



ALGORITM BEST-FIRST PENTRU RECONFIGURAREA REȚELELOR DE DISTRIBUȚIE A ENERGIEI ELECTRICE

Mircea Chindriș*, Bogdan Tomoiagă** și Ciprian Bud**

*Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, România, **C.N. Transelectrica S.A., România

Rezumat – Deși este un concept relativ vechi, ideea apărând în anul 1975 (Merlin și Back), reconfigurarea rețelelor electrice pentru reducerea pierderilor (de putere și/sau energie) rămâne o preocupare de mare actualitate.

Principial, atașând un graf unei rețele electrice de distribuție cu o singură sursă și formulând problema în termenii teoriei grafurilor, va trebui să se obțină un arbore de acoperire de pondere minimă. În mod analog, în cazul rețelelor cu mai multe surse, va trebui să se obțină o pădure minimă cu un număr de arbori egal cu cel al nodurilor sursă.

În lucrare, autorii propun un algoritm de reconfigurare a rețelelor electrice de distribuție pe criteriul minimizării pierderilor, bazat pe tehnica de căutare euristică „Best-First”.

Descriptori – reconfigurarea rețelelor electrice, inteligență artificială, căutare best-first

1. INTRODUCERE

Problema reconfigurării rețelelor este una foarte amplă și interdisciplinară, iar „rezolvarea” ei depinde de o serie de factori, cum ar fi: scopul reconfigurării, modul în care sunt furnizate datele de intrare necesare calculelor, timpii alocați (necesari, doriți) efectuării calculelor etc.

Deși este un concept relativ vechi, ideea apărând în anul 1975 (Merlin și Back), reconfigurarea rețelelor electrice pentru reducerea pierderilor (de putere și/sau energie) rămâne o preocupare de mare actualitate. Principial, atașând un graf unei rețele electrice de distribuție cu o singură sursă și formulând problema în termenii teoriei grafurilor, va trebui să se obțină un arbore de acoperire de pondere minimă. În mod analog, în cazul rețelelor cu mai multe surse, va trebui să se obțină o pădure minimă cu un număr de arbori egal cu cel al nodurilor sursă.

Scopul acestei lucrări este de a pune bazele unor moduri de abstractizare și modelare a datelor pentru studiul reconfigurării rețelelor electrice bazate pe tehnica de căutare euristica *best-first* luând în considerare diverse criterii și restricții.

2. PROBLEMATICA RECONFIGURĂRII REȚELELOR DE DISTRIBUȚIE A ENERGIEI ELECTRICE

În acest capitol se vor prezenta noțiunile generale privitoare la reconfigurarea rețelelor electrice, indiferent de scopul urmărit: mărirea siguranței rețelei [1], reducerea pierderilor de putere/energie, creșterea calității tensiunii, etc.

Reconfigurarea rețelelor electrice pentru reducerea pierderilor (de putere și/sau energie) [2], rămâne o preocupare de mare actualitate și poate constitui și în perspectivă criteriul de bază al reconfigurării. În

combinație cu îmbunătățirea parametrilor de calitate ai energiei electrice (într-o mare măsură noncalitatea duce la mărirea pierderilor – pierderi suplimentare prin efect Joule-Lenz datorate regimului nesinusoidal de funcționare), problema poate primi o dimensiune mai amplă, căreia trebuie să i se acorde o atenție deosebită.

În continuare, se prezintă câteva metode de modelare a rețelelor electrice folosind teoria grafurilor și o serie de funcții obiectiv și restricții care pot fi avute în vedere în procesul de reconfigurare optimă.

2.1 Modelarea rețelelor electrice cu ajutorul grafurilor

Această reprezentare (atașarea unui graf rețelei electrice) poate fi utilă din următoarele considerente:

- teoria grafurilor prezintă un aparat matematic deosebit de consistent astfel încât, printr-o reprezentare „adecvată” a unei rețele electrice pe un graf și formularea „corespunzătoare” a problemei în termenii acestei teorii, se pot obține rezultate directe;
- grafurile atașate unei rețele electrice poate fi folosit ca suport pentru aplicarea altor metode, cum ar fi cele euristice de căutare: *branch and bound* [1], *hill climbing*, *căutare best-first*, *satisfacerea limitărilor* [3] etc.;
- datele atașate elementelor grafurilor pot fi și de natură nedeterministă: *stohastice* sau *vagi* (numere fuzzy);

Trebuie precizat faptul că aproape toate lucrările de specialitate fac referire, sub o formă sau alta, la reprezentarea rețelei electrice printr-un graf (prezența unei variabile de decizie a_{ij} sau b_{iu} în funcția obiectiv corespunde, de fapt, reprezentării matriceale a grafurilor).

O rețea electrică de distribuție (RED) poate fi modelată prin graful conex și neorientat asociat ei, după cum urmează [4]:

- Vârfulurile pot reprezenta barele de MT ale stațiilor de transformare ÎT/MT, barele punctelor de alimentare (PA) și ale posturilor de transformare (PT) MT/JT, precum și cutiile de derivație la consumatori;
- Muchiile pot reprezenta linii electrice de MT sau JT, precum și trafo MT/JT.

În funcție de rețeaua considerată, PT și PA pot fi surse de alimentare (când rețeaua este de JT) sau consumatori (într-o rețea de MT). Într-o rețea combinată de MT și JT, PA vor fi tratate drept vârfuri intermediare, iar PT vor fi tratate drept muchii.

Elementelor grafului astfel obținut, li se pot atașa diverse valori în funcție de problemă și de modul de rezolvare, cum ar fi:

- *Valori atașate vârfurilor:*
 - tensiuni (nominale, limite admisibile etc.);
 - puteri (active, reactive).
- *Valori atașate muchiilor (arcelor):*
 - variabile de stare: curenți, rezistențe, reactanțe, puteri;
 - variabile de decizie (0 sau 1; conectat/deconectat).

Menționăm că modelarea prezentată mai sus nu este unică și că studiul modalităților de reprezentare a unei rețele electrice printr-un graf constituie obiectul unor ample cercetări (în teoria grafurilor, muchiile reprezintă relații între vârfuri, se poate construi un graf al muchiilor etc.). Mai trebuie subliniat și faptul că reprezentarea grafurilor se poate face în mai multe moduri: *geometric*, prin *mulțimi*, *matrici de adiacență* (vârfuri-vârfuri) sau de *incidență* (vârfuri-arce), *tablouri unidimensionale* sau *matrici rare* etc.

2.2 Funcții obiectiv

Modelul matematic al oricărei probleme optimizabile este format din două părți [4]:

- **funcția obiectiv (FO)** – o funcție de variabilele problemei, care urmează să ia o valoare extremă (minimă sau maximă);
- **sistemul restricțiilor (SR)** – exprimă condițiile tehnice și economice în care se rezolvă problema optimizabilă.

Prin soluție (soluție admisibilă) a problemei optimizabile se înțelege un sistem de valori ale variabilelor care verifică sistemul restricțiilor. Prin soluție optimă se înțelege soluția care face extremă funcția obiectiv.

În funcție de scopul urmărit, de regimul de funcționare și de considerațiile simplificatoare, putem exprima FO în diverse moduri, cum ar fi cele prezentate mai jos:

Regim simetric – sinusoidal

Pierderi de putere prin efect Joule-Lenz [4]

$$[MIN]_P = \sum_{(i,j) \in U} 3 \cdot R_{(i,j)} \cdot I_{(i,j)}^2 \cdot \alpha_{(i,j)} \quad (1)$$

unde:

- P – valoarea pierderilor de putere activă în rețea;
- (i, j) – extremitățile unei linii electrice;
- U – mulțimea liniilor rețelei (mulțimea muchiilor grafului atașat);
- $I_{(i,j)}$ – intensitatea curentului electric pe linia (i, j) , corespunzător vârfului de sarcină;
- $R_{(i,j)}$ – rezistența electrică a liniei (i, j) ;
- $\alpha_{(i,j)}$ – variabilă binară, având valoarea 1 sau 0, după cum linia (i, j) este în funcțiune sau nu.

Pierderi de energie prin efect Joule-Lenz [5]

$$[MIN]_W = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in U} 3 \cdot R_{(i,j)} \cdot I_{k,(i,j)}^2 \cdot t_k \cdot \alpha_{(i,j)} \quad (2)$$

unde:

- W – valoarea pierderilor de energie activă în rețea;
- K – mulțimea palierelor (pentru fiecare punct de consum, se consideră cunoscută curba de sarcină reprezentată printr-un număr de paliere);

k – unul dintre paliere, $k \in K$;

t_k – durata palierului k .

Factor de pondere (măsoară eficiența schemei de funcționare) [2]

$$[MAX]_m = \sum_{(i,j) \in U} \frac{P_{(i,j)}}{R_{(i,j)} \cdot I_{(i,j)}^2} \quad (3)$$

unde:

m – eficiența liniei (i, j) ;

$P_{(i,j)}$ – puterea care tranzitează linia (i, j) ;

$I_{(i,j)}$ – intensitatea curentului electric pe linia (i, j) , corespunzător vârfului de sarcină;

$R_{(i,j)}$ – rezistența electrică a liniei (i, j) ;

Regim simetric – nesinusoidal

Pierderi de putere prin efect Joule-Lenz [7]

$$[MIN]_P = \sum_{(i,j) \in U} 3 \cdot k_{e(i,j)} \cdot R_{c.a.(i,j)} \cdot (1 + \alpha_0 \cdot T) \cdot I_{(i,j)}^2 \cdot \alpha_{(i,j)} \quad (4)$$

unde:

$$k_{e(i,j)} = \frac{R_{c.c.(i,j)}}{R_{c.a.(i,j)}} = 1 + k_{\text{peticular}} + k_{\text{proximitate}};$$

$$I_{(i,j)}^2 = I_{l,(i,j)}^2 (1 + THD^2);$$

α_0 – coeficientul de temperatură al rezistenței;

În mod analog se poate formula **FO** și pentru regimurile de funcționare:

- nesimetric – sinusoidal;
- nesimetric – nesinusoidal;

2.3 Sistemul restricțiilor

Restricțiile pot fi grupate în două categorii:

Restricții de exploatare

- **R1:** necesitatea structurii arborescente a schemei de funcționare [4], datorată mai multor considerente, dintre care amintim coordonarea protecțiilor [1]

$$\sum_{(i,j) \in U} \alpha_{(i,j)} = n - 1 \quad (5)$$

unde n este numărul de noduri ale rețelei electrice (ordinal grafului asociat);

- **R2:** asigurarea alimentării tuturor consumatorilor; dacă rețeaua considerată este cu o singură sursă, graful asociat trebuie să fie conex, iar dacă avem rețea cu mai multe surse, fiecare componentă conexasă rezultată în urma reconfigurării trebuie să conțină cel puțin un nod sursă;
- **R3:** trebuie avute în vedere indisponibilitățile din rețea [4]; să poată fi impusă și/sau interzisă funcționarea anumitor linii;
- **R4:** număr limitat de manevre [5]; reconfigurarea să se realizeze printr-un număr impus de manevre;
- **R5:** menținerea nivelului de siguranță în alimentarea consumatorilor peste o anumită limită impusă [7].

Restricții tehnologice

- **R6:** încadrarea curentului în limitele admisibile [4]

$$I_{(i,j)} \leq I_{\max,(i,j)}; \forall i, j \in U \quad (6)$$

- **R7:** încadrarea curentului în limitele admisibile cu unele toleranțe [5]

$$I_{k,(i,j)} \leq [1 + (c_m - 1) \cdot \beta_{k,(i,j)}] I_{\max,(i,j)}; \forall i, j \in U \quad (7)$$

unde:

- c_m – coeficient de majorare;
 $\beta_{k,(i,j)}$ - variabilă binară:
 1 – linia este supraîncărcată ($I_k > I_{max}$);
 0 – linia nu este supraîncărcată.

- **R8**: încadrarea tensiunii în limitele admisibile [4]

$$\Delta U_j \leq \Delta U_{admisibil}; \forall j \in X \quad \text{sau}$$

$$U_j^{min} \leq U_j \leq U_j^{max}; \forall j \in X \quad (8)$$

- **R9**: neadmiterea debitării de putere reactivă spre sursa de alimentare în nici un regim de funcționare

$$Q_j^{min} \geq Q_{k,j}; \forall j \in X \quad (9)$$

unde:

- Q_j^{min} – puterea minimă tranzitată prin nod;
 $Q_{k,j}$ – puterea sursei de compensare.

- **R10**: prezența sau absența automaticii necesare, în nodurile unde ar trebui să se facă debucarea [7];

Abordarea prezentată mai sus nu epuizează metodele de formulare a problemei reconfigurării rețelelor electrice. Astfel, teoretic, aproape orice restricție poate fi tratată drept **FO**, iar **FO** pot fi tratate drept restricții. Spre exemplificare, **FO** poate fi *număr minim de manevre* (în cazul unei avarii este necesar să se reconfigureze **RED** efectuând cel mai mic număr posibil de manevre), iar minimizarea pierderilor poate fi tratată drept restricție (pierderi mai mici sau egale decât o valoare considerată acceptabilă).

În procesul de modelare a problemei, poate fi tratat drept restricție și timpul necesar rulării (execuției) algoritmului de calcul:

- ne interesează o soluție obținută „în timp real“;
- execuția algoritmului poate dura zeci de minute sau ore (în cazul reconfigurării când se stabilesc schemele de funcționare normale de vară/iarnă)

3. METODE DE ABORDARE

Problema reconfigurării rețelelor este una foarte amplă și interdisciplinară, iar „rezolvarea“ ei depinde de o serie de factori, cum ar fi: scopul reconfigurării, modul în care sunt furnizate datele de intrare necesare calculului, timpii alocați (necesari, doriți) efectuării calculului etc.

3.1 Subprobleme ale reconfigurării

Pentru rezolvarea unei probleme concrete de reconfigurare trebuie să se țină cont, pe lângă stabilirea **FO** și a **SR**, de o serie de factori suplimentari. În cele ce urmează se va încerca descompunerea problemei reconfigurării în subproblemele sale esențiale (abordare *top-down*) și depistarea de soluții și perspective pentru fiecare subproblemă în parte – figura 1.

Prezentăm schematic, mai jos, o posibilă descompunere a problemei.

Intrări:

- **proveniența**: datele de intrare necesare calculului de reconfigurare pot avea mai multe proveniențe, cum ar fi:
 - *baze de date* – acestea se utilizează în special când se prelucrează volume mari de informații;
 - *sisteme SCADA* [2] (*supervisory control and data acquisition systems*), în special, atunci când

rezultatele calculului s-ar putea concretiza prin comenzi asupra aparatelor de comutație (conectare/deconectare linii, baterii de condensatoare etc.);

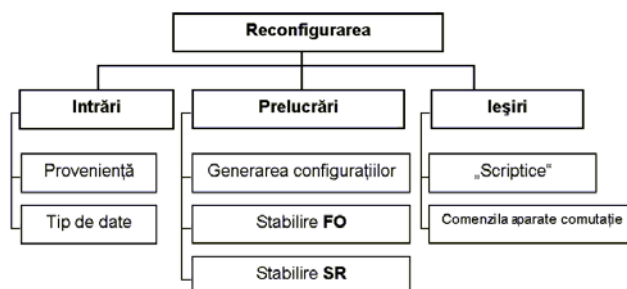


Fig.1 – Subprobleme ale reconfigurării

□ **tipurile de date**: ar putea fi:

- numere atașate elementelor grafului (asociat rețelei electrice): întregi, reale (când datele de intrare se consideră „corecte“);
- TAD (tipuri abstracte de date):
 - funcții de estimare (estimatori) statistico-probabilistice (cum ar fi cele pentru estimarea consumurilor);
 - numere fuzzy (pentru date vagi), etc;

Prelucrări:

□ **generarea configurațiilor** – principial, pentru obținerea de noi configurații, se pot adopta două categorii de strategii:

- *sistematice* – când se studiază toate configurațiile posibile;
- *euristice* („informate“) – se iau în considerare doar o parte a configurațiilor posibile (pentru reducerea timpului/volumului de calcul). Acestea pot fi categorisite în:
 - *metode (algoritmi) constructive*:
 - se pleacă de la nodul sursă, fără nici o latură în funcțiune;
 - se adaugă succesiv muchii și noduri (folosind diverse reguli), obținându-se rețeaua arborescentă dorită.
 - *metode (algoritmi) distructive*:
 - se pleacă de la starea în care toate laturile sunt în funcțiune;
 - se deschid succesiv laturi până când se obține configurația arborescentă optimă.
 - *strategia „permutării laturilor“ (branch exchange)*:
 - numărul de laturi în funcțiune este totdeauna constant corespunzător rețelei arborescente;
 - configurația optimă se obține *iterativ* prin închiderea unei laturi și deschiderea alteia în mod sistematic sau anumite euristici.

□ **stabilirea FO**: exprimă scopul (criteriul) pentru care se efectuează reconfigurarea și poate fi exprimată sub formele prezentate în capitolul anterior cu eventuale modificări sau sub alte forme. Trebuie făcută

următoarea remarcă: **FO** trebuie să aibă un *caracter global* (în special dacă pentru rezolvare se folosesc metode euristice) – trebuie să se poată evalua cât de aproape suntem de soluția optimă (dacă suntem „pe drumul bun“) în sensul că în procesul de căutare a soluției optime, la fiecare pas, trebuie să se poată evalua întreaga stare a sistemului; configurațiile bune rămân și se poate continua căutarea.

- ❑ **impunerea SR:** pot fi o parte sau toate *restricțiile* prezentate în capitolul anterior, dar se pot lua în considerare și altele.

Ieșiri

- ❑ „*scriptice*“ (rezultate) pe baza cărora să se efectueze reconfigurarea (la stabilirea schemelor normale de vară/iarnă);
- ❑ *comenzi la aparatele de comutație:* conectare/deconectare linii, baterii de condensatoare (ex. la apariția unei avarii – calcul schemă optimă - reconfigurare conform calculelor), dacă există automatică de sistem necesară.

3.2 Cazul rețelelor electrice de distribuție cu o singură sursă

Principial, atașând un graf unei rețele electrice de distribuție cu o singură sursă (conform modelului dat în capitolul 2) și formulând problema în termenii teoriei grafurilor, va trebui să se obțină un *arbore* de acoperire de *pondere minimă* (APM). În aceiași termeni, se formulează problema și în cazul liniei electrice alimentată de la două capete (chiar dacă este vorba de două surse diferite).

Indiferent de **FO** și **SR**, pentru a obține un rezultat optim, avem la dispoziție metoda (tehnica de programare) *backtracking* (căutare cu revenire). Aplicând această metodă, se explorează toți *arborii de acoperire* ai grafului atașat RED urmând ca pentru fiecare *arbore de acoperire* în parte să se verifice **SR** și să se calculeze **FO**, alegându-se configurația optimă.

Deși garantează obținerea optimului, datorită faptului că explorează întregul spațiu al soluțiilor, metoda se dovedește a fi neperformantă în special atunci când se doresc rezultate în timp scurt, datorită timpului exponențial necesar efectuării calculelor și spațiului mare pentru stocarea datelor.

Pentru evitarea aplicării acestei metode la determinarea APM, teoria grafurilor furnizează câțiva algoritmi (*Kruskal, Prim, Sollin*) care, deși lucrează după strategia *Greedy* (a optimului local), furnizează în final un optim global [8]. Acești algoritmi au, însă, un mare dezavantaj: „lucrează“ cu valori statice atașate muchiilor (valorile atașate muchiilor grafului analizat nu-și pot modifica valoarea în timpul procesului de căutare a soluției optime); în realitate, în cazul reconfigurării apar situații (cum ar fi curenții prin laturi) în care valorile atașate muchiilor se modifică în funcție de configurația rețelei existente la un moment dat. Totuși, algoritmi sunt utilizați pentru obținerea unor *soluții inițiale* [4] (obținerea APM pe criteriul rezistenței electrice minime a rețelei) care sunt îmbunătățite (optimizate) folosind alte metode (aplicând „permutări de latură“ după anumite reguli).

3.2 Cazul rețelelor electrice de distribuție cu mai multe surse

În acest caz, devine necesară obținerea unei *păduri de pondere minimă*, ai cărei arbori sunt de „pondere minimă“, cu observația că fiecare arbore (componentă conexă a pădurii) trebuie să aibă în componentă („cel puțin“) un *nod sursă*.

Abordările din domeniu nu conțin metode sistematice pentru determinarea zonelor unde se secționează rețeaua, în sensul de a hotărî ce consumatori se alocă unei surse. Se menționează că secționarea pe zone de rețea se face acolo unde *tranzitul prin laturi este mai mic* [2, 7] sau acolo unde este punctul de separație între două sucursale/filiale de rețele electrice vecine [7].

4. ALGORITM BEST-FIRST PENTRU RECONFIGURAREA REȚELELOR DE DISTRIBUȚIE A ENERGIEI ELECTRICE

Principial, tehnica de căutare euristică *best-first* este recomandată pentru două atribute esențiale [3]:

- nu explorează întregul spațiu al soluțiilor;
- nu poate fi prinsă pe drumuri moarte (blocate).

La fiecare pas al procesului de căutare se selectează nodul cel mai promițător, dintre cele generate, prin aplicarea funcției obiectiv pe toate aceste noduri. Apoi, se utilizează regulile aplicabile pentru expandarea nodului ales și generarea succesorilor săi. Toate aceste noduri sunt adăugate la mulțimea de noduri generate (candidate). Din nou, nodul cel mai promițător este selectat și procesul continuă.

Tăria metodei este dată în primul rând de modul în care este definită funcția obiectiv ce oferă informații privind „meritele“ fiecărui nod care este generat. În acest sens, în algoritmul propus în continuare, funcția obiectiv va include starea întregului traseu între nodul candidat evaluat și nodul sursă; la fiecare pas se adaugă nodul cu traseul corespunzător astfel încât starea globală a rețelei la acel moment să fie cea mai bună.

În cazul RED cu o singură sursă, algoritmul propus (*RECO*) constă în următorii pași:

- Se alege (selectează) nodul sursă (inițial arborele este compus doar din nodul sursă);*
- Se determină toate nodurile adiacente la nodurile selectate (care fac parte deja din arbore) – nodurile candidate;*
- Pentru fiecare nod candidat se determină toate traseele (drumurile) până la nodul sursă (care conțin noduri și laturi deja incluse în arbore);*
- Pentru fiecare traseu în parte se verifică îndeplinirea restricțiilor (curenți maximi admisibili în laturi, tensiuni la noduri între limitele admise, etc.);*
- Dacă restricțiile sunt îndeplinite de către cel puțin un nod candidat, se trece la punctul f, altfel se revine la punctul b din care se elimină, din mulțimea nodurilor candidate, ultimul nod ales;*
- Pentru fiecare traseu în parte (care îndeplinește restricțiile) se calculează pierderile de putere/energie (se evaluează funcția obiectiv);*

- g. Se alege nodul candidat și traseul optim (cu pierderi minime) și se introduce în arbore;
 h. Dacă mai sunt noduri neincluse în arbore se trece la punctul b, altfel sfârșit algoritmul.

Pentru facilitarea urmăririi algoritmului, se prezintă grafic modul de operare - figura 2.

În cazul RED cu mai multe surse, se vor alocă alternativ noduri consumatoare nodurilor sursă, generarea unui arbore oprindu-se în momentul în care sarcina cerută de consumatori alocăți, împreună cu oricare alt consumator

și nu poate duce la blocaje (va genera întotdeauna o soluție bună). Rezultatul final este unul obținut în urma unui șir de decizii optime; la fiecare pas se alege nodul și latura pentru care, pe întregul traseu (nod ales – nod sursă) funcția obiectiv este extremă.

Rămâne, însă, un semn de întrebare: *problema reconfigurării satisface principiul optimalității* (dintr-o secvență de decizii/alegeri optime se obține întotdeauna un optim global)? Pentru exemplele studiate cu acest

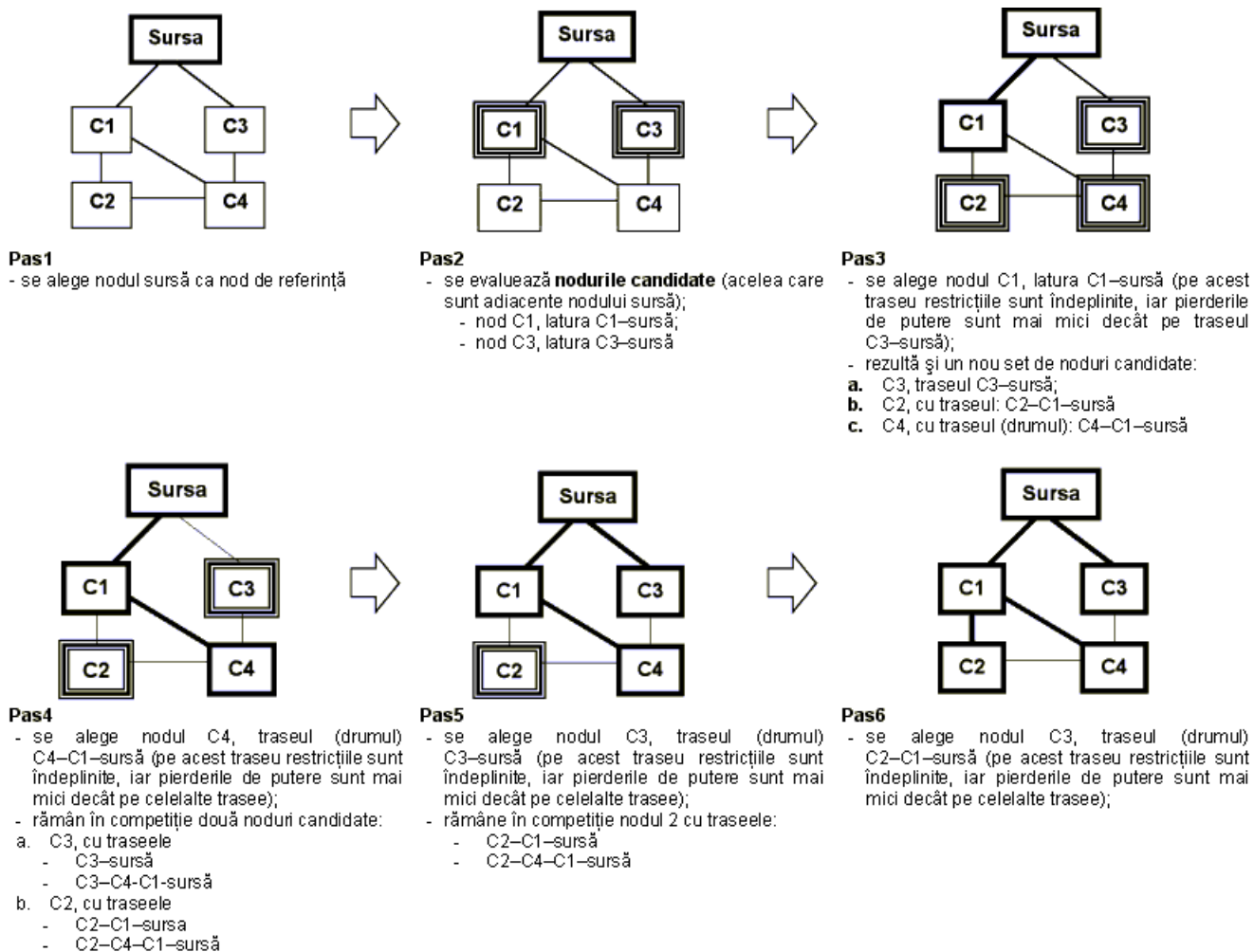


Fig.2 – Explicativă la algoritmul RECO

candidat, depășește puterea disponibilă la sursă. Procedura de alocare a consumatorilor la o sursă este cea corespunzătoare rețelelor cu o singură sursă.

5. CONCLUZII

Problema reconfigurării rețelelor electrice este una amplă și interdisciplinară. Multiplele sale subprobleme sunt mereu perfectibile și necesită o continuă cercetare.

Subproblema modului de generare a configurațiilor are o rezolvare absolută: generarea tuturor arborilor de acoperire posibili. Aceasta, însă, în cele mai multe cazuri, nu este practică datorită timpului mare de execuție a algoritmului. De aici rezultă necesitatea apelării la metode euristice.

Algoritmul propus asigură un timp de execuție neprohibitiv (nu explorează întregul spațiu al soluțiilor)

algoritm, comparativ cu metoda absolută, s-au obținut rezultate identice.

BIBLIOGRAFIE

- [1] D. Shirmohammadi, H.W. Hong, *Reconfiguration of Electric Distribution Networks for Resistive Line Losses Reduction*, in: IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, April 1989, pp 1492-1498
- [2] R.J. Sárfi, M.M.A. Salama, A.Y. Chinchani, *Distribution System Reconfiguration: An Algorithm Based on Network Partitioning Theory*, in: IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 11, No. 1, February 1996, pp 504-510
- [3] H.F. Pop, G. Șerban, *Inteligența artificială*, Lito. Univ. „Babeș-Bolyai”, Cluj-Napoca, 2001
- [4] V. Dumbravă, T. Miclescu, G. Bazacliu, *Determinarea schemei de funcționare pentru rețelele electrice urbane de distribuție*, în: Energetica, nr. 4, seria B, București, iulie - august 1995, pag. 194-201

- [5] V. Dumbravă, T. Miculescu, G. Bazacliu, *Tehnici noi de reconfigurare a schemelor de exploatare pentru rețele urbane de distribuție*, în: Energetica, nr. 8-9, București, august-septembrie 1999, pag. 357-363
- [6] O. Gul, A. Kaypmaz, *Distribution Feeder Reconfiguration and Compensation for Loss Reduction Under Nonsinusoidal Conditions*, in: 9th Mediterranean Electrotechnical Conference, May 18 – 20, 1998, Tel-Aviv, Israel, p.p. 1008-1012
- [7] H. Albert, D. Preoțescu, *Evaluarea siguranței în funcționare corelată cu optimizarea schemelor de funcționare pe criteriul minimului de pierderi în rețele*, în: Al XVI-lea Simpozion Național „Siguranța în Funcționare a Sistemului Energetic“, Bacău, 22-23 septembrie, 1999, pag. 19-21
- [8] T. Toadere, *Grafe - teorie, algoritmi și aplicații*, Editura Albastră, Cluj-Napoca, 2002;