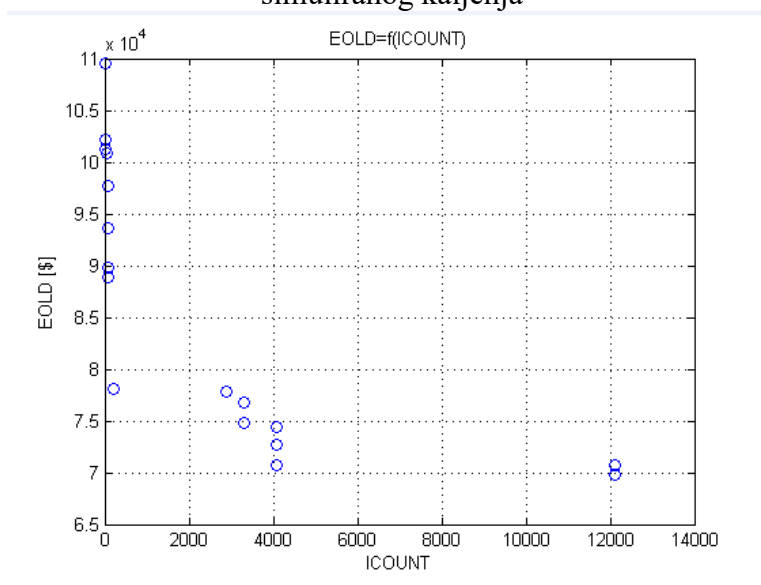
Gubici aktivne snage minimalnog nivoa opterećenja su preveliki (374.0325 kW) a i naponski profil ne zadovoljava za minimalni nivo opterećenja kod programom izgenerisane konfiguracije ($U_{min}=0.863$ r.j.). Nakon heuristične korekcije gubici su 63.0339 kW ali je mreža blago prekompenzovana jer je $Q_{ul} = -0.21$ MVar (injektirana snaga balansnog čvora). Minimalni napon je $U_{min}=0.965$ r.j. tako da naponski regulatori nisu potrebni. Izvršena je i heuristična korekcija za maksimalni nivo opterećenja da bi se dobila veća ušteda, koja prevazilazi vrednost u slučaju instalisanja samo fiksnih kondenzatorskih baterija. Princip hijerarhije snaga je ispoštovan.

Heuristične korekcije na HP 650 lap top; 1,7 GHz; 6,00 GB (2,66 GB upotrebljivo) traju 3 min za sledeće parametre simuliranog kaljenja $T=5000$ (početna temperatura), $ICOUNT < 3000$ (maksimalna dužina Markov-ljevog lanca), $T=0.95 * T$ (pravilo snižavanja temperature), $ICOUNA/ICOUNT < 0.001$ (a.r., stopa prihvatanja).

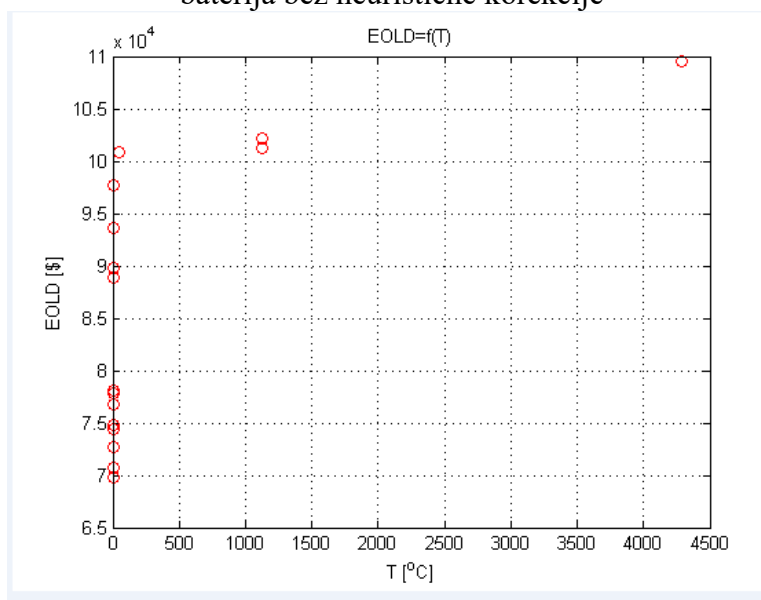
Za slučaj postavljanja fiksnih kondenzatorskih baterija dobijeni su sledeći dijagrami konvergencije Slike 9.2.3. i 9.2.4.



Slika 9.2.1. Blok dijagram algoritma kada se postavljaju fiksne kondenzatorske baterije kod rekonfigurisane mreže



Slika 9.2.3. Zavisnost funkcije cilja od broja iteracija za slučaj postavljanja fiksnih kondenzatorskih baterija bez heuristične korekcije



Slika 9.2.4. Zavisnost funkcije cilja od temperature (početna je 5000°C) za slučaj postavljanja fiksnih kondenzatorskih baterija bez heuristične korekcije

10. ZAKLJUČAK

Na osnovu dobijenih rezultata i izvršenih analiza nameće se sledeći zaključak u vezi sa pitanjima razmatranim u disertaciji, predlog za nastavak istraživanja kao i ostvareni doprinos rada.

Prilikom egzekucije programa, primenom modifikovanog algoritma tokova snaga, može se zaključiti da homogeni, vremenski zahtevniji algoritam, ne završava sa optimumom za razliku od nehomogenog kod koga to nije slučaj. Mora se naglasiti da homogeni algoritam simuliranog kaljenja ne daje prihvatljive rezultate osim u hibridnom algoritmu sa direktnim pretraživanjem što se postiže monitorisanjem najjeftinije konfiguracije do samog kraja algoritma.

U toku rada programa, generatorom slučajnih brojeva generiše se mnogo konfiguracija koje su radijalne ali ne i podobne. Konstantan napon napojnog čvora i isporuka zahtevanih potrošnji u tim konfiguracijama uz male gubitke aktivne snage nije moguće i iz ovog razloga primenjeni algoritmi tokova snaga divergiraju. Ovakve su konfiguracije na primer 3, 14, 18, 26 i 35; 5, 8, 13, 22 i 28; 2, 3, 11, 25 i 35 (cifre označavaju otvorene grane), mreža [6]. Ovaj problem se prevazilazi u programu MATLAB instrukcijom kojom se pri divergenciji automatski prelazi na novu konfiguraciju kod koje algoritma tokova snaga konvergira.

Analiza naponskih i strujnih ograničenja izvršena je za mrežu [6] i može se primeniti i na mreže iz referenci [101 i 51]. Od interesa su Tabele 8.1. i 8.2. Rekonfiguracija se može upotrebiti za poboljšanje efikasnosti snabdevanja električnom energijom i na poboljšanje njenog kvaliteta jer popravlja naponsku sliku. Njena popravka se direktno ogleda u najnižem naponu mreže (čvor-a) koji se rekonfiguracijom znatno povećava. Najniži napon ciljnog optimuma je 0.938 p.u. što je bolje od vrednosti 0.913 p.u. za polaznu konfiguraciju. Ovo ne znači da se ona može upotrebiti za regulaciju napona za šta se koriste naponski regulatori. Struje grana 15, 16, 17, 18, 19, 20 i 21 ciljne optimalne konfiguracije su više nego kod polazne. Ovo pokazuje da je zaključak Padilha Feltrin [93] samo delimično tačan. Struje ciljne optimalne konfiguracije su uglavnom niže nego kod polazne konfiguracije sa izuzetkom grana sa najmanjim priraštajem gubitaka. Porastom gubitaka ovih grana i snižavanjem gubitaka grana velike struje postiže se optimalna konfiguracija. Naponska i strujan ograničenja nisu uključena u MATLAB program.

Vreme izvršenja algoritma reda sekunde kod problema rekonfiguracije je malo verovatno. U ovom slučaju vreme potrebno za pohranjivanje ulaznih podataka je od veće važnosti. Sa porastom kompleksnosti sistema raste i ovo vreme. Sa rigoroznijim parametrima simuliranog kaljenja vreme takođe raste. Može se pokazati da izbor polazne konfiguracije ne utiče na vreme izvršenja originalnog u disertaciji prezentovanog algoritma. To je provereno kada se startovalo sa polaznom konfiguracijom, vreme je ostalo isto kao kad je startovano sa konfiguracijom velike vrednosti gubitaka što govori u prilog tome da algoritam simuliranog kaljenja ne zavisi od izbora polazne konfiguracije. Vreme izvršenja algoritma se može znatno smanjiti bez popravke (poboljšanja izgenerisane konfiguracije) kada se umesto homogenog algoritma pređe na nehomogeni algoritam [109] koji stalno snižava temperaturu pre primene Metropolis kriterijuma.

Kompleksnost problema koji se rešava zavisi od broja grana i čvorova. Drugi aspekt problema komplikovanosti je broj grana koje mogu da komutuju. Sa ove tačke gledišta Zimmerman mreža je prosta [89]. Broj ovih grana, kod nje, je 12 i mnogo je manji od ukupnog broja grana (144). U našem primeru, mreža [6], bez obzira što broj grana i čvorova nije velik situacija je otežana jer svaka grana može biti otvorena a broj kombinacija je $\binom{37}{5}$ što iznosi 435 897 dok je broj mogućih stanja 2^{37} od kojih nisu sva podobna (samo konektovana i radijalna). Slični zaključak važi i za mreže [101, 51].

Autor ne poseduje iskustvo sa realnim mrežama već je izabrao primer iz literature [6]. Upotreba metode kod konkretnih mreža zahteva mnogo više vremena za unošenje ulaznih podataka. Kod testirane mreže od 118 čvorova i sa 123 komutujućih grana vreme izvršenja proračuna za dobijanje prihvatljive podoptimalne konfiguracije iznelo je 10 dana što govori u prilog tome da je algoritam atraktivan ali za realne mreže ograničen na njihovo planiranje tako da je simulirano kaljenje pogodno za primenu kod velikih kombinatorijskih optimizacionih problema ali njego

10. Zaključak

primena zahteva predugo vreme izvršenja proračuna. U referenci [116] za mešoviti konzum (industrijski i stambeno/komercijalni u Srbiji) za veoma rigorozne ulazne parametre (epoh < 0.00001 , stopa prihvatanja < 0.00001 i ICOUNT = 10 000 000, homogeni algoritam) trajanje programa iznelo je 312 sati. Program je puštan u FORTRANU 77 sa preciznim algoritmom tokova snaga na računaru Pentium II PC, 533 MHz, 256 MB. Test mreža je imala 12 mesečnih nivoa potrošnje (1 godina), 53 čvora i 3 naponska nivoa 110 kV/35 kV/10 kV i data je u referenci [116] na slici 5. Rešavan je problem kompenzacije.

U Poglavljima 8.5. i 8.6. pokazano je da se razvijeni algoritam simuliranog kaljenja vrlo lako može primeniti za višekriterijumsku optimizaciju različitih funkcija cilja i time dati operateru mogućnost da pogodnim izborom težinskih koeficijenata da primat onome što mu je trenutno najvažnije u konceptu pametne mreže (eng. *smart grid*).

U Poglavljima 9.1. i 9.2. pokazano je da se simultana rekonfiguracija i otočna kompenzacija lako modeluju algoritmom simuliranog kaljenja. Ograničenje postoji u broju nivoa potrošnje, u radu su analizirana tri (zima, jesen-proleće i leto). Sa povećanjem nivoa potrošnje problem se znatno komplikuje kod ugradnje regulacionih kondenzatorskih baterija. Znatne uštede se postižu i sa primenom fiksnih a još veće sa primenom regulacionih baterija. Pokazano je da se na ovaj način može izbeći upotreba naponskih regulatora pri nezadovoljavajućem naponu distributivne mreže i na taj način postići znatna ušteda u investicijama.

U budućem radu poboljšanje brzine algoritma autor vidi u rešavanju problema minimalno razgranatog stabla težinskog grafa primenom Kruskal-ovog i Prim-ovog algoritma [30], kada se efikasni algoritam tokova snaga primenjuje samo jedanput (na početku za upetljanu mrežu, svu spojni prekidači zatvoreni). Kao dalji rad na problemu rekonfiguracije distributivnih mreža nameće se i rešavanje simultanog problema rekonfiguracije i kompenzacije uz prisustvo distribuiranih generatora.

Doprinos disertacije se ogleda u sledećem:

- 1) primenjenim generatorom slučajnih brojeva, zajedno sa kriterijumom konektivnosti mreže, generišu se samo podobne konfiguracije,
- 2) ne postoji iscrpljujuće pohranjivanje ulaznih podataka mreže za svaku konfiguraciju,
- 3) koristi se novi vrlo prost mehanizam poremećaja,
- 4) kombinuju se dobre strane homogenog algoritma simuliranog kaljenja i direktnog pretraživanja (eng. *greedy search*) što je rezultovalo u pravljenju primenljivog hibridnog algoritma i
- 5) za najveći deo proračuna, upotrebljen je vremenski mnogo brži nehomogeni algoritam.

LITERATURA

- [1] A. Merlin and H. Back, Search for a minimum-loss operating spanning tree configuration in urban power distribution systems, Proceedings of 5th PSCC, Cambridge, U.K., Sept., 1-5, 1975, pp. 1-18.
- [2] D.P. Bernardon, V.J. Garcia, A.S.Q. Ferreira and L.N. Canha, Multicriteria distribution network reconfiguration considering subtransmission analyses, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.25, No.4, October 2010, pp. 2684-2691.
- [3] V. Glamočanin, Optimal loss reduction of distribution networks, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, August 1990, No. 3, pp. 774-781.
- [4] R.P. Broadwater, P.A. Dolloff, T.L. Herdman, R. Karamikhova and A.F. Sargent, Minimum loss optimization in distribution systems: discrete ascent optimal programming, Electric Power Systems Research, 36, 1996, pp. 113-121.
- [5] T.E. McDermott, A heuristic nonlinear constructive method for electric power distribution system reconfiguration, Phd dissertation, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute, April 23, 1998, 66 pages.
- [6] M.E. Baran and F.F. Wu, Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.4, No.2, April 1989, pp. 1401-1407.
- [7] S. Civanlar, J.J. Grainger, H. Yin and S.S.H. Lee, Distribution feeder reconfiguration for loss reduction, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.3, No.3, July 1988, pp. 1217-1223.
- [8] C.C. Liu, S.J. Lee and K. Vu, Loss minimization of distribution feeders: optimality and algorithms, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.4, No.2, April 1989, pp. 1281-1289.
- [9] D. Shirmohammadi and H.W. Hong, Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.4, No.2, April 1989, pp. 1492-1498.
- [10] A.L. Morelato and A. Monticelli, Heuristic search approach to distribution system restoration, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.4, No.4, October 1989, pp. 2235-2241.
- [11] T. Taylor and D. Lubkeman, Implementation of heuristic search strategies for distribution feeder reconfiguration, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.5, No.1, January 1990, pp. 239-246.
- [12] K. Aoki, K. Nara, T. Satoh, M. Itoh, H. Kuwabara, M. Kitagawa and K. Yamanaka, Totally automated switching operation in distribution system, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.5, No.1, January 1990, pp. 514-519.
- [13] R.P. Broadwater, J.C. Thompson, R.E. Lee and H. Maghdan-D, Compute-aided protection system design with reconfiguration, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.6, No.1, January 1991, pp. 260-266.
- [14] T.P. Wagner, A.Y. Chikhani and R. Hackam, Feeder reconfiguration for loss reduction: an application of distribution automation, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.6, No.4, October 1991, pp. 1922-1933.
- [15] S.K. Goswami and S.K. Basu, A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.7, No.3, July 1992, pp. 1484-1491.
- [16] R.P. Broadwater, A.H. Khan, H.E. Shaalan and R.E. Lee, Time varying load analyses to reduce distribution losses through reconfiguration, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.8, No.1, January 1993, pp. 294-300.
- [17] Y.Y. Hsu and Y.J. Hwu, Planning of distribution feeder reconfiguration with protective device coordination, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.8, No.3, July 1993, pp. 1340-1347.
- [18] V. Borozan, D. Rajičić and R. Ačkovski, Improved method for loss minimization in distribution networks, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, August 1995, No. 3, pp. 1420-1425.

- [19] R.J. Sarfi, M.M.A. Salama and A.Y. Chikhani, Distribution system reconfiguration for loss reduction: An algorithm based on network partitioning theory, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.11, No.1, February 1996, pp. 504-510.
- [20] J.Y. Fan, L. Zhang and J.D. McDonald, Distribution network reconfiguration: Single loop optimization, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.11, No.3, August 1996, pp. 1643-1647.
- [21] V. Borozan, D. Rajičić and R. Ačkovski, Minimum loss reconfiguration of unbalanced distribution networks, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.12, No.1, January 1997, pp. 435-442.
- [22] V. Borozan and N. Rajaković, Application assessments of distribution network minimum loss reconfiguration, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.12, No.4, October 1997, pp. 1786-1792.
- [23] W.M. Lin and H.C. Chin, A new approach for distribution feeder reconfiguration for loss reduction and service restoration, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.13, No.3, July 1998, pp. 870-875.
- [24] T. Asakura, T. Genji, T. Yura, N. Hayashi and Y. Fukuyama, Long-term distribution network expansion planning by network reconfiguration and generation of construction plans, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.18, No.3, August 2003, pp. 1196-1204.
- [25] M.A. Albornoz and H.S. Hardy, Distribution network configuration for minimum energy supply cost, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.19, No.1, February 2004, pp. 538-542.
- [26] F.V. Gomes, S. Carneiro Jr., J.L.R. Pereira, M.P. Vinagre, P.A.N. Garcia and L.R. Araujo, A new heuristic reconfiguration algorithm for large distribution systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.20, No.3, August 2005, pp. 1373-1378.
- [27] H.P. Schmidt, N. Ida, N. Kagan and J.C. Guaraldo, Fast reconfiguration of distribution systems considering loss minimization, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.20, No.3, August 2005, pp. 1311-1319.
- [28] A.R. Abul Wafa, A new heuristic approach for optimal reconfiguration in distribution systems, *Electric Power Systems Research*, 81, 2011, pp. 282-289.
- [29] A. Bayat, Uniform voltage distribution based constructive algorithm for optimal reconfiguration of electric distribution networks, *Electric Power Systems Research*, 104, 2013, pp. 146-155.
- [30] H. Ahmadi and J.R. Marti, Minimum-loss network reconfiguration: A minimum spanning tree problem, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, October 31, 2014, pp. 1-20.
- [31] D. Šošić i V. Bečejac, Rekonfiguracija distributivne mreže primenom metode jednostrukog zatvaranja petlji, presented at the INFOTEH 16-18 Mart 2016, Jahorina, Bosna i Hercegovina, Vol.15, pp. 51-56.
- [32] D. Šošić, P. Stefanov, Uperedna analiza heurističkih metoda rekonfiguracije distributivnih mreža, CIREĐ (savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije), Vrnjačka banja 26-30.9.2016.
- [33] D. Šošić, P. Stefanov i Đ. Lazović, Optimalna rekonfiguracija distributivne mreže, CIREĐ (savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije), Kopaonik 24-28.9.2018.
- [34] S. Toune, H. Fudo, T. Genji, Y. Fukuyama and Y. Nakanishi, Comparative study of modern heuristic algorithms to service restoration in distribution systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.17, No.1, January 2002, pp. 173-181.
- [35] A. Augugliaro, L. Dusonchet, M.G. Ippolito and E.R. Sanseverino, Minimum losses reconfiguration of MV distribution networks through local control of tie-switches, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.18, No.3, July 2003, pp. 762-771.
- [36] K. Nara, A. Shiose, M. Kitagawa and T. Ishibara, Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum re-configuration, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.7, No.3, August 1992, pp. 1014-1051.
- [37] K.H. Jung, H. Kim and Y. Ko, Network reconfiguration algorithm for automated distribution systems based on artificial intelligence approach, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.8, No.4, October 1993, pp. 1933-1941.

- [38] H. Kim, Y. Ko and K.H. Jung, Artificial neural-network based feeder reconfiguration for loss reduction in distribution systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.8, No.3, July 1993, pp. 1356-1366.
- [39] M.A. Kashem, G.B. Jasmon, A. Mohamed and M. Moghavvemi, Artificial neural network approach to network reconfiguration for loss minimization in distribution networks, *Electrical Power and Energy Systems*, Vol.20, No.4, 1998, pp. 247-258.
- [40] H.D. Chiang and R.J. Jumeau, Optimal network reconfigurations in distribution systems: part 2: Solution algorithms and numerical results, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.5, No.3, July 1990, pp. 1568-1574.
- [41] H.D. Chiang and R.J. Jumeau, Optimal network reconfigurations in distribution systems: part 1: A new formulation and a solution methodology, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.5, No.4, November 1990, pp. 1902-1909.
- [42] H-C. Chang and C-C. Kuo, Network reconfiguration in distribution systems using simulated annealing, *Electric Power Systems Research* 29 (1994) 227-238.
- [43] D. Jiang and R. Baldick, Optimal electric distribution system switch reconfiguration and capacitor control, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.11, No.2, May 1996, pp 890-897.
- [44] R. Billinton and S. Jonnavithula, Optimal switching device placement in radial distribution systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.11, No.3, July 1996, pp. 1646-1651.
- [45] Y.J. Jeon, J.C. Kim, J.O. Kim, J.R. Shin and K.Y. Lee, An efficient simulated annealing algorithm for network reconfiguration in large-scale distribution systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 17, October 2002, No. 4, pp. 1070-1078.
- [46] Y.J. Jeon and J.C. Kim, Application of simulated annealing and tabu search for loss minimization in distribution systems, *Electrical power & energy systems*, 26 (2004) pp. 9-18.
- [47] C.T. Su, C.F. Chang and J.P. Chiou, Distribution network reconfiguration for loss reduction by ant colony search algorithm, *Electric Power Systems Research* 75 (2005) 190-199.
- [48] A.C.B. Delbem, A.C.P.L.F. Carvalho and N.G. Bretas, Main chain representation for evolutionary algorithms applied to distribution system reconfiguration, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.20, No.1, February 2005, pp. 425-436.
- [49] K. Prasad, R. Ranjan, N.C. Sahoo and A. Chaturvedi, Optimal reconfiguration of radial distribution systems using a fuzzy mutated genetic algorithm, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.20, No.2, April 2005, pp. 1211-1213.
- [50] N.C. Sahoo, R. Ranjan, K. Prasad and A. Chaturvedi, A fuzzy-tuned genetic algorithm for optimal reconfigurations of radial distribution network, *European Transactions on Electrical Power* 2007; 17, pp. 97-111.
- [51] D. Zhang, Z. Fu and L. Zhang, An improved TS algorithm for loss-minimum reconfiguration in large-scale distribution systems, *Electric Power Systems Research* 77 (2007) 685-694.
- [52] E. Carpaneto and G. Chicco, Distribution system minimum loss reconfiguration in the hypercube ant colony optimization framework, *Electric Power Systems Research*, 78, 2008, pp. 2037-2045.
- [53] F.C. Chung, Reconfiguration and capacitor placement for loss reduction of distribution systems by ant colony search algorithm, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.23, No.4, November 2008; pp.1747-1755.
- [54] X. Xu, C. Wang and X. Feng, A tabu search approach for distribution network reconfiguration based on GIS, presented at the 2009 International Workshop on Intelligent Systems and Applications, 23-24 May 2009, Wuhan, China, pp. 1-4.
- [55] P. Rezaei and M. Vakilian, Distribution system efficiency improvement by reconfiguration and capacitor placement using a modified particle swarm optimization algorithm, *Proceeding of electric power and energy conference (EPEC)*, 2010; 6 pgs.
- [56] M.A.N. Guimaraes, C.A. Castro and R. Romero, Distribution systems optimization through reconfiguration and capacitor allocation by dedicated genetic algorithm, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2010, Vol. 4, Iss. 11, pp.1213-1222.

- [57] A.Y. Abdelaziz, F.M. Mohamed, S.F. Mekhamer and M.A.L. Badr, Distribution system reconfiguration using a modified Tabu Search algorithm, *Electric Power Systems Research*, 80, 2010, pp. 943-953.
- [58] M. Stojanović, D. Tasić, M. Vučković i A. Ristić, Izbor optimalne konfiguracije distributivne mreže primenom genetskog algoritma, Nacionalni komitet CIRED Srbija, Vrnjačka banja 23-28.09.2012.
- [59] S.S.F. Souza, R. Romero and J.F. Franco, Artificial immune networks Copt-aiNet and Opt-aiNet applied to the reconfiguration problem of radial electrical distribution systems, *Electric Power Systems Research*, 119, 2015, pp. 304-312.
- [60] A.M. Eldurssi and R.M. O'Connell, A fast nondominated sorting guided genetic algorithm for multi-objective power distribution system reconfiguration problem, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.30, No.2, 2015, pp. 593-601.
- [61] T.T. Nguyen, A.V. Truong and T.A. Phung, A novel method based on adaptive cuckoo search for optimal network reconfiguration and distributed generation allocation in distribution network, *Electric Power and Energy Systems*, 78, 2016, pp. 801-815.
- [62] M. Nayeripour, E.M. Moghaddam and M.H. Khooban, Multi-periods distribution feeder reconfiguration at the presence of distributed generation through economic assessment using a new modified PSO algorithm, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems* 31 (2016) pp.321-331.
- [63] E. Mahboubi-Moghaddam, M.R. Nairmani, M.H. Khooban, A. Azizvahed and M.J. Sharifi, Multi-objective distribution feeder reconfiguration to improve transient stability, and minimize power loss and operation cost using an enhanced evolutionary algorithm at the presence of distributed generations, *Electric Power and Energy Systems*, 76, 2016, pp. 35-43.
- [64] F. Sayadi, S. Esmaeli and F. Keynia, Feeder reconfiguration and capacitor allocation in the presence of non-linear loads using new P-PSO algorithm, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2016, 10, (10), pp. 2316-2326.
- [65] Z. Li, S. Jazebi and F. de Leon, Determination of the optimal switching frequency for distribution system reconfiguration, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.32, 2017, pp. 2060-2069.
- [66] A. Ameli, A. Ahmadifar, M.H. Shariatkhah, M. Vakilian and M.R. Haghifam, A dynamic method for feeder reconfiguration and capacitor switching in smart distribution systems, *Electrical Power and Energy Systems* 85 (2017) pp.200-211.
- [67] K.K.S.V V Prakasa Rao, V.C. Veera Reddy, A review on distribution feeder reconfiguration methods, *IJARIT*, Volume3, Issue2, 2017, pp. 192-195.
- [68] A. Asrari, S. Lotfifard and M.S. Payam, Pareto dominance-based multiobjective optimization method for distribution network reconfiguration, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol.7, No.3, 2016, pp. 1401-1410.
- [69] J.H. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems*, University Michigan Press, 1975.
- [70] J. Roytelman, V. Melnik, S.S.H. Lee and R.L. Lugtu, Multi-objective feeder reconfiguration by distribution management system, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.11, No.2, May 1996, pp. 661-667.
- [71] Y.Y. Hong and S.Y. Ho, Determination of network configuration considering multiobjective in distribution systems using genetic algorithms, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.20, No.2, May 2005, pp. 1062-1069.
- [72] D.S. Popović, J.K. Dujčić i S.S. Kuršević, Kombinovani algoritam za optimalnu rekonfiguraciju distributivnih mreža, *Elektroprivreda*, br.2 2004, str. 26-38.
- [73] J. Salehi, M.R.J. Oskuee and A. Amini, Stochastics multi-objective modeling of simultaneous reconfiguration of power distribution network and allocation of DG's and capacitors, *International journal of Ambient Energy*, 13 January 2017; 15 pgs.
- [74] D. Das, A fuzzy multiobjective approach for network reconfiguration of distribution systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, January 2006, No. 1, pp. 202-209.

- [75] Y.-K. Wu, C.-Y. Lee, L.-C. Liu and S.-H. Tsai, Study of reconfiguration for the distribution system with distributed generators, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.25, No.3, July 2010, pp. 1678-1685.
- [76] R. Syahputra, I. Robandi and M. Ashari, Optimal distribution network reconfiguration with penetration of distributed energy resources, presented 2014 at the 1st International Conference on Information Technology, Computer and Electrical Engineering (ICITACEE), 8 November 2014, Semarang, Indonesia, pp. 388-393.
- [77] P.M. Quevedo, J. Contreras, M.J. Rider and J. Allahdadian, Contingency assessment and network reconfiguration in distribution grids including wind power and energy storage, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol.6, No.4, 2015, pp. 1524-1533.
- [78] G.J. Peponis, M.P. Papadopoulos and N.D. Hatziargyriou, Distribution network reconfiguration to minimize resistive line losses, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.10, No.3, July 1995, pp. 1338-1342.
- [79] G.J. Peponis, M.P. Papadopoulos and N.D. Hatziargyriou, Optimal operation of distribution networks, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.11, No.1, February 1996, pp. 59-67.
- [80] C.T. Su and C.S. Lee, Feeder reconfiguration and capacitor setting for loss reduction of distribution systems, *Electric Power Systems Research* 58 (2001) 97-102.
- [81] Z. Dong, F. Zhengcai, Y. Du and Z. Liuchun, Capacitor switching and network reconfiguration for loss reduction in distribution system, In: *IEEE 2006 power engineering society general meeting*, 6 pgs.
- [82] Y. Lin and G. Zhizhong, Comprehensive optimization for energy loss reduction in distribution networks, *IEEE 2008*; 8 pgs.
- [83] L.W. De Oliveira, Jr.S. Carneiro, E.J. De Oliveira, J.L.R. Pereira, Jr.I.C. Silva and J.S. Costa, Optimal reconfiguration and capacitor allocation in radial distribution systems for energy loss minimization, *Electrical Power and Energy Systems* 32 (2010) pp.840-848.
- [84] V. Farahani, B. Vahidi and H.A. Abyaneh, Reconfiguration and capacitor placement simultaneously for energy loss reduction based on an improved reconfiguration method, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.27, No.2, May 2012, pp. 587-595.
- [85] J.M. Nahman and D.M. Perić, Optimal planning of radial distribution networks by simulated annealing technique, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.23, No.2, May 2008, pp. 790-795.
- [86] G.T. HEYDT - COMPUTER ANALYSIS METHODS FOR POWER SYSTEMS, Purdue University, Macmillan Publishing Company, New York, Copyright 1986, 359 p.
- [87] P. Wright, On minimum spanning trees and determinants, *Mathematics Magazine*, Vol.73, No.1, February 2000, pp. 21-28.
- [88] B. Stojanović, Simulacija kaljenja i njena primena na kompenzaciju u radijalnim distributivnim mrežama, Magistarski rad, Beograd, 1997, 94 str. (osnovni deo rada).
- [89] R.D. Zimmerman, Network reconfiguration for loss reduction in three-phase power distribution systems, Masters thesis, Cornell University, May 1992, 60 pages.
- [90] Uputstvo MATPOWER 6.0, User's Manual, December 16 2016, Zimmerman RD and Carlos EMS, 205 (p).
- [91] M. Lavorato, J.F. Franco, M.J. Rider, R. Romero, Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems, *IEEE Trans. Power Syst.* 27 (1) (2012) pp. 172-180.
- [92] B. Stojanović, Rekonfiguracija simetričnih radijalnih distributivnih mreža u svrhu smanjenja gubitaka aktivne snage, *Elektroprivreda*, br.3, 2007, str. 25-39.
- [93] E.M. Carreno, R. Romero and A. Padilha-Feltrin, An efficient codification to solve distribution network reconfiguration for loss reduction problem, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.23, No.4, November 2008, pp. 1542-1551.
- [94] J.H. Teng, A direct approach for distribution system load flow solutions, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 18, No. 3, July 2003, pp. 882-887.
- [95] A. Sarić i M. Čalović, Jedan algoritam za proračun naponskih stanja, tokova snaga i gubitaka u radijalnom distributivnom sistemu, *Elektrodistribucija*, GOD.20, 1992, BR.3, str. 127-140.

- [96] W.F. Tinney and C.E. Hart, Power flow solution by Newton's method, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-86, No. 11, November 1967, pp. 1449-1460.
- [97] V. Strezoski i saradnici, Osnovni energetske proračuni za analizu i upravljanje distributivnim mrežama, (studija), Institut za energetiku i elektroniku, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad 1998.
- [98] J.A. MOMOH – ELECTRIC POWER DISTRIBUTION, AUTOMATION, PROTECTION, AND CONTROL, CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, USA, 2007, 380 p.
- [99] B. Stojanović i M. Moskovljević, program u MATLAB-u:
GENERALNIPROGRAMPOLAZNAKONFIGURACIJABEZPETLJI
- [100] A. Sarić, Primena metode veštačke inteligencije za rešavanje problema kompenzacije reaktivne snage i regulacije napona u distributivnim sistemima, Doktorska disertacija, Beograd, 1997, 115 str.
- [101] D. Jiang, May 1994, Electric distribution system reconfiguration and capacitor switching, Masters thesis, Worcester Polytechnic Institute, 77 p.
- [102] B. Stojanović, Efficient automatic programme for voltage and current calculation in large scale radial balanced distribution networks without transformers, International scientific conference on defensive technologies, OTEH 2011, Belgrade, Serbia, October 2011.
- [103] D. Rajčić, R. Ačkovski and R. Taleski, Voltage correction power flow, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, April 1994, No. 2.
- [104] S. Ghosh and D. Das, Method for load flow solution of radial distribution networks, Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Transm. Distrib., November 1999, pp. 641-648.
- [105] S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt Jr. And M.P. Vecchi, Optimization by simulated annealing, IBM research report RC 9355, 1982.
- [106] S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt Jr. And M.P. Vecchi, Optimization by simulated annealing, Science, Vol. 220, 1983, pp. 671-680.
- [107] V. Černý, Thermodynamic approach to the travelling salesman problem: An efficient simulation algorithm, Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 45, 1985, pp. 41-51.
- [108] N. Metropolis, A. Rosenbluth, M. Rosenbluth, A. Teller and E. Teller, Equation of state calculations by fast computing machines, Journal of Chemical Physics, Vol. 21, 1953, pp. 1087-1092.
- [109] P.J.M. van Laarhoven and E.H.L. Aarts, Simulated annealing theory and applications, Reidel, Dordrecht, 1987, 186 p.
- [110] Ž.N. Popović, V.Dj. Kerleta and D.S. Popović, Hybrid simulated annealing and mixed integer linear programming algorithm for optimal planning of radial distribution networks with distributed generation, Electric Power Systems Research 108 (2014) 211-222.
- [111] A. Augugliaro, L. Dusonchet and E.R. Sanseverino, Genetic, simulated annealing and tabu search algorithms: three heuristic methods for optimal reconfiguration and compensation of distribution networks, ETEP, Vol.9, No.1, January/February 1999, pp. 35-41.
- [112] B. Stojanović, Branch exchange approach to power loss reduction in reconfiguration problem of balanced distribution networks, Vol.2, No.3, 2015, IJMEA, p. 142-149.
- [113] D. Šošić and P. Stefanov, Multi-objective optimal reconfiguration of distribution network, Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, VOL 69 (2018), NO2, 128-137.
- [114] H.D. Chiang, J.C. Wang, O. Cockings and H.D. Shin, Optimal capacitor placements in distribution systems: part 1: A new formulation and the overall problem, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.5, No.2, April 1990, pp. 634-642.
- [115] H.D. Chiang, J.C. Wang, O. Cockings and H.D. Shin, Optimal capacitor placements in distribution systems: part 2: Solution algorithms and numerical results, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.5, No.2, April 1990, pp. 643-649.
- [116] B. Stojanović, Primena algoritma simulacije kaljenja na kompenzaciju u razgranatim simetričnim radijalnim distributivnim mrežama, Elektroprivreda, br.3, 2004, str. 35-49.

PRILOZI

Prilog 1 – Rešavanje efikasnog algoritma analize tokova snaga u MATPOWER okruženju kod programa rekonfiguracije i otočne kompenzacije

MATPOWER je programski paket za rešavanje problema tokova snaga (kao glavnim ciljem) koji se koristi u MATLAB programskom jeziku [90].

Pre puštanja programa potrebno je pripremiti ulazne podatke u posebnim matičnim strukturama nazvanim *mpc* strukture. Na početku se definiše bazna snaga u MVA (*baseMVA*).

Prva *mpc* matična struktura je *mpc.bus* struktura koja sadrži podatke o sabirnicama (čvorovima) mreže. Ova matrica u obrađenim primerima sadrži 13 kolona i onoliko vrsta koliko ima čvorova mreže. Prva kolona predstavlja broj čvora koji mora biti pozitivan celi broj. Kreće se od referentnog čvora označenog sa 1 a zatim se ređaju proizvoljno ostali čvorovi mreže. Druga kolona odnosi se na tip čvora (1 je oznaka za PQ čvor a 3 za referentni čvor). Kolone 3 i 4 popunjavaju se aktivnom potrošnjom (MW) i reaktivnom potrošnjom (MVA_r) čvora. Od interesa su i kolone 8 (modul napona u relativnim vrednostima r.j.), 9 (fazni stav napona čvora u stepenima), 10 (bazni napon u kV), 12 (maksimalni dozvoljeni napon u relativnim vrednostima r.j.) i 13 (minimalni dozvoljeni napon u relativnim vrednostima r.j.). Kolone 8 i 9 se popunjavaju sa podacima koji odgovaraju ravnom startu (eng. *flat start*).

Druga *mpc* matična struktura je *mpc.gen* struktura koja sadrži podatke o generatorima mreže (u primerima su to podaci vezani za referentni čvor). Broj njenih kolona je 21. Prva kolona je broj referentnog čvora. Od interesa su kolone 4 (maksimalna injektirana reaktivna snaga u MVA_r), 5 (minimalna injektirana reaktivna snaga u MVA_r), 6 (napon čvora u relativnim vrednostima r.j., u primerima ova vrednost je 1), 7 (bazna snaga u MVA), 9 (maksimalna injektirana aktivna snaga u MW) i 10 (minimalna injektirana aktivna snaga u MW). Ova matrica sadrži samo jednu vrstu jer u obrađenim primerima postoji samo jedan referentni čvor.

Treća *mpc* matična struktura je *mpc.branch* struktura koja sadrži podatke o granama mreže. Ona sadrži 13 kolona i onoliko vrsta koliko ima grana. Prva kolona označava prvi čvor grane (početni) a druga, drugi čvor grane (krajnji). Treća i četvrta kolona su rezervisane za aktivnu i reaktivnu otpornost grane (u relativnim jedinicama r.j. sa baznim vrednostima koje su bazni napon i bazna snaga). Od interesa je još kolona 11 koja je namenjena oznaci statusa grane (1 grana zatvorena i 0 grana otvorena, eng. *branch status*).

Pomoću gornjih matrica definiše se mreža primer (eng. *case*). Potrebno je naredbom *mpc=loadcase ('caseimeprimer mreže')* aktivirati mrežu primer za koju su uneti podaci. Rešavanje efikasnog algoritma tokova snaga vrši se naredbom *runpf('caseimeprimer mreže')*. Sada je moguće objasniti fleksibilnost samog algoritma.

Izmene u konfiguraciji mreže zadaju se naredbom *mpc_izmenjeno=apply_changes(labela, mpc_prvobitno, chgtab)*. Prvo ćemo definisati matricu *chgtab*. Promene primera *izmenjeno* upravo su definisane ovom matricom i primenjuju se na *prvobitni* primer. *mpc* prvobitnog primera označeno je sa *mpc_prvobitno* a izmenjenog primera sa *mpc_izmenjeno*. Primer matrice *chgtab* za mrežu Baran-a i Wu-a je:

```
chgtab=[...
1 1 3 33 11 1 1;
1 1 3 34 11 1 1;
1 1 3 35 11 1 1;
1 1 3 36 11 1 1;
1 1 3 37 11 1 1;
1 1 3 niz(1) 11 1 0;
1 1 3 niz(2) 11 1 0;
1 1 3 niz(3) 11 1 0;
1 1 3 niz(4) 11 1 0;
1 1 3 niz(5) 11 1 0;
```

];.

Prva kolona je oznaka *labela*. Druga kolona nije od interesa. Treća kolona označava da se promene odnose na matricu *mpc.branch* prvobitnog primera (početna konfiguracija mreže Baran-a i Wu-a). Četvrta kolona označava vrste matrice *mpc.branch* koje se menjaju. Peta kolona se odnosi na kolone matrice *mpc.branch* koje se menjaju. Šesta kolona znači da postojeće vrednosti treba zameniti sa novim vrednostima iz kolone sedam. U gornjem primeru to bi značilo da grane 33, 34, 35, 36 i 37 treba zatvoriti (one su u prvobitnom, početnom primeru bile otvorene) a da grane *niz(1)*, *niz(2)*, *niz(3)*, *niz(4)* i *niz(5)* treba otvoriti. Iz ovog primera očigledna je fleksibilnost algoritma kada je u pitanju efikasni algoritam tokova snaga koji je u osnovi Newton-ov. Potrebno je samo granu proglasiti za otvorenu (0) ili zatvorenu (1) nezavisno o kakvoj se distributivnoj mreži radi (radijalna ili slabo upetljana).

Ovo je samo jedna od mogućih primena matrice *chgtab* koja je kod primera simultane rekonfiguracije i otočne kompenzacije još složenija ali se koristi ista logika.

Matrica *chgtab* u ovom slučaju za mrežu Baran-a i Wu-a jeste:

```
chgtab=[...
1 1 3 33 11 1 1;
1 1 3 34 11 1 1;
1 1 3 35 11 1 1;
1 1 3 36 11 1 1;
1 1 3 37 11 1 1;
1 1 3 niz(1) 11 1 0;
1 1 3 niz(2) 11 1 0;
1 1 3 niz(3) 11 1 0;
1 1 3 niz(4) 11 1 0;
1 1 3 niz(5) 11 1 0;
2 1 1 2 4 3 -QBK(1);
2 1 1 3 4 3 -QBK(2);
2 1 1 4 4 3 -QBK(3);
2 1 1 5 4 3 -QBK(4);
2 1 1 6 4 3 -QBK(5);
2 1 1 7 4 3 -QBK(6);
2 1 1 8 4 3 -QBK(7);
2 1 1 9 4 3 -QBK(8);
2 1 1 10 4 3 -QBK(9);
2 1 1 11 4 3 -QBK(10);
2 1 1 12 4 3 -QBK(11);
2 1 1 13 4 3 -QBK(12);
2 1 1 14 4 3 -QBK(13);
2 1 1 15 4 3 -QBK(14);
2 1 1 16 4 3 -QBK(15);
2 1 1 17 4 3 -QBK(16);
2 1 1 18 4 3 -QBK(17);
2 1 1 19 4 3 -QBK(18);
2 1 1 20 4 3 -QBK(19);
2 1 1 21 4 3 -QBK(20);
2 1 1 22 4 3 -QBK(21);
2 1 1 23 4 3 -QBK(22);
2 1 1 24 4 3 -QBK(23);
2 1 1 25 4 3 -QBK(24);
2 1 1 26 4 3 -QBK(25);
2 1 1 27 4 3 -QBK(26);
2 1 1 28 4 3 -QBK(27);
```


2 1 1 29 4 3 -QBK(28);
2 1 1 30 4 3 -QBK(29);
2 1 1 31 4 3 -QBK(30);
2 1 1 32 4 3 -QBK(31);
2 1 1 33 4 3 -QBK(32);
];

Primećujemo da postoje dva tipa naredbi pa i dve labelle vezane za dva *mpc-a* i to *mpc_tekuce=apply_changes(1, mpc, chgtab)* za rekonfiguraciju i *mpc_tekuce1=apply_changes(2, mpc_tekuce, chgtab)* za otočnu kompenzaciju. Četvrta kolona sa labelom 2 označava vrste matrice *mpc.bus* koje se menjaju odnosno čvorove koji injektiraju reaktivnu snagu *QBK (i)* odgovarajućih kondenzatorskih baterija u tim čvorovima (kolona 4 matrice *mpc_tekuce1.bus*).

Naredba *results=runpf(mpc_tekuce1)* se odnosi na dobijanje rezultata efikasnog algoritma tokova snaga za modifikovanu mrežu (*mpc_tekuce1*).

Napred izneto su suštinske naredbe MATPOWER okruženja koje su korišćene u programima. Postoje i druge manje značajne koje nisu ovde pomenute kao što su multiplikacija (promena) potrošnje, ispisivanje rezultata proračuna, komprimovanje teksta u izlaznom fajlu, pozivanje na druge elemente *mpc* matičnih struktura kod višekriterijumske optimizacije ali navedene matrice *chgtab* su dovoljne da se shvati fleksibilnost ovog programskog paketa.

Napominjemo da rešavanje efikasnog algoritma tokova snaga za distributivne mreže sa referentnim čvorom jeste samo jedna od mnogobrojnih funkcija MATPOWER programskog paketa.

Prilog 2 – Osnovni program za rekonfiguraciju distributivne mreže u svrhu smanjenja gubitaka aktivne snage (nehomogeni algoritam)

```
% Program za proračun minimalnih gubitaka.

ICOUNT=0;
ICOUNA=0;
T=5000;
EOLD=202.6;
nizOLD=[33 34 35 36 37]';
EOLDD=EOLD;
nizOLDD=nizOLD;
IMIN=1;

% Glavna petlja.

while ICOUNT<3000

ICOUNT=ICOUNT+1;

% Ovde treba ubaciti potprogram za proračun gubitaka u tekućoj
% konfiguraciji.
[E, niz]=GUBICI_1_MATPOWER_SOSIC_RAJIC_BARAN_i_WU;
niz;
EOLD;

if E>EOLD
    T=0.95*T
    R=(1-0).*rand(1,1);
    X=exp(-(E-EOLD)/T);
        if X<=R
            continue;
        end;
    ICOUNA=ICOUNA+1;

    if (ICOUNA/ICOUNT)<0.001
        break;

    else EOLD=E;
        nizOLD=niz;
    end,

else ICOUNA=ICOUNA+1;
    EOLD=E;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% OVO JE DODATO ZA CRTANJE GRAFA %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

figure(1)
plot(ICOUNT,EOLD,'o')
grid
title('EOLD=f(ICOUNT)');
xlabel('ICOUNT');
ylabel('EOLD [kW]');
hold on

figure(2)
plot(T,EOLD,'or')
```

```
grid
title('EOLD=f(T)');
xlabel('T [°C]');
ylabel('EOLD [kW]');
hold on
```

%%%

```
nizOLD=niz;
end;
```

```
if EOLD<EOLDD
    EOLDD=EOLD
    nizOLDD=nizOLD
    IMIN=IMIN+1
end;
end
```

```
EOLD
nizOLD
```

Prilog 3 - Osnovni potprogram za rekonfiguraciju distributivne mreže u svrhu smanjenja gubitaka aktivne snage

```
function [Ploss, niz]= Untitled

% Program za formiranje matrice admitansi.
% Prvo treba zadati broj cvorova, broj grana, broj otocnih grana
% i koliko grana treba iskljuciti. Promenljiva nepovezanost je uvedena kao
% uslov za WHILE glavnu logicku petlju

% startovanje uvek od upetljane mreze
%mpc=loadcase('caseupetljana');

nema_baterija=0; %OVO JE DODATO!!!
brcvorova=33;
brgrana=37;
brotocnihgrana=0;
briskljucenihgrana=5;
nepovezanost=true;
nekonvergencija=true;

%FIKTIVNE IMPEDANSE I ADMITANSE GRANA
Zc0c1=0.0922+j*0.0470;
Zc1c2=0.4930+j*0.2511;
Zc2c3=0.3660+j*0.1864;
Zc3c4=0.3811+j*0.1941;
Zc4c5=0.8190+j*0.7070;
Zc5c6=0.1872+j*0.6188;
Zc6c7=0.7114+j*0.2351;
Zc7c8=1.0300+j*0.7400;
Zc8c9=1.0440+j*0.7400;
Zc9c10=0.1966+j*0.0650;
Zc10c11=0.3744+j*0.1238;
Zc11c12=1.4680+j*1.1550;
Zc12c13=0.5416+j*0.7129;
Zc13c14=0.5910+j*0.5260;
Zc14c15=0.7463+j*0.5450;
Zc15c16=1.2890+j*1.7120;
Zc16c17=0.7320+j*0.5740;
Zc1c18=0.1640+j*0.1565;
Zc18c19=1.5042+j*1.3554;
Zc19c20=0.4095+j*0.4784;
Zc20c21=0.7089+j*0.9373;
Zc2c22=0.4512+j*0.3083;
Zc22c23=0.8980+j*0.7091;
Zc23c24=0.8960+j*0.7011;
Zc5c25=0.2030+j*0.1034;
Zc25c26=0.2842+j*0.1447;
Zc26c27=1.0590+j*0.9337;
Zc27c28=0.8042+j*0.7006;
Zc28c29=0.5075+j*0.2585;
Zc29c30=0.9744+j*0.9630;
Zc30c31=0.3105+j*0.3619;
Zc31c32=0.3410+j*0.5302;
Zc7c20=2.000+j*2.000;
Zc8c14=2.000+j*2.000;
Zc11c21=2.000+j*2.000;
Zc17c32=0.500+j*0.500;
Zc24c28=0.500+j*0.500;
```

```
Yc0c1=1/Zc0c1;  
Yc1c2=1/Zc1c2;  
Yc2c3=1/Zc2c3;  
Yc3c4=1/Zc3c4;  
Yc4c5=1/Zc4c5;  
Yc5c6=1/Zc5c6;  
Yc6c7=1/Zc6c7;  
Yc7c8=1/Zc7c8;  
Yc8c9=1/Zc8c9;  
Yc9c10=1/Zc9c10;  
Yc10c11=1/Zc10c11;  
Yc11c12=1/Zc11c12;  
Yc12c13=1/Zc12c13;  
Yc13c14=1/Zc13c14;  
Yc14c15=1/Zc14c15;  
Yc15c16=1/Zc15c16;  
Yc16c17=1/Zc16c17;  
Yc1c18=1/Zc1c18;  
Yc18c19=1/Zc18c19;  
Yc19c20=1/Zc19c20;  
Yc20c21=1/Zc20c21;  
Yc2c22=1/Zc2c22;  
Yc22c23=1/Zc22c23;  
Yc23c24=1/Zc23c24;  
Yc5c25=1/Zc5c25;  
Yc25c26=1/Zc25c26;  
Yc26c27=1/Zc26c27;  
Yc27c28=1/Zc27c28;  
Yc28c29=1/Zc28c29;  
Yc29c30=1/Zc29c30;  
Yc30c31=1/Zc30c31;  
Yc31c32=1/Zc31c32;  
Yc7c20=1/Zc7c20;  
Yc8c14=1/Zc8c14;  
Yc11c21=1/Zc11c21;  
Yc17c32=1/Zc17c32;  
Yc24c28=1/Zc24c28;
```

```
% Zatim se vrši generisanje slučajnih brojeva da bi se odredilo  
% koje su grane uključene.  
% Naredna WHILE petlja je glavna logička petlja. Ako je izlaz  
% nekonektovana mreža petlja treba da se vrati na generator slučajnih  
% brojeva, sve dok se na izlazu ne pojavi konektovani graf.  
% Izlaz iz petlje mora biti konektovani graf!
```

```
%while nema_baterija==0; %OVO JE DODATO I ZAVRSAVA SE SA END U 540. REDU!!!  
    %Ovde se vraća ako nema potrebe da se dodaju baterije. Ide se na novo  
    %razbucavanje konfiguracije.
```

```
while nekonvergencija  
while nepovezanost
```

```
a = 1;  
b = brgrana;  
br=0;  
while br~=briskljucenihgrana
```

```
    br=0;  
    r = (b-a).*rand(briskljucenihgrana,1) + a;  
    niz=round(r);
```

```
    for i=1:briskljucenihgrana
```

```
c=niz(i);

for k=1:briskljucenihgrana
    if niz(k)==c
        br=br+1;
    end;
end;

end;

niz;
niz=sort(niz,'descend');

end

%% Posle formiranja promenljive niz potrebno formirati matricu incidencije
%% nezavisnih cvorova i grana za potpuno upetljanu mrezu i iz nje brisati
%% vrste/kolone koje odgovaraju otvorenim granama kao i za nulti cvor.
%% Onda sracunati tako dobijenu determinantu koja ne sme da je 0.
%% Sve linije do linije 225 nam onda vise nisu potrebne!!!

% niz je skup slucajnih brojeva koje predstavljaju otvorene grane.

% Sada treba pazljivo formirati matricu GRANE. Gledajuci jednu vrstu,
% brojevi imaju sledeca znacenja: redni broj grane, vrednost admitanse
% grane, od cvora, do cvora. Po istom principu treba formirati i matricu
% OTOCNEGRANE. Ako nema otocnih grana matrica treba da izgleda ovako:
% OTOCNEGRANE=[1 0 1 0].

GRANE=[1,Yc0c1,1,2;
2,Yc1c2,2,3;
3,Yc2c3,3,4;
4,Yc3c4,4,5;
5,Yc4c5,5,6;
6,Yc5c6,6,7;
7,Yc6c7,7,8;
8,Yc7c8,8,9;
9,Yc8c9,9,10;
10,Yc9c10,10,11;
11,Yc10c11,11,12;
12,Yc11c12,12,13;
13,Yc12c13,13,14;
14,Yc13c14,14,15;
15,Yc14c15,15,16;
16,Yc15c16,16,17;
17,Yc16c17,17,18;
18,Yc1c18,2,19;
19,Yc18c19,19,20;
20,Yc19c20,20,21;
21,Yc20c21,21,22;
22,Yc2c22,3,23;
23,Yc22c23,23,24;
24,Yc23c24,24,25;
25,Yc5c25,6,26;
26,Yc25c26,26,27;
27,Yc26c27,27,28;
28,Yc27c28,28,29;
29,Yc28c29,29,30;
30,Yc29c30,30,31;
31,Yc30c31,31,32;
32,Yc31c32,32,33;
33,Yc7c20,8,21;
```

```
34,Yc8c14,9,15;
35,Yc11c21,12,22;
36,Yc17c32,18,33;
37,Yc24c28,25,29];

OTOCNEGRANE=[1 0 1 0];

%Sljedeći red i petlja formiraju matricu incidencije.

A=zeros(brcvorova,brgrana);

for i=1:brgrana

    Cvor_prvi=GRANE(i,3);
    Cvor_drugi=GRANE(i,4);

    A(Cvor_prvi,i)=1;
    A(Cvor_drugi,i)=-1;

end

A;

%Sljedeće komande brišu prvu vrstu, jer se odnosi na prvi cvor, i sve kolone
%koje se odnose na grane. Nakon toga se računa determinanta.

A(1,:)=[];

for i=1:briskljucenihgrana
    A(:,niz(i))=[];
end;

A;

determinanta=det(A);

if determinanta==0
    fprintf('MREZA NIJE POVEZANA I RADIJALNA.\n');
else
    fprintf('MREZA JE POVEZANA I RADIJALNA.\n');
    nepovezanost=false;
end;

end;

niz;

mpc=loadcase('case33bw');

chgtab=[...
1 1 3 33 11 1 1;
1 1 3 34 11 1 1;
1 1 3 35 11 1 1;
1 1 3 36 11 1 1;
1 1 3 37 11 1 1;
1 1 3 niz(1) 11 1 0;
1 1 3 niz(2) 11 1 0;
1 1 3 niz(3) 11 1 0;
```

```
1 1 3 niz(4) 11 1 0;
1 1 3 niz(5) 11 1 0;
];

mpc_tekuce=apply_changes(1, mpc, chgtab);
mpopt=mpoption('pf.alg','NR','verbose',2,'out.all',0);
mpopt=mpoption(mpop, 'verbose',0);

results=runpf(mpc_tekuce, mpopt);

    if results.success==1
        nekonvergencija=false;
    else
        fprintf('PRORACUN TOKOVA SNAGA NIJE ISKONVERGIRAO.\n');
        nepovezanost=true;
    end;

end;

%ISPISIVANJE PROMENLJIVE NIZ PRE SRACUNAVANJA GUBITAKA
%A NA IZLAZU IZ GENERATORA SLUCAJNIH BROJEVA

%generisana konektovana i radijalna mreža
%niz;
%mpc=loadcase('caseupetljana');
%mpc=loadcase('case33bw');
%mpc.branch
%menjamo upetljanu mrežu sa otvorenim granama niz
% chgtab=[...
% 1 1 3 niz(1,1) 11 1 0;
% 1 1 3 niz(2,1) 11 1 0;
% 1 1 3 niz(3,1) 11 1 0;
% 1 1 3 niz(4,1) 11 1 0;
% 1 1 3 niz(5,1) 11 1 0;
% ];

% chgtab=[...
% 1 1 3 33 11 1 1;
% 1 1 3 34 11 1 1;
% 1 1 3 35 11 1 1;
% 1 1 3 36 11 1 1;
% 1 1 3 37 11 1 1;
% 1 1 3 niz(1) 11 1 0;
% 1 1 3 niz(2) 11 1 0;
% 1 1 3 niz(3) 11 1 0;
% 1 1 3 niz(4) 11 1 0;
% 1 1 3 niz(5) 11 1 0;
% ];

%generisanje nove strukture za promenljivu niz
%mpc_tekuce=apply_changes(1, mpc, chgtab);
%mpc_tekuce.branch
%zapamcivanje nove konfiguracije 'casetekuca'
%savecase ('casetekuca', mpc_new);

% add callback functions
%mpc_new=add_userfcn(mpc_new,'ext2int',@userfcn_casetekuca_ext2int);
%mpc_new=add_userfcn(mpc_new,'formulation',@userfcn_casetekuca_formulation);
```

Prilozi

```
%mpc_new=add_userfcn(mpc_new,'int2ext',@userfcn_casetekuca_int2ext);
%mpc_new=add_userfcn(mpc_new,'printpf',@userfcn_casetekuca_printpf);
%mpc_new=add_userfcn(mpc_new,'savecase',@userfcn_casetekuca_savecase);

%matrice za mpc_new
% mpc_tekuce.branch;
% mpc_tekuce.bus;
% mpc_tekuce.gen;

%load-ovanje 'casetekuca'
%loadcase(mpc_tekuce);

%power flow za 'casetekuca'
%runpf (mpc_tekuce);

% mpopt=mpoption('pf.alg','NR','verbose',2,'out.all',0);
% mpopt=mpoption(mpoft,'verbose',0);

%rezultati za 'casetekuca'

%results=runpf(mpc_tekuce, mpopt);
%results=runpf(mpc_tekuce);

%ukupno aktivno i reaktivno opterećenje za mpc_new ('casetekuca')
[Pd,Qd]=total_load(mpc_tekuce)

%kW i kVar sračunati kao snaga ulaznog cvora, generatora minus opterećenje

Ploss=(results.gen(1,2)-Pd)*1000
Qloss=(results.gen(1,3)-Qd)*1000

%pokusaj sa clear
%clear mpc_tekuce
%clear 'casetekuca'

%Ploss=real(Sloss);

%PROVERA KONVERGENCIJE
%Uit1=Uit0-Ydiagin*(Y*Uit0-0.001*Jit0)
%DV=abs(abs(Uit1)-abs(Uit0))/12.66
%NEPOTREBNA
niz;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%OVDE VALJDA TREBA UBACITI DEO Program_kompenzacija_2.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%nepovezanost=true;%Ovaj red treba izbrisati kada se doda
Program_kompenzacija_2.

%end

end
```

BIOGRAFIJA AUTORA

Branko Stojanović je rođen 3. aprila 1958. godine u Beogradu. Osnovnu školu i XIII beogradsku gimnaziju – prirodnomatematički smer završio je u Beogradu. Godine 1976. upisao je Elektrotehnički fakultet na Univerzitetu u Beogradu na energetskom odseku. 14. maja 1981. godine, diplomirao je na istom odseku smer elektroprivreda, sa prosečnom ocenom 9,08 i 10 na diplomskom ispitu. Tema diplomskog rada je „Poboljšanje tranzijentne stabilnosti kod sinhronih generatora uz pomoć regulacije pobude“. Diplomski rad je rađen kod profesora dr Gojka Muždeke.

Godine 1982. kandidat je upisao postdiplomske studije na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu na odseku za elektroenergetske sisteme, grupi za visokonaponska postrojenja i opremu. Kandidat je magistrirao kod profesora dr Nikole Rajakovića 30. januara 1997 na temu „Metoda simulacije kaljenja i njena primena na kompenzaciju u radikalnim distributivnim mrežama“. Prosečna ocena na postdiplomskim studijama je bila 7,83.

Od 1981. godine kandidat je radio u preduzeću „Minel eksport-import“ na poslovima izrade licitacionih elaborta za elektroenergetsku opremu i kompletne objekte. Od 1994. godine kandidat je radio u Elektromašinskoj školi u Zemunu kao nastavnik za grupu elektrotehničkih predmeta. 3. januara 1996. godine kandidat se zapošljava u Tehničkom opitnom centru pri Vojsci Srbije gde radi na poslovima ispitivanja električnih karakteristika naoružanja i vojne opreme. Tu je i sada zaposlen kao vodeći istraživač.

Izjava o autorstvu

Ime i prezime autora: Branko Stojanović

Broj indeksa: 5045/2017

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom:

Novi pristup rekonfiguraciji distributivnih mreža primenom metode simuliranog kaljenja

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za sticanje druge diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova;
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

Potpis autora

U Beogradu, _____

Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora: Branko Stojanović

Broj indeksa: 5045/2017

Studijski program: Elektrotehnika i računarstvo

Naslov rada: Novi pristup rekonfiguraciji distributivnih mreža primenom metode simuliranog kaljenja

Mentor: Dr Zoran Stojanović, vanredni profesor

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao radi pohranjivanja u **Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog naziva doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne bilblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

Potpis autora

U Beogradu, _____

Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

Novi pristup rekonfiguraciji distributivnih mreža primenom metode simuliranog kaljenja

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim priložima predao sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu i dostupnu otvorenom pristupu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo (CC BY)
2. Autorstvo – nekomercijalno (CC BY-NC)
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada (CC BY-NC-ND)
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)
5. Autorstvo – bez prerada (CC BY-ND)
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (CC BY-SA)

Potpis autora

U Beogradu, _____

1. **Autorstvo.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.

2. **Autorstvo – nekomercijalno.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.

3. **Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.

4. **Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.

5. **Autorstvo – bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.

6. **Autorstvo – deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.