

Optimizarea funcționării rețelelor de distribuție utilizând tehnici de inteligență artificială

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la
Universitatea Politehnica Timișoara

în domeniul de doctorat Inginerie Energetică

autor ing. Cosmin Gabriel Oros

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Ștefan Kilyeni

luna 09 anul 2019

Acronime.....	8
Lista de figuri, tabele și anexe.....	11
1. Introducere	17
2. Stadiul actual al evoluției sectorului energetic, al sectorului electroenergetic și a RED	23
2.1. Evoluția sectorului electroenergetic pe plan mondial	23
2.2. Politica Uniunii Europene	25
2.3. Producția și consumul de energie electrică în Uniunea Europeană	27
2.4. Producția și consumul de energie electrică în România	30
2.5. Transportul și distribuția energiei electrice	34
2.6. Concluzii	48
3. Modalități de soluționare a reconfigurării RED	49
3.1. Metode bazate pe modelarea matematică	49
3.2. Metode euristice și meta-euristice	53
3.3. Concluzii	79
4. Algoritmi genetici	81
4.1. Considerații preliminare	81
4.2. Versiunea de bază a algoritmilor genetici (codificare binară).....	83
4.3. Algoritmi genetici codificați cu valori reale	88
4.4. Concluzii	93
5. Metode de soluționare a reconfigurării optime a rețelelor de distribuție.....	95
5.1. Modelul matematic al reconfigurării optime a rețelelor de distribuție	95
5.2. Calculul și optimizarea circulației de puteri	99
5.3. Reconfigurarea optimă a RED cu o metodă de tip SSO (Sequential Switch Opening)	118
5.4. Reconfigurarea optimă a RED utilizând un algoritm genetic (AG).....	122
5.5. Concluzii	126
6. Prezentarea instrumentelor software	127
6.1. Instrument software pentru optimizarea circulației de puteri (OPFGA).....	127
6.2. Instrument software pentru reconfigurarea optimă a rețelelor de distribuție	130
6.3. Concluzii	132
7. Studii de caz și rezultate.....	133
7.1. Considerații preliminare	133
7.2. Rețeaua IEEE 33	134
7.3. Sistemul de distribuție RED Timișoara	148
7.4. Sistemul de distribuție RED Timiș	169
7.5. Concluzii	186
8. Concluzii generale. contribuții personale	187
Bibliografie	191
Sinteză privind lucrările proprii	205
Anexe electronice (CD)	207
Anexa 1. RED Timiș – Parametri	207
Anexa 2. RED Timiș – Regim buclat	226
Anexa 3. RED Timiș – Regim debuclat	265
Anexa 4. RED Timiș – Situația separatoarelor după reconfigurare.....	303
Anexa 5. RED Timiș – Situația separatoarelor și a tronsoanelor după reconfigurare.....	309

Rețelele de distribuție a energiei electrice (RED) au în general o topologie buclată, dar în condiții normale funcționează debuclet (din necesități legate de coordonarea protecțiilor, de reglarea tensiunii etc.), sub formă de rețele radiale arborescente. Evident că, ținând cont și de posibilitățile fizice de secționare a rețelei, există un număr mare de soluții pentru a obține o structură debucletă. Reconfigurarea optimă a RED are drept scop găsirea acelei soluții care minimizează pierderile de putere activă pe ansamblul rețelei, respectând totodată și o serie de restricții de natură tehnică și economică. De regulă pierderile de putere activă vor fi mai mari comparativ cu funcționarea în regim buclat, căutându-se varianta de debuclet care să "deterioreze" cât mai puțin situația din acest punct de vedere. Problema de optimizare poate fi abordată și în manieră multicriterială, funcția obiectiv completându-se cu termeni vizând ameliorarea nivelului de tensiune, echilibrarea încărcării elementelor de rețea, creșterea fiabilității, minimizarea numărului de operații de comutare necesare, optimizarea contribuției surselor de generare distribuită, costul nealimentării unor consumatori, ameliorarea unor aspecte de mediu etc.

Reconfigurarea RED este o problemă de optimizare de mari dimensiuni, cu un caracter puternic neliniar. Pe lângă tehnicile clasice de soluționare, bazate pe modelarea matematică și teoria grafurilor, se remarcă în ultima perioadă un număr mare de lucrări care utilizează o serie de tehnici euristice simple (Sequential Switch Opening – SSO, Branch Exchange – BE etc.) și meta-euristice (Algoritmi Genetici – AG, Particle Swarm Optimization – PSO, Rețelele Neuronale Artificiale – RNA, Harmony Search – HS, Tabu Search – TS, Simulated Annealing – SA, Ant Colony Optimization – ACO, Artificial Bee Colony – ABC, metode hibride etc.).

În acest context, tematica tezei de doctorat se încadrează în preocupările actuale din domeniul managementului rețelelor electrice de distribuție, legate de asigurarea unor condiții optime de funcționare din toate punctele de vedere. Teza are ca obiectiv principal elaborarea unor metode eficiente, riguros fundamentate din punct de vedere științific, de reconfigurare optimă a RED, utilizând tehnici euristice simple și meta-euristice (bazate pe folosirea AG). Metodele elaborate sunt finalizate prin tehnici originale de soluționare, implementate în instrumente soft care utilizează eficient posibilitățile oferite de mediile de programare și de sistemele de calcul disponibile în acest moment.

Aplicațiile au pornit de la rețele test de mici dimensiuni elaborate la Departamentul de Electroenergetică al UPT (Test 13) și rețele test IEEE consacrate (IEEE 30, IEEE 33, IEEE 123 etc.), ca apoi să se treacă la rețele de distribuție reale, de mari dimensiuni, din cadrul Enel Distribuție Banat și Electrica Muntenia Nord. Din motive de "spațiu", pentru prezentarea în cadrul tezei de doctorat au fost selectate trei RED: una de tip test (IEEE 33) și două reale, de mari dimensiuni, aparținând Enel Distribuție Banat (RED Timișoara și RED Timiș).

Rezultatele obținute și concluziile formulate sunt de o deosebită utilitate atât pentru operatorii de distribuție, la modul general, cât și pentru Enel Distribuție Banat, în particular.

Teza de doctorat, extinsă pe 206 de pagini, este structurată pe 8 capitole, prefață, 5 anexe electronice și o listă bibliografică, conținând un număr de 61 figuri, scheme, histogramme și 71 tabele. Bibliografia cuprinde 238 de titluri, semnalându-se prezența unor lucrări reprezentative, atât cele considerate deja clasice, cât și cele de dată relativ recentă, apărute în țară sau în reviste de prestigiu din străinătate.

Capitolul 1 are un caracter introductiv. El cuprinde încadrarea și justificarea tematicii care constituie obiectul tezei de doctorat, în contextul stadiului actual al evoluției sistemelor electroenergetice (SEE), al RED, și al preocupărilor existente pe plan mondial și la noi în țară. Urmează prezentarea succintă a conținutului fiecărui capitol al tezei. În încheiere se evidențiază atât modul de valorificare a cercetărilor efectuate în cadrul elaborării tezei de doctorat (publicații, contracte, instrumente soft), cât și perspectivele privind direcțiile ulterioare de cercetare.

Capitolul 2 realizează o sinteză privind stadiul actual și perspectivele evoluției SEE în general, pe plan mondial, european și național, cu accent pe situația RED. Prima parte cuprinde o prezentare privind stadiul actual de dezvoltare a sectorului electroenergetic, cu o serie de detalii despre consumul de energie electrică la fiecare nivel. A doua parte se referă exclusiv la

România, atenția fiind focalizată asupra operatorilor de transport și de distribuție a energiei electrice, asupra structurii rețelilor electrice de transport (RET) și de distribuție, remarcându-se atât gradul de uzură a acestora cât și preocupările privind modernizarea lor (inclusiv în ceea ce privește diminuarea consumului propriu tehnologic). Evoluția sectorului energetic, în general, și a SEE, în particular, prezintă o serie de particularități complexe, cu o influență puternică asupra altor sectoare de activitate, ceea ce conduce la necesitatea unei dezvoltări durabile și în concordanță cu problemele de mediu. În final se prezintă o serie de concluzii și se evidențiază contribuțiile proprii legate de acest capitol.

În contextul discutat și ținând cont de faptul că aplicațiile concrete vizează RED din România, în fig.1 se prezintă structura RET, iar în fig.2 cele 8 zone de distribuție [ANRE].

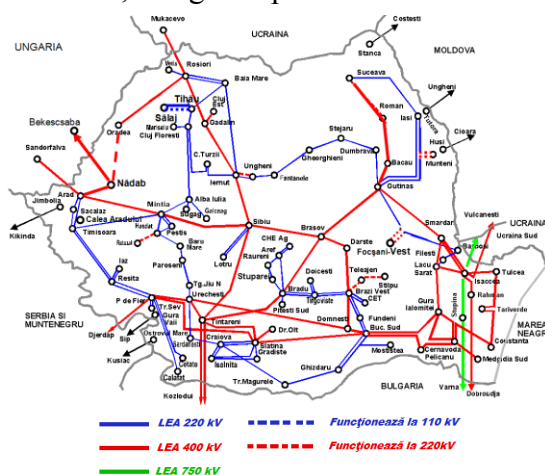


Fig.1. Structura RET

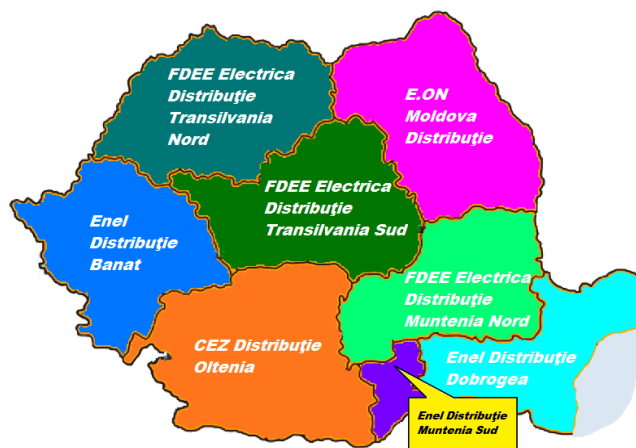


Fig.2. Harta cu cele 8 zone de distribuție

Din punctul de vedere al subiectului tezei prezintă interes cunoașterea nivelului pierderilor de putere activă (consumul propriu tehnologic – CPT) la diverse nivele de tensiune ale RED (110 kV, medie tensiune și joasă tensiune (Tabelul 1) [ANRE].

Tabelul 1. Evoluția CPT în rețelele electrice de distribuție a energiei electrice

Operatorul de Distribuție	Nivel de tensiune	Evoluția consumului propriu tehnologic [%]						
		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Enel Banat	î.t.	0,69	0,69	0,64	0,68	0,81	0,73	0,88
	m.t.	3,82	3,71	3,65	3,61	3,69	3,67	3,95
	j.t.	17,17	14,78	15,21	14,71	14,36	14,56	14,44
Enel Muntenia	î.t.	0,70	0,72	0,71	0,63	0,58	0,68	0,68
	m.t.	4,39	4,35	3,68	3,78	3,85	3,59	3,54
	j.t.	21,20	21,13	16,42	17,64	18,52	16,96	16,79
Enel Dobrogea	î.t.	1,01	1,16	1,35	1,94	2,16	1,63	1,86
	m.t.	3,90	4,02	4,15	3,95	5,17	6,13	5,55
	j.t.	18,18	16,00	15,52	14,06	14,06	12,71	13,90
CEZ Oltenia	î.t.	1,46	1,20	1,45	1,68	1,23	1,11	1,18
	m.t.	4,89	5,02	5,21	5,34	4,10	3,74	4,00
	j.t.	27,36	26,32	23,74	24,64	23,44	20,75	19,14
E.ON Moldova	î.t.	0,87	1,06	0,96	1,02	1,01	0,86	1,02
	m.t.	2,66	2,85	2,85	2,97	2,68	2,68	2,74
	j.t.	20,49	22,37	21,77	20,45	19,65	17,39	16,26
Electrica Muntenia Nord	î.t.	1,02	0,98	1,01	1,06	1,02	0,87	0,82
	m.t.	7,36	7,01	7,17	6,87	6,61	6,59	6,37
	j.t.	15,73	14,85	15,29	16,16	17,02	15,17	15,51
Electrica Transilvania Sud	î.t.	1,15	1,24	1,14	1,10	1,04	0,97	1,03
	m.t.	4,13	4,06	4,22	4,21	4,23	4,06	3,67
	j.t.	19,38	18,13	17,57	18,42	17,51	16,96	16,62
Electrica Transilvania Nord	î.t.	1,60	1,17	1,36	1,19	0,98	1,13	1,21
	m.t.	4,62	4,59	4,58	4,49	4,69	4,56	4,64
	j.t.	14,17	12,93	12,08	12,29	12,22	11,69	10,98

Capitolul reliefează necesitatea unei viziuni unitare și a unor eforturi susținute privind optimizarea funcționării RED, atât pentru asigurarea unui serviciu de calitate în condiții sporite de fiabilitate cât și în ceea ce înseamnă reducerea CPT (inclusiv prin reconfigurarea RED).

Capitolul 3 prezintă sistematizat metodele actuale de soluționare a reconfigurării RED din cadrul SEE complexe. Se menționează faptul că este vorba despre o problemă de optimizare de mari dimensiuni, neliniară (sau liniarizată), de regulă cu variabile atât reale, cât și întregi.

Metodele de soluționare a problemei discutate se pot împărți în două mari categorii:

- metode de optimizare bazate pe tehnici clasice de modelare matematică – programare liniară (inclusiv în numere întregi sau mixtă), programare neliniară, programare dinamică etc. [Haghighat2016], [Lopez2016], [Toure2015];
- tehnici euristice (Sequential Switch Opening – SSO, Branch Exchange – BE) [Ding2015a] și meta-euristice (Algoritmi Genetici – AG, Algoritmi Evolutivi – AE [Abdelaziz2017], [Vieira2016], Particle Swarm Optimization – PSO [Tuladhar2016], Rețelele Neuronale Artificiale – RNA [Fathabadi2016], Harmony Search – HS [Muthukumar2017], Tabu Search – TS [Kuihua2016], Simulated Annealing – SA [Nie2012], Ant Colony Optimization – ACO [Ameli2017], Artificial Bee Colony – ABC [Sulaima2014], Artificial Immune System – AIS [Souza2016], Charged System Search – CSS, Biogeography Based Optimization – BBO etc.).

Există și posibilitatea utilizării unor metode hibride, rezultate prin combinarea a două sau mai multe metode, precum și includerea unor tehnici de tip fuzzy.

În continuare se trec în revistă metodele utilizate efectiv la soluționarea aplicațiilor, celelalte fiind prezentate în detaliu în cadrul tezei.

Metodele euristice de tip SSO (Sequential Switch Opening) demarează procesul de reconfigurare de la schema inițială complet buclată a RED, ceea ce înseamnă că toate echipamentele de comutație (întreruptoare, separatoare sub sarcină, cuple) sunt închise. Ele constau, în esență, dintr-o secvență ordonată de deschidere a acestor echipamente, până la obținerea unei structuri finale radiale. De regulă pierderile de putere activă cresc în raport cu cele de la starea complet buclată, urmărindu-se la fiecare pas găsirea acelei manevre care conduce la cea mai mică creștere. Evident, se elimină situațiile în care ar rămâne consumatori nealimentați (insule în cadrul rețelei). Căutarea se încheie în momentul în care a rezultat o structură radială. Ca la orice metodă euristică, nu există nicio garanție că soluția găsită este cea optimă (dar cu certitudine este quasi-optimă) [Zhu2015]. Independența soluției de starea inițială a echipamentelor de comutație (schema inițială radială a rețelei) constituie un avantajul major. Diversele versiuni ale metodei SSO se diferențiază între ele prin regulile euristice aplicate pentru alegerea locului de secționare a rețelei, prin modul de calcul al circulației de puteri, prin maniera de definire a FOB (optimizare monocriterială sau multicriterială) etc. Metoda este simplă, dar necesită luarea unor măsuri suplimentare pentru reducerea timpului de calcul.

În [Gomes2005] formularea problemei de reconfigurare este cea clasică, urmărind minimizarea pierderilor de putere activă în condițiile respectării restricțiilor referitoare la valorile tensiunilor în noduri și ale circulațiilor de puteri prin elementele de rețea. La fiecare pas se efectuează o explorare exhaustivă a posibilităților de deconectare, cu un calcul simplificat al circulației de puteri. Se alege acel echipament de comutație care conduce la cele mai mici pierderi de putere activă (în urma deconectării), în condițiile unui regim fezabil. După obținerea configurației radiale finale, se efectuează o căutare suplimentară în jurul fiecărui echipament de conectare deschis (verificând dacă separatoarele "vecine" nu conduc la regimuri cu pierderi mai mici de putere activă). Se apreciază totuși că din cauza explorării exhaustive de la fiecare iterație timpul de calcul este destul de mare.

În [Raju2008] se utilizează o metodă asemănătoare cu cea de mai sus, cu observația că acea căutare suplimentară se realizează cu o metodă euristică de tip BE.

Metoda utilizată în [Gomes2005] este dezvoltată în continuare în [Gomes2006] printr-o serie de îmbunătățiri menite să reducă timpul de calcul. Determinarea circulației de puteri este înlocuită cu optimizarea circulației de puteri (Optimal Power Flow – OPF), care înglobează și

respectarea restricțiilor referitoare la valorile tensiunilor și ale încărcării elementelor de rețea. Explorarea exhaustivă este substituită de o analiză de sensibilitate în cadrul OPF. În cadrul calculului final de circulație de puteri, când se determină pierderile pe ansamblul rețelei, se reintroduce natura discretă a poziției echipamentelor de comutație.

[Fajardo2008a] extinde preocupările anterioare considerând rețele de distribuție cu mai multe puncte de alimentare, inclusiv pentru situațiile când costurile energiilor furnizate sunt diferite. [Fajardo2008b] oferă o abordare dinamică a problemei de reconfigurare pentru un anumit interval de timp, analizând situația pentru momente bine definite. La fiecare pas al procesului iterativ de reconfigurare se încearcă deschiderea echipamentului de comutare aferent elementului de rețea cel mai slab încărcat care face parte dintr-o buclă închisă.

Elementul suplimentar introdus în [Subrahmanyam2010] și în [Zidan2011] constă în aplicarea metodelor de tip SSO pentru cazul rețelelor cu încărcare dezechilibrată. În plus, [Zidan2011] ține cont și de prezența surselor de generare distribuite.

În [Prasanna2015] se utilizează o metodă euristică de tip SSO asemănătoare cu cea din [Gomes2005]. Pentru calculul circulației de puteri se folosește o metodă de tip "backward/forward" [Rupa2014] îmbunătățită. La fiecare pas al procesului de reconfigurare se determină elementul de rețea pentru care diferența dintre valorile tensiunilor la cele două capete este minimă și se încearcă deschiderea echipamentului de comutare aferent.

Algoritmii genetici (AG) fac parte din familia algoritmilor evolutivi (AE), fiind folosite în special pentru rezolvarea unor probleme de optimizare discretă (combinatorie), unde populația este reprezentată de soluții din domeniul fezabil al problemei, codificate binar, iar principalii operatori sunt cei de încrucișare și selecție (cel de mutație având probabilitate mică de aplicare).

[Hong2005] utilizează în cadrul AG o codificare binară de tip Prüfer [Rothlauf2006] bazată pe noduri în locul celei uzuale, bazate pe laturi. Rezultă cromozomi cu un număr mai mic de gene și se evită testul suplimentar de radialitate a rețelei aferente soluției curente de reconfigurare. În ceea ce privește definirea FOB, se remarcă înglobarea în expresia ei a unor termeni care "penalizează" încălcarea restricțiilor [Kilyeni2015b] referitoare la tensiunile în noduri, curentul maxim admisibil prin elementele de rețea etc.

În [Mendoza2006] atenția este focalizată asupra îmbunătățirii adaptabilității și eficienței metodelor care utilizează AG. Se reduce spațiul de căutare printr-o strategie nouă de codificare și prin noi operatori genetici ("încrucișare accentuată", "mutație direcționată"). Populația de dimensiuni mai reduse se obține prin intermediul elementelor de rețea care formează o "buclă de sistem", cea ce înseamnă că toți indivizii reprezintă soluții fezabile (rețele debuclate), fiind necesară doar verificarea restricțiilor de natură tehnică. [Mendoza2009] transformă problema clasică de reconfigurare într-una multicriterială, adăugându-se în expresia funcției obiectiv patru componente legate de siguranța în funcționare. Se utilizează un AG de tip algoritm micro-genetic (μ AG) capabil să genereze soluții optime de tip Pareto.

Preocuparea de a crește eficiența AG este reflectată și în [Carreno2008]. Eforturile sunt îndreptate în două direcții: realizarea unei codificări eficiente, care să ușureze implementarea operatorilor genetici, și evitarea pierderii diversității populației. Codificarea se bazează pe laturile sistemului (elemente de rețea), primele $n-1$ gene ale cromozomului (n – numărul de noduri) corespunzând structurii radiale aferente iar următoarele $r-(n-1)$ laturilor de legătură, care ar închide bucle (r – numărul de elemente de rețea). În această manieră se poate genera o populație inițială care cuprinde exclusiv topologii radiale și se pot implementa operatorii de recombinare și mutație pentru a genera noi topologii radiale pornind de la cele inițiale (curente). După faza de recombinare are loc o ameliorare locală în scopul menținerii gradului de diversitate.

Elementele de noutate aduse de [Mendes2013] se referă la introducerea în strategia de reconfigurare a modificării poziției plotului la transformatoarele cu reglaj de tensiune sub sarcină. Aplicațiile vizând RED reale de mari dimensiuni, pentru fiecare soluție se efectuează un calcul complet de circulație de puteri. Pe lângă un AG clasic se utilizează și un algoritm memetic – o extensie a AG clasic cu o tehnică de căutare locală, evitând blocarea prematură a algoritmului.

[Storti2014] prezintă o abordare a problemei de reconfigurare pentru rețelele de tip "smart grid" care cuprind pe lângă sursele de generare distribuită și echipamente de tip FACTS. Abordarea multicriterială vizează minimizarea pierderilor de putere activă și maximizarea încărcării surselor distribuite, relațiile de restricție fiind cele referitoare la valorile tensiunilor și ale încărcărilor elementelor de rețea. În scopul reducerii timpului de calcul aferent AG se utilizează o reprezentare simplificată a rețelei bazată pe teoria grafurilor.

[Eldurssi2014] abordează reconfigurarea ca o problemă de optimizare multicriterială. Ponderarea componentelor FOB (valori normalizate – aduse "la numitor comun") se poate face determinist sau în manieră fuzzy. Pentru a evita dificultățile legate de stabilirea ponderilor, se face uz de o versiune de tip NSGA ("non-dominated sorting GA") a AG – FNSGA ("fast non-dominated sorting GA"). NSGA utilizează două criterii pentru a defini "dominanța" (sau "ne-dominanța"): dacă o soluție nu este mai proastă la toate criteriile decât altă soluție și este strict mai bună la cel puțin un criteriu, atunci prima este "dominantă" față de a doua soluție (a doua este "ne-dominantă" față de prima). FNSGA operează cu un singur clasament, ceea ce reduce timpul de calcul. În scopul verificării caracterului radial (nebuclat) al rețelei se face apel la o metodă bazată pe matricea topologică de incidență noduri-laturi. [Eldurssi2015] aprofundează implementarea algoritmului FNSGA, prezentând o serie de aplicații mai consistente pentru sisteme de distribuție de dimensiuni relativ mai mari. O abordare asemănătoare se prezintă și în [Vieira2016], unde funcția obiectiv înglobează și aspecte legate de siguranța în funcționare a RED și de indicele de indisponibilitate a surselor de generare distribuită.

În [Nafisi2015] se prezintă problema reconfigurării într-un context mai larg, urmărind găsirea soluțiilor optime de debucare pentru durata unei zile (pentru care se cunoaște curba de sarcină orară). FOB cuprinde trei termeni: costul pierderilor de energie activă, costul operațiilor de comutare și "penalizarea" încălcării restricțiilor privind tensiunile în noduri și încărcarea elementelor de rețea (în maniera din [Kilyeni2015b]).

Elementul de noutate adus de [Deng2016] este aplicarea unui algoritm de tip QGA (Quantum Genetic Algorithm), care utilizează unele dintre principiile mecanicii cuantice în procesul de selecție și de calcul al valorii funcției obiectiv, rezultând o găsire mult mai rapidă a zonelor avantajoase din spațiul soluțiilor.

În [Abdelaziz2017] dimensiunea populației nu mai este constantă pentru fiecare generație, ci variază în manieră adaptivă pe parcursul evoluției algoritmului (Genetic Algorithm with VArIable Population Size – GAVAPS).

Este evidentă focalizarea atenției asupra metodelor de soluționare bazate pe tehnici euristice și meta-euristice, pregătind terenul pentru capitolele următoare, care se referă la metodele concrete utilizate în teză și la studiile de caz realizate. Se remarcă, în mod critic, faptul că foarte puține lucrări utilizează un calcul complet de circulație de puteri în c.a., cu toate că posibilitățile oferite de tehnica actuală de calcul permit acest lucru. În consecință, teza utilizează în toate situațiile un calcul riguros al regimului de funcționare. De asemenea, multe lucrări prezintă aplicații doar pentru sisteme de dimensiuni reduse, planând un semn de întrebare asupra utilizării metodelor propuse pentru RED de mari dimensiuni. În cadrul tezei se vor aborda și aplicații pentru RED reale cu peste 1000 de noduri.

Capitolul 4 vizează tehnicile de inteligență artificială utilizate în cadrul tezei de doctorat, în particular fiind vorba despre AG. Pe lângă elementele de natură teoretică se prezintă și o serie de aspecte practice de implementare în soluționarea reconfigurării rețelelor de distribuție. Se au în vedere atât AG cu codificare reală (folosiți la optimizarea circulației de puteri, cu considerarea elementelor specifice rețelelor de distribuție a energiei electrice) cât și AG cu codificare binară (utilizați efectiv la soluționarea problemei propriu-zise de reconfigurare).

AG utilizează elemente de calcul evolutiv. La modul general, o tehnică de calcul de tip evolutiv este o metodă iterativă de rezolvare a problemelor de optimizare, bazată pe o procedură de căutare inspirată din evoluția biologică (de tip darwinist). Pentru rezolvarea problemei se utilizează o populație de soluții potențiale (elementele componente ale populației),

care evoluează prin aplicarea iterativă a unor operatori stocastici. Pentru a ghida căutarea către soluția optimă asupra populației se aplică transformări specifice evoluției naturale: selecția (elementele "cele mai valoroase" ale populației sunt favorizate – au șanse sporite de a supraviețui în generația următoare și de a participa la generarea de urmași), încrucișarea (similară cu înmulțirea din natură – pornind de la două sau mai multe elemente ale populației, numite părinți, se generează noi elemente, numite urmași). În funcție de calitatea lor, măsurată prin valoarea aferentă a unei FOB, urmașii își pot înlocui părinții. Pentru a asigura diversitatea populației se utilizează mutația – se realizează, la fel ca în natură, transformări cu caracter aleator asupra elementelor populației permițând apariția unor trăsături noi (gene), care doar prin încrucișare și selecție nu ar fi apărut în cadrul populației [Kilyeni2014b], [Rothlauf2006], [Sastry2014], [Solomonesc2013].

În funcție de modul în care este construită populația și cum este realizată evoluția, tehnicile de calcul evolutiv se încadrează într-una din categoriile:

a) algoritmi genetici (AG), care se folosesc în special pentru rezolvarea unor probleme de optimizare discretă (combinatorie), unde populația este reprezentată de soluții din domeniul fezabil al problemei, codificate binar, iar principalii operatori sunt cei de încrucișare și selecție (cel de mutație având probabilitate mică de aplicare);

b) algoritmi evolutivi (AE), utilizați inițial pentru a rezolva probleme de optimizare continuă, unde populația este formată din elemente din domeniul de definiție al FOB, codificate prin valori zecimale reale. Operatorul principal este cel de mutație, fiind folosită și recombinarea. Pentru strategiile evolutive au fost dezvoltate scheme auto-adaptare a parametrilor de control.

Primul pas în configurarea unui AG este reprezentat de codificarea cromozomilor (indiferent de faptul că este vorba de AG cu codificare binară sau AG cu codificare reală). Aceștia pot conține orice număr de variabile și pot fi reprezentați ca șiruri sau arbori de valori binare, întregi, reale, simboluri sau caractere. Utilizarea unor șiruri de valori binare simulează cel mai bine cromozomii reali, dar necesită un algoritm de conversie, fiecare variabilă fiind reprezentată de mai multe gene. Codificarea cu valori întregi și reale permite accesul direct la variabile, însă operatorii de reproducere sunt mai dificil de implementat.

Populația înglobează toate soluțiile posibile și are rolul de a le menține pe parcursul unei iterații. Mărimea populației este reprezentată de numărul de indivizi și se stabilește în funcție de numărul de variabile și de caracterul problemei. Diversitatea populației este asigurată de numărul de indivizi diferiți care intră în componența ei. Pentru a acoperi cât mai bine spațiul de căutare este nevoie de menținerea diversității prin alegerea unei mărimi adecvate a populației și prin configurarea corespunzătoare a operatorilor de reproducere. După stabilirea tipului de codificare și a mărimii populației se generează în mod aleatoriu populația inițială.

În etapa de evaluare se realizează decodificarea cromozomului și fiecare membru al populației este evaluat. Pentru evaluarea indivizilor din cadrul populației se definește o FOB (funcție de potrivire – "fitness") care măsoară calitatea indivizilor. Cu cât valoarea acestei funcții este mai mare cu atât individul în cauză reprezintă o soluție mai bună.

Etapa de selecție are ca scop alegerea indivizilor care vor avea șansa de a participa la reproducere. Selecția se face pe baza evaluării de la pasul anterior, prin trunchiere, prin competiție, prin roată de ruletă etc. Metodele de selecție trebuie să asigure pe de o parte că cei mai buni indivizi vor fi selectați, iar pe de altă parte să ofere o mică posibilitate și indivizilor mai slabi, pentru a se evita blocarea soluției în optime locale.

Rolul reproducerii este de a introduce material genetic nou în populație în scopul explorării întregului spațiu de căutare. Operatorii de reproducere (recombinare și mutație) sunt aplicați cu probabilități stabilite anterior, astfel încât nu toate perechile de părinți vor crea urmași și nu toate genele urmașilor vor suferi mutații. Maniera de implementare al operatorilor de reproducere este influențată de modul de codificare ai cromozomilor.

Un alt concept folosit în cadrul AG este elitismul. Acesta presupune copierea celei mai bune soluții de la o generație la alta fără nici un fel de modificare.

Procesul de calcul iterativ se încheie atunci când îmbunătățirea soluției nu mai este semnificativă pe parcursul unui număr de iterații stabilit aprioric (s-a obținut soluția optimă).

Contribuțiile personale din cadrul acestui capitol constau în realizarea unei sinteze originale asupra AG, ca o categorie distinctă de AE; sistematizarea modelului matematic pentru AG cu codificare binară, care vor fi utilizați la rezolvarea problemei propriu-zise de reconfigurare a RED și pentru cei cu codificare reală, necesari pentru soluționarea problemei de optimizare a circulației de puteri.

Capitolul 5 are ca obiectiv elaborarea modelului matematic aferent reconfigurării optime a RED și soluționarea acestuia. În prima parte se prezintă modelul matematic al reconfigurării optime a RED. A doua parte tratează problemele care trebuie soluționate în cadrul oricărei metode de reconfigurare – calculul circulației de puteri, respectiv optimizarea regimului de funcționare. Toate metodele de reconfigurare utilizate în cadrul tezei folosesc un calcul complet de circulație de puteri, cu soluționarea modelului matematic prin metode numerice "clasice" specifice sistemelor de ecuații neliniare. Pentru optimizarea regimului de funcționare se utilizează o metodă meta-euristică bazată pe aplicarea unui algoritm genetic, completată cu elementele specifice RED. A treia parte a capitolului prezintă o metodă euristică "clasică" de soluționare a reconfigurării optime, de tip SSO – aplicarea secvențială a posibilităților de secționare a rețelei (până la obținerea unei structuri debucate). A patra parte are ca obiect o metodă de soluționare a problemei discutate folosind tehnici de inteligență artificială, în speță algoritmul genetic prezentat în capitolul 4. Pe baza experienței anterioare aplicarea tehnicilor de calcul evolutiv vizează atât metoda efectivă de reconfigurare (se utilizează un algoritm genetic binar), cât și optimizarea regimului de funcționare (se utilizează un algoritm genetic cu variabile reale). Calculul complet al circulației de puteri se realizează în manieră clasică, cu un algoritm Newton complet (fără "decuplare") [Kilyeni2015b].

Modelul matematic se referă la o RED care cuprinde n noduri (N – mulțimea nodurilor) și r elemente de rețea (R – mulțimea elementelor de rețea), din care n_l sunt linii electrice (L – submulțimea corespunzătoare), n_t sunt transformatoare (T – submulțimea corespunzătoare) și n_s sunt echipamente de comutare (S – submulțimea corespunzătoare).

Din punctul de vedere al problemei discutate, făcând abstracție de nodurile pasive (considerate noduri consumatoare, cu un consum nul de putere activă și de putere reactivă), există două tipuri distincte de noduri: generatoare (unde există surse de putere activă), în număr de g (G – submulțimea nodurilor generatoare), respectiv; consumatoare (unde nu există surse de putere activă), în număr de c (C – submulțimea nodurilor consumatoare).

În cazul funcționării buclate, unul dintre nodurile generatoare este considerat nod de echilibrare (e , $e \in G$). În cazul funcționării debucate, fiecare subrețea cuprinde un singur nod generator (un singur punct de alimentare), acela fiind chiar nodul de echilibrare.

Modelul matematic care descrie reconfigurarea optimă a RED reprezintă o problemă de optimizare neliniară cu restricții, de foarte mari dimensiuni, de tip mixt (variabile întregi și reale):

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \text{MINIM} \quad (1)$$

$$g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, \quad j=1, 2, \dots, p \quad (2)$$

$$g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0, \quad j = p+1, p+2, \dots, m \quad (3)$$

unde variabilele $x_1, x_2, \dots, x_n$ sunt întregi (binare), reflectând poziția elementelor de comutare (conectat sau deconectat); funcția obiectiv F – pierderile de putere activă pe ansamblul rețelei; relațiile de restricție (RR) de tip egalitate se referă la bilanțurile de puteri în nodurile rețelei (specifice calculului circulației de puteri), iar cele de inegalitate la limitarea superioară și inferioară a valorilor unor mărimi.

Având în vedere că este vorba de reconfigurarea RED, la RR menționate se adaugă două considerente suplimentare:

- la fiecare pas de soluționare rețeaua trebuie să fie conexă (fiecare consumator trebuie să fie alimentat, să nu existe "insule" nealimentate);
- soluția de reconfigurare trebuie să conducă la o topologie nebuclată (radială ramificată), cu alte cuvinte să cuprindă un număr de subrețele egal cu cel al punctelor de alimentare.

În aceste condiții, modelul matematic discutat poate fi definit în maniera următoare (cu mențiunea că se caută acea combinație de elemente deconectate care conduc la valoarea minimă a FOB, în condițiile respectării tuturor RR):

- variabile:

⇒ de stare (cele corespunzătoare circulației de puteri):

$$\delta_i, i \in N \setminus e, P_{ge}, U_i, i \in C, Q_{gi}, i \in G \quad (4)$$

și, eventual,

$$P_{ij}, Q_{ij}, ij \in R, S_{ij}, ij \in R \text{ sau } I_{ij}, ij \in R \quad (5)$$

⇒ de optimizare:

$$z_{ij}, ij \in S \quad (6)$$

unde $z_{ij}, ij \in S$ sunt variabile binare care indică starea elementului de rețea, valoarea "0" însemnând "conectat" ("închis") iar valoarea "1" – "deconectat" ("deschis");

- RR:

⇒ de tip egalitate (bilanțurilor de puteri în noduri):

$$\begin{cases} P_i(\mathbf{U}, \boldsymbol{\delta}, \mathbf{K}) - P_{gi} - P_{ci} = 0, & i \in N \\ Q_i(\mathbf{U}, \boldsymbol{\delta}, \mathbf{K}) - Q_{gi} - Q_{ci} = 0, & i \in N \end{cases} \quad (7)$$

unde puterile P_i și Q_i au expresiile:

$$\begin{cases} P_i = U_i^2 \cdot G_{ii} + \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} U_i \cdot U_j \cdot [G_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j)], & i \in N \\ Q_i = -U_i^2 \cdot B_{ii} + \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} U_i \cdot U_j \cdot [G_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j)], & i \in N \end{cases} \quad (8)$$

$\underline{Y}_{ij} = G_{ij} + j \cdot B_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n}$, fiind elementele matricei de admitanță nodală $\underline{Y}_n$;

⇒ de tip inegalitate (limitarea superioară și inferioară a valorii unor mărimi):

$$Q_{gi}^{\min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{\max}, \quad i \in G \quad (9)$$

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max}, \quad i \in N \quad (10)$$

$$S_{ij}^{\min} \leq S_{ij}(\mathbf{U}, \boldsymbol{\delta}, \mathbf{K}, \boldsymbol{\Omega}) \leq S_{ij}^{\max}, \quad ij \in R \quad (11)$$

unde puterile $\underline{S}_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij}$ au expresiile:

$$\begin{cases} P_{ij} = U_i^2 \cdot (G_{\ell_{ij}} + G_{\ell_{i0}}) - U_i \cdot U_j \cdot [G_{\ell_{ij}} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{\ell_{ij}} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j)] \\ Q_{ij} = -U_i^2 \cdot (B_{\ell_{ij}} + B_{\ell_{i0}}) - U_i \cdot U_j \cdot [G_{\ell_{ij}} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{\ell_{ij}} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j)] \end{cases} \quad (12)$$

$$S_{ij} = \sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2} \quad (13)$$

⇒ rețeaua trebuie să fie conexă (fiecare consumator să fie alimentat, să nu existe "insule");

⇒ rețeaua trebuie să fie debuclată (radială ramificată);

- funcția obiectiv (FOB) – pierderile de putere activă pe ansamblul rețelei:

$$FOB = \sum_{ij \in R} (\Delta P_{ij}) = \text{Minim} \quad (14)$$

unde (ΔP_{ij}) reprezintă pierderile de putere activă pe elementul de rețea ij .

Discutând în termeni de teoria grafurilor [Kilyeni2015b], RED i se asociază un graf neorientat (ne interesează doar topologia rețelei): vârfurile grafului corespund nodurilor rețelei, iar muchiile grafului elementelor de rețea (n vârfuri și r muchii). Debuclarea rețelei înseamnă găsirea unui arbore al grafului respectiv (denumit în continuare graful original).

În spiritul definirii sale, un arbore al grafului cuprinde $n-1$ muchii. Debuclarea rețelei presupune eliminarea a $r-(n-1)$ muchii din graful original, în condițiile menținerii caracterului conex și a eliminării ciclurilor. Cu alte cuvinte, trebuie "deconectate" $r-(n-1)$ elemente de rețea (trebuie asigurată "secționarea" RED în $r-n+1$ puncte). Graful original cuprinde $r-(n-1)$ cicluri, sau, în terminologia aferentă rețelelor electrice, RED conține $r-(n-1)$ bucle. Arborele corespunde, în esență, unei rețele radiale arborescente.

Elementele prezentate mai sus sunt valabile în condițiile unei RED cu o singură sursă de alimentare ($g=1$). În cazul rețelelor de distribuție complexe cu siguranță există mai multe puncte de alimentare. Rețeaua trebuie astfel secționată încât fiecare consumator să fie alimentat doar de la o singură sursă. În aceste condiții debuclarea va conduce la obținerea a câte unei rețele radiale arborescente pentru fiecare sursă. Vor trebui să rămână conectate $n-g$ elemente de rețea, ceea ce înseamnă eliminarea a $r-(n-g)$ bucle. Cu alte cuvinte, trebuie "deconectate" $r-(n-g)$ elemente de rețea (trebuie asigurată "secționarea" RED în $r-n+g$ puncte).

La studiile de caz din capitolul 7 se vor face precizări suplimentare privind modul cum se stabilesc concret valorile pentru r , n și g (pe lângă rețeaua de distribuție propriu-zisă de medie tensiune, în schemele considerate mai apare și o parte din rețeaua de înaltă tensiune).

La metoda de reconfigurare de tip SSO se pornește de la o structură complet buclată a RED (toate dispozitivele de comutare sunt închise). Se determină numărul de pași necesari pentru obținerea structurii debuclate optime și se realizează, pas cu pas, debuclarea RED, în condițiile respectării RR și a minimizarea valorii FOB. Algoritmul metodei este următorul:

- a) pe baza informațiilor referitoare la RED se stabilește lista posibilităților de debuclare;
- b) pe baza informațiilor referitoare la dimensiunile și structura RED, se calculează numărul de pași np care trebuie parcurși pentru debuclarea completă a rețelei (numărul de puncte de secționare sau numărul dispozitivelor de comutare care trebuie deschise):

$$np = r - (n - g) = r - n + g \quad (15)$$

- c) se calculează circulația de puteri pentru rețeaua complet buclată;
- d) se optimizează regimul de funcționare determinat la punctul anterior;
- e) la un pas oarecare k , $k = 1, 2, \dots, np$ al procesului de debuclare se determină linia electrică având cea mai mică încărcare din lista curentă a posibilităților de debuclare stabilită la punctul a) – candidat potențial pentru pasul curent al procesului de debuclare;
- f) se "deconectează" linia respectivă;
- g) se verifică dacă rețeaua rezultată în urma operației de la punctul f) a rămas "conexă";
- h) dacă rețeaua a rămas conexă se trece la punctul i), în caz contrar se actualizează lista curentă a posibilităților de debuclare prin "eliminarea" soluției curente de debuclare și se revine la punctul e) pentru a găsi o soluție de debuclare fezabilă (contorul k rămâne nemodificat);
- i) se calculează circulația de puteri pentru structura curentă a rețelei, rezultată în urma pasului f);
- j) se optimizează regimul de funcționare determinat la punctul anterior;
- k) se mărește valoarea contorului de pași k și se verifică condiția de terminare a procesului de debuclare: dacă $k > np$ calculul este terminat și se trece la punctul l), în caz contrar se sare la punctul e) pentru următorul pas al procesului de debuclare;
- l) soluția de debuclare curentă reprezintă soluția optimă de reconfigurare.

La metoda de reconfigurare bazată pe utilizarea AG se pornește de la o structură complet buclată a RED. Se stabilește lista posibilităților de debuclare (secționare) a RED, se generează aleator un set inițial de soluții de reconfigurare, se ameliorează iterativ setul de soluții prin procedee de evaluare, selecție, recombinare etc., până când soluția optimă curentă nu mai poate fi îmbunătățită. Varianta cea mai bună din ultimul set de soluții se consideră ca fiind soluția optimă de reconfigurare.

Fiecare cromozom din populație indică starea (conectat/deconectat) a dispozitivelor de comutare. Deoarece stările pot fi reprezentate prin caractere din alfabetul binar ("0" și "1"), este justificată folosirea versiunii binare a algoritmului genetic.

Cromozomul va avea lungimea ns (numărul dispozitivelor de comutare):

$$\mathbf{x}_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ins}\}, \quad i = 1, 2, \dots, n_c \quad (16)$$

În faza de evaluare, fiecărui cromozom îi va fi atribuită o valoare bazată pe FOB. Calculul se consideră terminat dacă pentru un număr de iterații, stabilit apriori, soluția nu mai poate fi îmbunătățită. În aceste condiții, pașii algoritmului sunt următorii:

- a) pe baza informațiilor referitoare la RED se stabilește lista posibilităților de debuculare;
- b) pe baza informațiilor referitoare la dimensiunile și structura RED, se calculează np – numărul de puncte de secționare sau numărul dispozitivelor de comutare care trebuie deschise pentru a obține o structură debucată:

$$np = r - (n - g) = r - n + g \quad (17)$$

- c) se inițializează în mod aleator, cu valori "0" și "1", genele celor n_c cromozomi care compun populația – np gene cu valoarea "1" și $ns - np$ gene cu valoarea "0":

$$\mathbf{x}_i^0 = \{x_{i,1}^0, x_{i,2}^0, \dots, x_{i,ns}^0\}, \quad i = 1, 2, \dots, n_p \quad (18)$$

- d) pentru fiecare cromozom se verifică dacă rețeaua aferentă are o structură debucată sau nu. Dacă rețeaua nu este debucată, se generează succesiv alți cromozomi, până la obținerea unei structuri debucate;
- e) se calculează circulația de puteri pentru configurația aferentă fiecărui cromozom și se optimizează regimul de funcționare (în scopul satisfacerii cu certitudine a RR referitoare la valorile tensiunilor în noduri și ale încărcării elementelor de rețea);
- f) se evaluează populația inițială pe baza valorii FOB , cel mai bun individ (procedeu elitist) fiind salvat în $\mathbf{x}_{elit}^0$:

$$f(\mathbf{x}_{elit}^0) = \min\{FOB(\mathbf{x}_i^0)\}, \quad i = 1, 2, \dots, n_c \quad (19)$$

- g) la un pas oarecare k al procesului de calcul, $k = 0, 1, 2, \dots$, se aplică unul dintre procedeele de selecție prezentate în capitolul 4; în urma selecției va rezulta o populație $\mathbf{x}_{sel,i}$, $i = 1, 2, \dots, n_{sel}$, a cărei membri vor avea șanse la recombinare $n_{sel} = n_c / 2$:

- se formează $n_{pr} = \chi \cdot n_c / 2$ perechi de cromozomi care vor fi supuși încrucișării și $n_{pc} = n_c / 2 - n_{pr}$ perechi ce vor fi copiate nealterate;
- se formează câte doi urmași din cele n_{pr} perechi prin încrucișare într-unul sau mai multe puncte, conform procedeele indicate în capitolul 4, respectând condiția menționată la punctul c) al algoritmului;
- se calculează numărul de cromozomi din populația formată la pasul anterior, ce vor suferi mutație: $n_{cm} = \mu \cdot d \cdot n_c$, genele sunt modificate în maniera descrisă în capitolul 4;
- primul cromozom din populația rezultată la pasul anterior este înlocuit cu cel mai bun din vechea populație:

$$\mathbf{x}_1^{k+1} = \mathbf{x}_{elit}^k \quad (20)$$

- pentru fiecare cromozom al populației curente se verifică dacă rețeaua aferentă are o structură debucată sau nu. Dacă nu, atunci se generează succesiv alți cromozomi (prin procedeele descrise mai sus sau în mod aleator), până la obținerea unei structuri debucate;
- se calculează circulația de puteri pentru configurația aferentă fiecărui cromozom și se optimizează regimul de funcționare;
- se evaluează populația curentă pe baza valorii FOB , cel mai bun individ fiind salvat în $\mathbf{x}_{elit}^k$:

$$f(\mathbf{x}_{elit}^k) = \min\{FOB(\mathbf{x}_i^k)\}, \quad i = 1, 2, \dots, n_c \quad (21)$$

- h) se verifică condiția de terminare a calculelor – imposibilitatea ameliorării valorii $FOB(\mathbf{x}_{elit})$ pentru un anumit număr de iterații: dacă această condiție este satisfăcută calculul iterativ se consideră terminat și se trece la punctul j), în caz contrar, se mărește cu 1 contorul de iterații k și se sare la punctul e);
- j) structura definită de ultimul $\mathbf{x}_{elit}$ constituie soluția de reconfigurare optimă a RED.

Pe lângă adaptarea metodelor de analiză și optimizare a regimurilor de funcționare a SEE complexe pentru cazul RED, se evidențiază următoarele contribuții originale:

- definitivarea modelului matematic utilizat pentru reconfigurarea optimă a rețelelor electrice de distribuție;
- clarificarea numărului de "bucle" ("cicluri" conform teoriei grafurilor) și, implicit a numărului necesar de secționări ale RED pentru a asigura o structură debucată pentru soluțiile de reconfigurare, în funcție de numărul de puncte de alimentare;
- elaborarea unei metode euristice de tip SSO pentru reconfigurarea optimă a RED, care pornește de la schema complet buclată și se bazează pe aplicarea secvențială a posibilităților de secționare a rețelei, până la obținerea unei structuri conexe, complet debucate;
- elaborarea unei metode utilizând AG cu codificare binară pentru reconfigurarea optimă a RED.

Capitolul 6 are ca obiectiv prezentarea instrumentelor software utilizate pentru studiile de reconfigurare a RED: cel care soluționează optimizarea circulației de puteri în rețelele de distribuție complexe, respectiv cel care rezolvă problema propriu-zisă a reconfigurării optime. Programele de calcul au la bază instrumentele soft prezentate în [Solomonesc2013], referitoare la extinderea rețelelor de transport al energiei electrice, la care s-au adus modificările necesare legate de specificul RED și de studiile de reconfigurare (în loc de cele de extindere). Instrumentele soft utilizează mediul de lucru oferit de pachetul Matlab. Interfețele permit compatibilizarea la nivel de bază de date cu pachetul de programe PowerWorld (soft de firmă cu licență) [Power World], Power (elaborat la Departamentul de Electroenergetică) [Kilyeni2015b] și MatPower (versiune academică) [MatPower]. Toate programele de calcul permit configurarea parametrilor algoritmilor genetici și alegerea opțiunilor specifice problemei, unde este cazul.

Capitolul 7 este în întregime original, constituind principala parte aplicativă a lucrării. Se prezintă rezultatele obținute prin implementarea tehnicilor euristice și meta-euristice în soluționarea problemei reconfigurării optime a RED. Aplicațiile au pornit de la rețele test de mici dimensiuni elaborate la Departamentul de Electroenergetică al UPT (Test 13) și rețele test IEEE consacrate (IEEE 30, IEEE 33, IEEE 123 etc.), ca apoi să se treacă la rețele de distribuție reale, de mari dimensiuni – Enel Distribuție Banat și Electrica Muntenia Nord. Din motive de "spațiu", pentru prezentarea în cadrul tezei au fost selectate trei RED: una de tip test (IEEE 33) și două reale, de mari dimensiuni, aparținând Enel Distribuție Banat (RED Timișoara și RED Timiș).

Prima parte a capitolului prezintă rezultatele obținute pentru rețeaua IEEE 33 (utilizată în vederea verificării și calibrării algoritmului de reconfigurare elaborat în cadrul lucrării și a instrumentelor soft dezvoltate), a doua parte se referă la RED Timișoara (102 noduri) iar a treia parte are ca obiect RED Timiș (1037 noduri). RED Timișoara acoperă o parte consistentă din zona Timișoara a rețelei deservite de Enel Distribuție Banat. RED Timiș modelează în detaliu întreaga rețea a zonei Timiș din cadrul Enel Distribuție Banat. Pentru fiecare rețea sunt prezentate atât topologia și parametrii elementelor de rețea cât și rezultatele circulației de puteri pentru regimurile de bază. De asemenea se oferă o serie de detalii despre regimurile debucate obținute în urma procesului de reconfigurare, indicându-se și soluțiile quasi-optime posibile (însoțite de recomandări practice la RED reale). Studiile de reconfigurare au fost determinate cu ambele metode prezentate în capitolul 5: cea euristică de tip SSO (din motive de spațiu, în teză apare doar rețeaua test IEEE 33), respectiv cea care utilizează un AG (în teză apar toate cele 3 RED).

În ceea ce privește maniera concretă de prezentare și discutare a rezultatelor, se remarcă următoarele aspecte cu valabilitate generală pentru toate rețelele analizate:

- sunt prezentate atât topologia și parametrii elementelor de rețea, cât și rezultatele circulației de puteri pentru regimurile de bază;
- studiile de reconfigurare sunt realizate pentru regimul de bază al rețelei test IEEE 33, respectiv pentru regimuri reale uzuale în cazul rețelelor RED Timișoara și RED Timiș;
- analizele pot fi extinse, fără dificultate, și la alte regimuri posibile de funcționare;
- soluția optimă de reconfigurare este descrisă în detaliu, cu toate punctele de separare rezultate în rețeaua analizată, împreună cu datele caracteristice ale regimului aferent;
- pe lângă soluția optimă, sunt prezentate și alte variante posibile (soluții quasi-optime), rezultate în procesul de optimizare sau pe baza analizei soluției optime;

- studiile de reconfigurare se finalizează cu recomandări practice, utile pentru operatorii de distribuție (mai ales în cazul rețelelor reale – RED Timișoara și RED Timiș);
- se analizează și aspecte de detaliu legate de evoluția AG de reconfigurare optimă.

Din motive de spațiu, se prezintă doar rezultatele pentru RED test IEEE 33 (fig. 3, configurația complet buclată, o singură sursă, 34 noduri, 38 elemente de rețea).

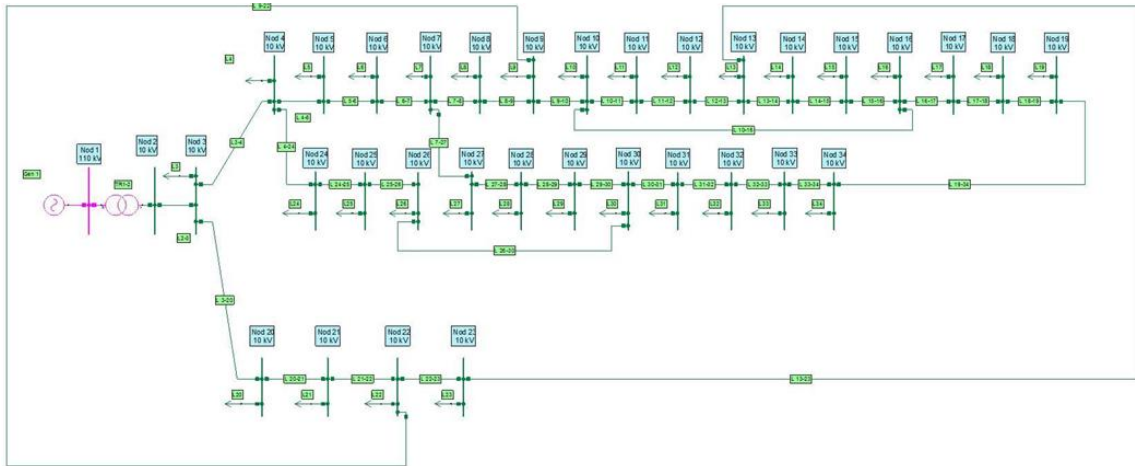


Fig. 3. Structura RED test IEEE 33

Pentru regimul considerat puterea activă consumată este de 3,44 MW, cea reactivă de 1,65 MVar, puterea activă generată este de 3,561 MW, cea reactivă de 1,688 MVar. Toate tensiunile sunt în banda admisă. Pierderile totale de putere activă sunt de 0,121 MW – 3,52 % (din care 0,029 MW la 110 kV, ceea ce înseamnă practic transformatorul, și 0,092 MW – 2,67 % – la 10 kV, ceea ce înseamnă practic liniile de 10 kV).

Înainte de a efectua reconfigurarea, se determină numărul np de puncte de secționare (numărul de "bucle" din cadrul rețelei sau de "cicluri" în termeni de teoria grafurilor), cu alte cuvinte numărul de pași care trebuie parcurși până la debucularea completă a rețelei. Numărul de elemente de rețea este $r = 38$, numărul de noduri este $n = 34$ iar cel de noduri generatoare $g = 1$, ceea ce înseamnă $np = 5$ (conform celor prezentate în cap. 5).

În primă instanță reconfigurarea s-a efectuat cu metoda euristică quasi-optimală de tip SSO. S-a considerat că există toate posibilitățile de debuculare (fiecare tronson de linie se poate deconecta la ambele capete). Soluția de reconfigurare este prezentată în fig. 4, însemnând deconectarea tronsoanelor 8-9, 10-11, 15-16, 18-19 și 26-30).

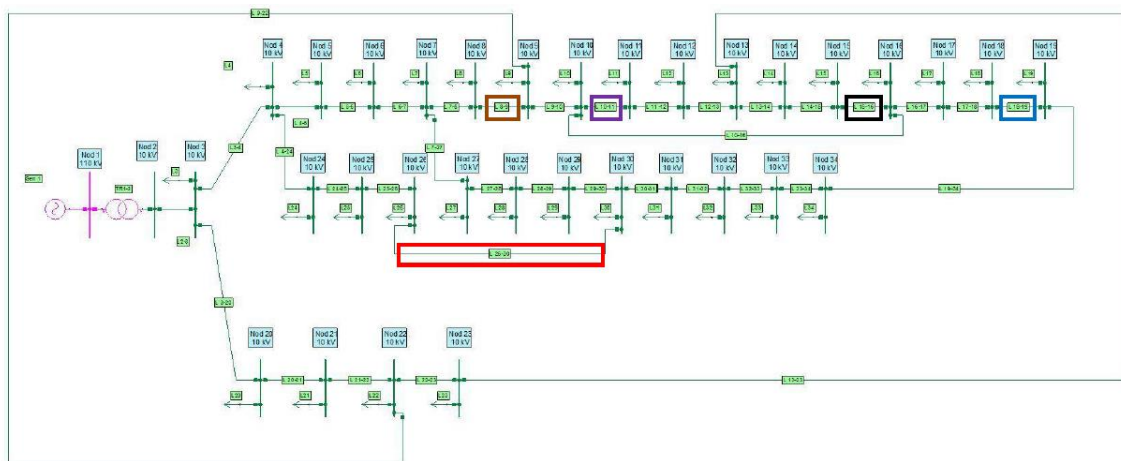


Fig. 4. Structura optimă de reconfigurare pentru RED test IEEE 33

Pentru regimul obținut după reconfigurare puterea consumată activă și reactivă rămân nemodificate (3,44 MW, respectiv 1,65 MVar), puterea activă generată este de 3,568 MW, iar cea reactivă de 1,699 MVar. Toate tensiunile sunt în benzile admise.

Pierderile totale de putere activă sunt de 0,128 MW (din care 0,030 MW la 110 kV, respectiv 0,0978 MW la 10 kV). Comparativ cu regimul inițial complet buclat, pierderile de putere activă au crescut de la 0,121 MW la 0,128 MW, ceea ce înseamnă o creștere de 5,6 % (absolut justificată prin trecerea de la regimul complet buclat la cel debuclet).

Reconfigurarea cu metoda utilizând AG conduce la o soluție similară cu cea anterioară, lucru explicabil prin dimensiunile reduse ale rețelei.

Figurile 5 și 6 prezintă evoluția algoritmului pentru determinarea soluției optime de reconfigurare. Figura 5 abordează acest aspect prin prisma valorii relative a FOB aferentă soluției optime curente, obținută prin raportarea la cea de la prima iterație.

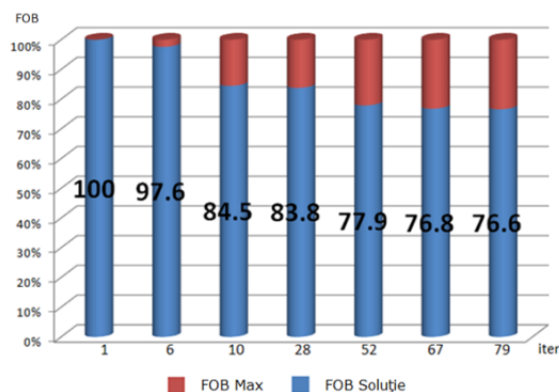


Fig. 5. Evoluția valorii FOB (comparativ cu valoarea de la prima iterație)

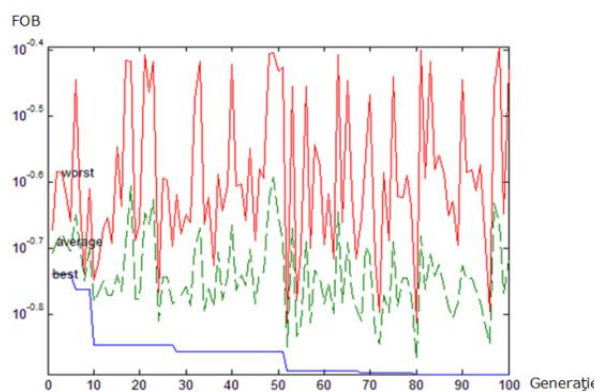


Fig. 6. Evoluția valorii FOB (valoarea cea mai bună, cea medie și cea mai proastă)

Analiza fig. 5 evidențiază faptul că valoarea FOB prezintă îmbunătățiri pe tot parcursul derulării algoritmului, cu următoarele amendamente:

- în figură au fost reprezentate valorile FOB doar pentru iterațiile unde au apărut modificări semnificative ale acestora (ceea ce se vede și analizând curba albastră din fig. 5);
- ameliorarea totală obținută pentru soluția optimă este de 23,4%;
- la iterația 28 s-a obținut un câștig de 16,2 % (în comparație cu iterația 1), ceea ce înseamnă o valoare medie de circa 3% pentru câte 5 iterații;
- la iterația 52 s-a obținut un câștig de 5,9 % (în comparație cu iterația 28), ceea ce înseamnă o valoare medie de circa 1,2% pentru câte 5 iterații;
- la iterația 67 s-a obținut un câștig de 1,1 % (în comparație cu iterația 52), ceea ce înseamnă o valoare medie de circa 0,4% pentru câte 5 iterații;
- la iterația 79 (soluția finală) s-a obținut un câștig de 0,2 % (față de iterația 67), ceea ce înseamnă o valoare medie de circa 0,08% pentru câte 5 iterații;
- având în vedere că valoarea medie, pe parcursul întregului proces de optimizare, a câștigului pe câte 5 iterații este de circa 1,5 %, evoluția descendentă a acestei valori, prezentată la punctele anterioare, este normală: 3 %, 1,2 %, 0,4 %, 0,08 % (se observă o ameliorare mult mai accentuată în prima parte a procesului de optimizare și un câștig mai redus apoi).

Analiza fig. 6 evidențiază concluzii similare cu cele prezentate anterior (evoluția valorii "best" – culoarea albastru). De asemenea, se observă evoluția mult mai "neregulată" a valorii medii pentru întreaga populație, corespunzătoare iterației curente ("average" – culoarea verde), respectiv a valorii celei mai proaste ("worst" – culoarea roșie).

Analizele suplimentare permit formularea unor concluzii referitor la soluții quasi-optime, cu alte cuvinte zonele de rețea unde trebuie să fie asigurate condiții de decuplare (fig. 7):

- bucla 1: 26-30, 30-29, 29-28;
- bucla 2: 33-34, 34-19, 18-19, 18-17;
- bucla 3: 10-11, 11-12, 12-13;
- bucla 4: 13-14, 14-15, 15-16;
- bucla 5: 8-9, 9-22.

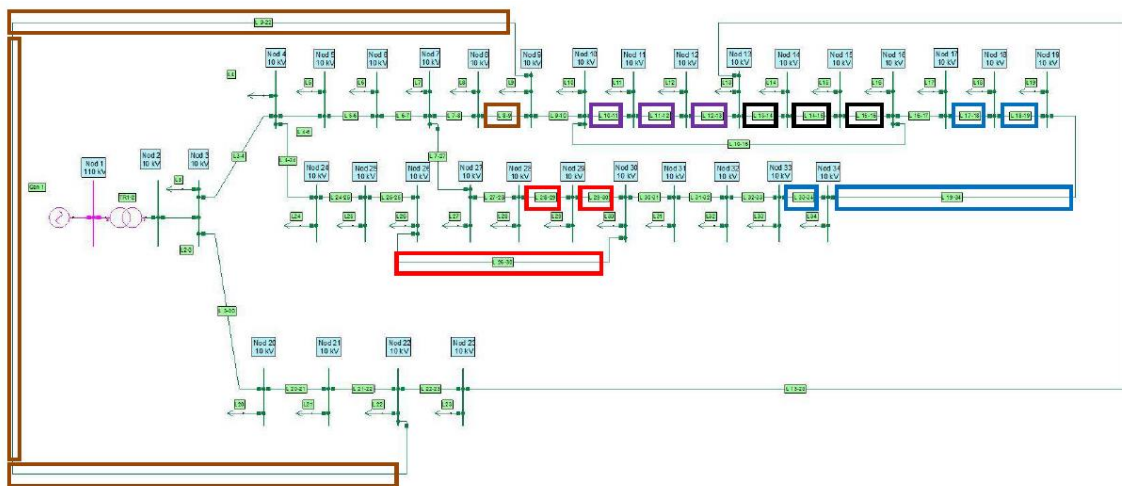


Fig. 7. Domeniul soluțiilor practice de reconfigurare pentru RED test IEEE 33

În final, se poate afirma că concluziile rezultate pe parcursul întregului capitol, referitoare la reconfigurarea optimă a RED, sunt de o deosebită utilitate atât pentru OD, la modul general, cât și pentru Enel Distribuție Banat, în particular.

Capitolul 8 cuprinde concluziile generale și prezentarea sistematizată a contribuțiilor originale ale autorului (menționate în mare parte la descrierea capitolelor anterioare), precum și reliefaarea direcțiilor și perspectivelor oferite de lucrarea de față pentru continuarea cercetărilor și aplicarea rezultatelor și a experienței obținute. Metodologiile și programele de calcul elaborate sunt de aplicabilitate generală, oferind un instrument eficient operatorilor de distribuție a energiei electrice, precum și altor entități specializate, cu preocupări în domeniul RED.

Rezultatele prezentate în teză au fost și vor fi valorificate în cadrul unor contracte de cercetare științifică încheiate între Universitatea Politehnica Timișoara, Centrul de cercetare pentru analiza și optimizarea regimurilor de funcționare a SEE, și Enel Distribuție Banat, Enel Distribuție Dobrogea, Electrica Muntenia Nord și alți agenți economici. De altfel, la baza stabilirii temei tezei de doctorat a stat și interesul manifestat de operatorii de distribuție în ceea ce privește regimurile de funcționare și reconfigurarea RED.

De asemenea, o parte a rezultatelor obținute în cadrul tezei au fost publicate și sunt în curs de publicare. Se remarcă faptul că din totalul de 7 lucrări proprii până în prezent, 3 sunt publicate în țară și 4 în străinătate. 6 lucrări sunt cotate ISI, una fiind indexată în alte BDI. De asemenea au fost susținute și o serie de lucrări în cadrul proiectului POSDRU "Creșterea atractivității și performanței programelor de formare doctorală și postdoctorală pentru cercetători în științe ingineresti – ATTRACTING" ID 159/1.5/S/137070.

Analizele teoretice și practice efectuate în cadrul tezei de doctorat, precum și rezultatele prezentate, deschid o serie de perspective și de direcții de continuare și aprofundare ulterioară a cercetărilor în domeniul reconfigurării optime a rețelelor electrice de distribuție:

- rafinarea metodelor de soluționare bazate pe utilizarea algoritmilor genetici, în scopul creșterii eficienței și ameliorării performanțelor acestora;
- implementarea unor alte clase de metode bazate pe tehnici de inteligență artificială;
- abordarea multicriterială a problemei de optimizare, prin completarea funcției obiectiv cu o serie de termeni, ponderați corespunzător, care să vizeze ameliorarea nivelului de tensiune, echilibrarea încărcării elementelor de rețea, creșterea siguranței în funcționare, minimizarea numărului de operații de comutare, includerea costului nealimentării unor consumatori, ameliorarea unor aspecte de mediu (emisii minime) etc.;
- soluționarea reconfigurării prin luarea în considerare a surselor de generare distribuită;
- abordarea probabilistă a unor elemente componente ale problemei discutate;

- extinderea analizei la alte rețele electrice de distribuție, gestionate de diverși operatori de distribuție din România.

Anexele electronice (CD) oferă o serie de elemente și rezultate de detaliu referitoare la partea aplicativă (cap. 7) privind bazele de date utilizate pentru studiile de caz complexe precum și la regimurile de funcționare analizate și la rezultatele obținute (în principal sistemul de distribuție RED Timiș, cu peste 1000 de noduri).

Bibliografie selectivă

1. [Abdelaziz2017] Abdelaziz M., Distribution network reconfiguration using a genetic algorithm with varying population size, *Electric Power Systems Research*, vol.142, 2017, pp.9–11
2. [Ameli2017] Ameli A., Ahmadifar A., Shariatkhah M.H., Vakilian M., A dynamic method for feeder reconfiguration and capacitor switching in smart distribution systems, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol.85, 2017, pp.200–211
3. [ANRE] Autoritatea națională de reglementare în domeniul energiei, Raport național 2017
4. [Carreno2008] Carreno E.M., Romero R., Padilha-Feltrin A., An efficient codification to solve distribution network reconfiguration for loss reduction problem, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.23, nr.4, 2008, pp.1542–1551
5. [Deng2016] Deng L., Fei J., Liu J., Cai C., Multi-object reconfiguration for smart distribution network, 35th Chinese Control Conference, Chengdu, China, 2016, pp.1056–1060
6. [Ding2015a] Ding F., Loparo K.A., Hierarchical decentralized network reconfiguration for smart distribution systems. Part I: Problem formulation and algorithm development, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.30, nr.2, 2015, pp.734–743
7. [Eldurssi2014] Eldurssi A.M., O'Connell R.M., Performance analysis of a new algorithm for power distribution system reconfiguration, 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Dallas, USA, 2014, pp.234–240
8. [Eldurssi2015] Eldurssi A.M., O'Connell R.M., A fast nondominated sorting guided genetic algorithm for multi-objective power distribution system reconfiguration problem, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.30, nr.2, 2015, pp.593–601
9. [Fajardo2008a] Fajardo O.F., Vargas A., Reconfiguration of MV distribution networks with multicost and multipoint alternative supply, Part I : Economic dispatch through radialization, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.23, nr.3, 2008, pp.1393–1400
10. [Fathabadi2016] Fathabadi H., Power distribution network reconfiguration for power loss minimization using novel dynamic fuzzy c-means (dFCM) clustering based ANN approach, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol.78, 2016, pp.96–107
11. [Gomes2005] Gomes F.V., Carneiro S., Pereira J.L.R., Vinagre M.P., Garcia P.A.N., A new heuristic reconfiguration algorithm for large distribution systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.20, nr.3, 2005, pp.1373–1378
12. [Gomes2006] Gomes F.V., Carneiro S., Pereira J.L.R., Vinagre M.P., Garcia P.A.N., A new distribution system reconfiguration approach using optimum power flow and sensitivity analysis, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.21, nr.4, 2006, pp.1616–1623
13. [Haghighat2016] Haghighat H., Zeng B., Distribution system reconfiguration under uncertain load and renewable generation, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.31, nr.4, 2016, pp.2666–2675
14. [Hong2005] Hong Y.Y., Ho S.Y., Determination of network configuration considering multiobjective in distribution systems using genetic algorithms, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.20, nr.2, 2005, pp.1062–1069
15. [Kilyeni2014b] Kilyeni S., Lustrea B., Extinderea rețelilor de transport și distribuție a energiei electrice utilizând tehnici de inteligență artificială, Editura Politehnica, Timișoara, 2014

16. [Kilyeni2015b] Kilyeni St., Tehnici numerice de analiză asistată de calculator a regimurilor de funcționare a sistemelor electroenergetice, Ed. a 3-a, Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 2015
17. [Kuihua2016] Kuihua W., Jian W., Jian W., Wei S., Liang F., Bo Y., Xiaolei Z., Bo L., The application study of loop-encoding scheme based RTS in distribution network reconfiguration, China International Conference on Electricity Distribution, Xi'an, China, 2016, pp.1–5
18. [Lopez2016] Lopez J.C., Lavorato M., Rider M.J., Optimal reconfiguration of electrical distribution systems considering reliability indices improvement, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol.78, 2016, pp.837–845
19. [Matpower] MatPower. A Matlab Power System Simulation Package, 2010, [http:// www.pserc.cornell.edu/matpower](http://www.pserc.cornell.edu/matpower)
20. [Mendes2013] Mendes A., Boland N., Guiney P., Riveros C., Switch and tap-changer reconfiguration of distribution networks using evolutionary algorithms, IEEE Transactions on Power Systems, vol.28, nr.1, 2013, pp.85–92
21. [Mendoza2006] Mendoza J., Lopez R., Morales D., Lopez E., Dessante P., Minimal loss reconfiguration using genetic algorithms with restricted population and addressed operators: Real application, IEEE Transactions on Power Systems, vol.21, nr.2, 2006, pp.948–954
22. [Mendoza2009] Mendoza J.E., Lopez M.E., Coello C.A.C., Lopez E.A., Microgenetic multiobjective reconfiguration algorithm considering power losses and reliability indices for medium voltage distribution network, IET Generation, Transmission & Distribution, vol.3, nr.9, 2009, pp.825–840
23. [Muthukumar2017] Muthukumar K., Jayalalitha S., Integrated approach of network reconfiguration with distributed generation and shunt capacitors placement for power loss minimization in radial networks, Applied Soft Computing, vol.52, 2017, pp.1262–1284
24. [Nafisi2015] Nafisi H., Farahani V., Abyaneh H.A., Abedi M., Optimal daily scheduling of reconfiguration based on minimisation of the cost of energy losses and switching operations in microgrids, IET Generation, Transmission & Distribution, vol.9, nr.6, 2015, pp.513–522
25. [Nie2012] Nie S., Fu X.P., Li P., Gao F., Ding C.D., Yu H., Wang C.S., Analysis of the impact of DG on distribution network reconfiguration using Open DSS, IEEE PES Asia Innovative Smart Grid Technologies, Tianjin, China, 2012, pp.1–5
26. [Oros2015a] Oros C., Barbulescu C., Pop O., Kilyeni S., Network usage with probabilistic distribution factors method, IEEE International Conference Power Tech 2015, Eindhoven, Netherlands, pp.1-6
27. [Powerworld] Powerworld, User's guide: <http://www.powerworld.com/>
28. [Prasanna2015] Prasanna K.M.L., Kumar R.J.R., Jain A., Somlal J., Optimal reconfiguration of radial distribution system having photovoltaic distributed generation with controlled voltage, International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies, Nagercoil, India, 2015, pp.1–6
29. [Raju2008] Raju V.G.K., Bijwe P.R., An efficient algorithm for minimum loss reconfiguration of distribution system based on sensitivity and heuristics, IEEE Transactions on Power Systems, vol.23, nr.2, 2008, pp.1280–1287
30. [Rothlauf2006] Rothlauf F., Representations for Genetic and Evolutionary Algorithms, 2nd ed., Editura Springer, 2006
31. [Rupa2014] Rupa J.A.M., Ganesh S., Power flow analysis for radial distribution system using backward/forward sweep method, International Journal of Electrical and Computer Engineering, vol.8, nr.10, 2014, pp.1628–1632
32. [Sastry2014] Sastry K., Goldberg D., Kendall G., Genetic algorithms, Chapter in Burke E.K., Kendall G. (eds.), Search methodologies. Introductory tutorials in optimization and decision support techniques, 2nd ed., Editura Springer, 2014, pp.93-117

33. [Solomonesc2013] Solomonesc C.F., Planificarea extinderii rețelelor de transport al energiei electrice utilizând tehnici de calcul evolutiv, Teză de doctorat, Universitatea Politehnica Timișoara, 2013
34. [Souza2016] Souza S.S.F., Romero R., Pereira J., Distribution system reconfiguration with variable demands using the Opt-aiNet algorithm, 13th International Conference on the European Energy Market, Poto, Portugal, 2016, pp.1–5
35. [Storti2014] Storti G.L., Paschero M., Rizzi A., Mascioli F.M., A radial configurations search algorithm for joint PFC and DFR optimization in smart grids, 23rd IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Istanbul, Turkey, 2014, pp. 944–949
36. [Subrahmanyam2010] Subrahmanyam J.B., Radhakrishna C., A simple method for feeder reconfiguration of balanced and unbalanced distribution systems for loss minimization, Electrical Power Components and Systems, vol.38, nr.1, 2010, pp.72–84
37. [Sulaima2014] Sulaima M.F., Mohamad M.F., Jali M.H., Bukhari W.M., Baharom M., Comparative study of heuristic algorithm ABC and GA considering VPI for network reconfiguration, 8th IEEE International Power Engineering and Optimization Conference, Langkawi, Malaysia, 2014, pp.182–187
38. [Toure2015] Toure S., Vanet E., Caire R., Besanger Y., Assessment methods for the targeted reconfiguration in distribution networks, IEEE Eindhoven PowerTech, Eindhoven, Netherlands, 2015, pp.1–6
39. [Tuladhar2016] Tuladhar S.R., Singh J.G., Ongsakul W., Multi-objective approach for distribution network reconfiguration with optimal DG power factor using NSPSO, IET Generation, Transmission & Distribution, vol.10, nr.12, 2016, pp.2842–2851
40. [Vieira2016] Vieira P.A., Murta-Pina J., Fernao Pires V., A multiobjective placement of switching devices in distribution networks incorporating distributed energy resources, Electric Power Systems Research, vol.130, 2016, pp.34–45
41. [Zhu2015] Zhu J., Optimization of power system operation, 2nd ed., Editura Wiley & IEEE Press, 2015
42. [Zidan2011] Zidan A., Farag H.E., El-Saadany E.F., Network reconfiguration in balanced and unbalanced distribution systems with high DG penetration, IEEE Power and Energy Society General Meeting, Detroit, USA, 2011, pp.1–8