

## LUCRAREA 13

# OPTIMIZAREA FIABILITĂȚII SISTEMELOR DE DISTRIBUȚIE FOLOSIND PROGRAMAREA NELINIARĂ CU RESTRICȚII

### 13.1. Aspecte generale

Siguranța în alimentarea cu energie electrică trebuie să răspundă cerințelor corespunzătoare categoriilor consumatorilor alimentați și să asigure continuitatea în alimentare conform condițiilor contractuale stabilite.

Obiectivul clasic al planificării dezvoltării sistemelor electrice de distribuție este planificarea investiției, pentru a asigura o alimentare economică și fiabilă.

Fiabilitatea face parte din siguranța în funcționare a unui sistem, care constă în aptitudinea de a îndeplini o anumită sarcină. Conceptul de siguranță în funcționare grupează 4 noțiuni distincte: fiabilitatea, disponibilitatea, mentenabilitatea și securitatea:

**Fiabilitatea** – se măsoară prin probabilitatea ca o entitate să-și îndeplinească misiunea pe durata unui interval de timp dat.

**Disponibilitatea** – se măsoară prin probabilitatea ca o entitate să-și îndeplinească misiunea la un moment dat. Pentru un sistem nereparabil, cele două noțiuni sunt identice.

**Mentenabilitatea** – este măsurată prin probabilitatea, pe un interval de timp dat, de a pune în stare de funcționare o entitate care este defectă.

**Securitatea** – se măsoară prin probabilitatea ca o entitate să evite apariția, în anumite condiții date, a evenimentelor critice sau catastrofale.

Fiabilitatea alimentării consumatorilor constituie unul dintre cei mai importanți indicatori de calitate. Fiabilitatea rețelelor electrice de distribuție este determinată de fiabilitatea componentelor, arhitecturii acestora, de sarcina electrică. În situații "ideale"

rețeaua electrică trebuie să aibă o fiabilitate "suportabilă" de consumatori. Studiile de fiabilitate necesită informații despre istoricul comportării componentelor, despre consecințele economice ale defectării acestora etc.

Criteriile de fiabilitate utilizate în energetică pot fi clasificate după mai multe considerente în: criterii deterministe/probabilistice, tehnice/economice etc. Alegerea criteriului depinde în mare măsură de cei care întocmesc studiul de proiectare/ dezvoltare, de cunoștințele și experiența lor. Criteriile de proiectare/dezvoltare a rețelelor electrice sunt, în general, deterministe, iar criteriul  $(n - 1)$  este aproape universal, completat uneori cu criterii specifice mai severe.

La nivel de client, fiabilitatea este percepută prin numărul de întreruperi (lungi și scurte) pe an, durata anuală a întreruperilor, costul aferent al acestora etc.

Dintre toate metodele de calcul ale fiabilității sistemelor electroenergetice, prezentate în literatura de specialitate, se apreciază că modelul matematic cel mai adecvat pentru descrierea comportării în timp a unei rețele electrice de distribuție îl constituie procesele stohastice de tip Markov.

Indicatorii de fiabilitate, corespunzători metodei lanțurilor Markov, care se calculează cu ajutorul datelor statistice, obținute din înregistrările timpilor de funcționare și de defect în perioada de observație, sunt următorii:

- **Intensitatea de defectare,**

$$\lambda = \frac{1}{M[T_f]} [h^{-1}] \quad (13.1)$$

unde:  $M[T_f]$  – timpul mediu de funcționare neîntreruptă;

- **Intensitatea de reparare,**

$$\mu = \frac{1}{M[T_d]} [h^{-1}] \quad (13.2)$$

unde:  $M[T_d]$  – timpul mediu de defect neîntrerupt;

- **Probabilitatea de funcționare,**

$$p = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (13.3)$$

- **Probabilitatea de defectare,**

$$q = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (13.4)$$

- **Durata medie totală, probabilă a stării de succes,**

$$M[\alpha(T)] = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \cdot T \quad [h] \quad (13.5)$$

unde:  $T$  – timpul corespunzător pentru care se calculează indicatorii de fiabilitate;

- **Durata medie totală, probabilă a stării de refuz,**

$$M[\beta(T)] = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot T \quad [h] \quad (13.6)$$

- **Durata medie de întrerupere a sistemului,**

$$DMIS = \frac{\sum M[\beta(T)]_i \cdot N_i}{\sum N_i} \quad [h] \quad (13.7)$$

unde:  $N_i$  – numărul consumatorilor în punctul de sarcină  $i$ .

### 13.2. Optimizarea fiabilității sistemelor de distribuție

Marea majoritate a problemelor de optimizare a fiabilității sunt neliniare. De aceea, optimizarea fiabilității sistemelor electrice a necesitat elaborarea unor metode eficiente de programare neliniară pentru rezolvarea acestei probleme.

În cadrul studiului fiabilității sistemelor electrice de distribuție intervin două categorii principale de probleme de optimizare:

1. *Maximizarea fiabilității.* Pentru o anumită structură fiabilistică a unui sistem de distribuție, acest gen de probleme determină:

$$\max\{P_s = F(p)\} \quad (13.8)$$

în prezența restricțiilor:

$$g_i(p) \leq b_i, \quad i = \overline{1, m} \quad (13.9)$$

unde:

$P_s$  – reprezintă fiabilitatea sistemului (de exemplu, probabilitatea de succes a sistemului);

$p = [p_1, p_2, \dots, p_3]$  – vectorul nivelului de fiabilitate pentru fiecare echipament sau subsistem component.

2. *Minimizarea costului sistemului.*

$$\min\{C_S = \sum_{j=1}^n f_j(p_j)\} \quad (13.10)$$

în prezența restricției:

$$P_S \geq P_S^{\min} \quad (13.11)$$

unde:

$C_S$  – reprezintă costul total al sistemului;

$f_j(p_j)$  – costul subsistemului "j" în funcție de nivelul fiabilității  $p_j$ ;

$P_S^{\min}$  – pragul minim admis al fiabilității sistemului. Valoarea acestuia este impusă de criterii economice, de volum etc.

Optimizarea fiabilității sistemelor de distribuție, în baza celor două criterii, se va face fie prin determinarea numărului de echipamente necesare fiecărui tip de rezervare, fie prin utilizarea unor echipamente mai fiabile.

### 13.3. Modelul optimizării fiabilității sistemelor radiale

Sistemele de distribuție radiale reprezintă o combinație de subsisteme radiale (SS1, SS2, ...), alcătuite, la rândul lor, din mai multe componente (bare colectoare (B), celule de linie (CL), linii electrice (LE), transformatoare (TR), celule de transformator (CTr)), Fig. 13.1. Chiar dacă fiecare element component este la rândul său un ansamblu de alte elemente, în calculele de fiabilitate va fi tratat ca un element independent, caracterizat prin parametri de fiabilitate specifici.

Modelele structurale ale acestor subsisteme (SS1, SS2, ...) sunt, din punct de vedere de vedere al optimizării fiabilității lor, de tipul serie – paralel cu rezervare activă la nivel de element, Fig. 13.2.

Numărul de rezerve  $X_i$  al fiecărui element serie de tip "i", cu  $i = 1, 2, \dots, N$ , formează de fapt variabila de optimizat a modelului.

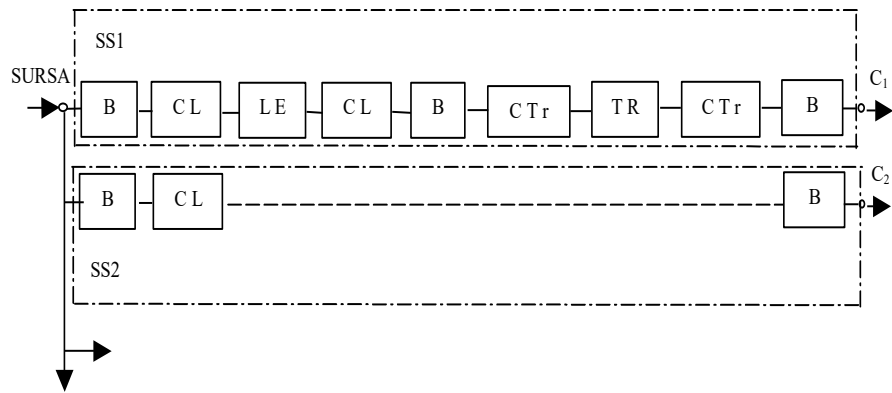


Fig. 13.1. Structura unui sistem de distribuție radial

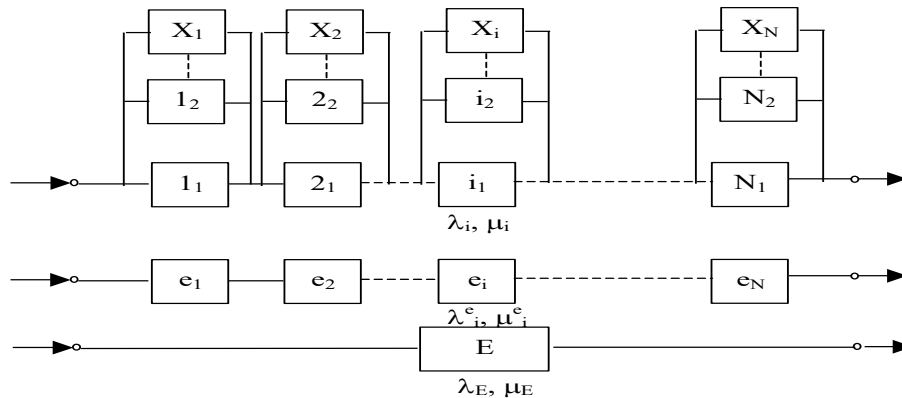


Fig. 13.2. Structura unui subsistem de distribuție radial

Pentru optimizarea fiabilității structurilor componente ale sistemelor electrice de distribuție se utilizează de regulă criteriul minimizării cheltuielilor anuale de calcul. Această minimizare se realizează în condițiile unui prag minim al fiabilității sistemului, impus de considerente economice (valoarea daunelor la consumator datorită nealimentării cu energie electrică).

Ca variabile de optimizare, în cadrul modelului matematic, sunt considerate numărul  $X_i$  de elemente de rezervă (inclusiv componenta activă) pentru fiecare componentă serie de tip "i". Aceste variabile formează componentele vectorului variabilelor de optimizare.

### 13.3.1. Funcția obiectiv

Funcția obiectiv este reprezentată de expresia cheltuielilor anuale de calcul exprimate în funcție de variabilele de optimizat și de vectorul fiabilității sistemului:

$$P_s = [p_1, p_2, \dots, p_N]_t \quad (13.12)$$

adică:

$$\min CA(X, P_s) \quad (13.13)$$

Cheltuielile anuale au în structura lor următoarele componente:

$$CA = \frac{1}{T_n} I + C_E + D_\Sigma \quad (13.14)$$

unde:

$I$  – valoarea totală a investiției determinată de componentele de bază ale schemei de alimentare, luând în considerare și rezervele alocate fiecărui tip de componentă;

$C_E$  – cheltuielile anuale de exploatare a elementelor schemei (inclusiv rezervele);

$D_\Sigma$  – daune totale datorate nonfiabilității sistemului în studiu.

#### *Investițiile totale*

Această componentă a funcției obiectiv se calculează cu ajutorul următoarei relații:

$$I = \sum_{i=1}^N X_i I_i \quad (13.15)$$

unde  $I_i$  – investiția într-un element de tip "i", [lei/bucată].

#### *Cheltuielile anuale de exploatare*

Se pot calcula cu ajutorul expresiei:

$$C_E = C_{i,r} + C_p \quad (13.16)$$

unde:

$C_{i,r}$  – cheltuielile anuale cu personalul, întreținerea și reparațiile elementelor schemei (inclusiv rezervele), reprezentând un procent de  $(1,2 \div 6)\%$  din investiții.

$$C_{i,r} = \sum_{i=1}^N p_{i,r} I_i \quad [\text{lei/an}] \quad (13.17)$$

unde:

$p_{i,r}$  – cota anuală din valoarea investiției pentru exploatare, întreținere și reparații;  
 $C_p$  – cheltuieli anuale datorate pierderilor de putere în elementele sistemului (linii și transformatoare) în studiu (incluzând rezervele),

$$C_p = c_p [\Delta P_L + \Delta P_{Tr}] \quad (13.18)$$

unde:

$c_p$  – costul instalării unei puteri de 1 kW într-o centrală electrică de vârf, pentru compensarea pierderilor de putere pe elementele sistemului, în [\$/an];

$\Delta P_L$  – pierderile de putere în linie (sau liniile sistemului radial în studiu, cu toate cele  $X_j$  rezerve în paralel):

$$\Delta P_L = \sum_{j \in i} \frac{1}{X_j} \Delta P_{Lj} \quad (13.19)$$

$\Delta P_L$  – pierderile de putere activă pe linia "j", în funcție de puterea vehiculată pe linie, tensiune, lungime, secțiune, condiții meteorologice etc.

$\Delta P_{Tr}$  – pierderile de putere în transformatoarele sistemului radial în studiu, cu cele  $X_k$  rezerve în paralel:

$$\Delta P_{Tr} = \sum_{\substack{k \in i \\ k \notin j}} [X_k \Delta p_{0k} + \frac{1}{X_k} \left[ \frac{S_k}{S_{Tk}} \right]^2 \Delta p_{sck}] \quad (13.20)$$

$\Delta p_{0k}$  – pierderile de putere activă la mersul în gol al transformatorului "k", în [kW];

$\Delta p_{sck}$  – pierderile de putere activă la scurtcircuit ale transformatorului "k", în [kW];

$S_{Tk}$  – puterea nominală a transformatorului "k", în [kVA];

$S_k$  – încărcarea transformatorului "k", în [kVA].

Astfel, relația de calcul a cheltuielilor anuale de exploatare este:

$$C_E = \sum_{i=1}^N p_{i,r} I_i + c_p \left[ \sum_{j \in i} \frac{1}{X_j} \Delta P_{Lj} + \sum_{\substack{k \in i \\ k \notin j}} \left( X_k \Delta p_{0k} + \frac{1}{X_k} \left[ \frac{S_k}{S_{Tk}} \right]^2 \Delta p_{sck} \right) \right] \quad (13.21)$$

Pentru cazul unor linii de înaltă tensiune pot fi introduse în relația (13.21) și pierderile de putere prin descărcare corona pe linii.

### Daunele anuale

Această componentă a funcției obiectiv poate fi evaluată cu următoarea expresie:

$$D_{\Sigma} = D_{\beta} + D_{\tau} \quad (13.22)$$

unde:

$D_{\beta}$  - daune reprezentând pagubele produse consumatorului prin nelivrarea de energie electrică pe perioada avariei, în [\$/an];

$$D_{\beta} = P_n \cdot d_{\beta} \cdot M[\beta(t)] \quad (13.23)$$

$P_n$  – puterea cerută de consumator în momentul întreruperii funcționării sistemului de alimentare cu energie electrică, în [kW];

$d_{\beta}$  - valoarea pagubelor provocate la consumator prin nelivrarea unei cantități de energie electrică de 1 kWh, în [lei/kWh];

$M[\beta(t)]$  – durata medie totală de întrerupere a funcționării liniei în intervalul  $T$ , în [h/an].

Pentru subsistemul din Fig. 13.2.  $M[\beta(t)]$  poate fi calculat cu următoarea relație:

$$M[\beta(t)] = \left[ 1 + \left( \sum_{i=1}^N b_i \right)^{-1} \right]^{-1} \cdot T \quad (13.24)$$

$$b_i = \left[ \left( 1 + \frac{\mu_i}{\lambda_i} \right)^{X_i} - 1 \right]^{-1} \quad (13.25)$$

$D_{\tau}$  - daune produse consumatorului prin repunerea în funcțiune a instalațiilor tehnologice, după fiecare întrerupere a sistemului de alimentare cu energie electrică, în [lei/an].

$$D_{\tau} = d_{\tau} \cdot M[\tau(t)] \quad (13.26)$$

$d_{\tau}$  - valoarea daunelor datorate unei singure întreruperi, în [lei/întrerupere];

$M[\tau(t)]$  – numărul mediu de întrerupere în funcționarea sistemului de alimentare într-un interval de timp  $T$ , [întreruperi/an];

$$M[\tau(t)] = \lambda_e \cdot P_s \cdot T \quad (13.27)$$

$$\lambda_e = \sum_{i=1}^N X_i \cdot \mu_i \cdot b_i \quad (13.28)$$



$$P_S = \left[ 1 + \sum_{i=1}^N b_i \right]^{-1} \quad (13.29)$$

Utilizând relațiile de mai sus, relația de calcul a daunelor anuale la consumator devine:

$$D = 8760 \cdot P_n \cdot d_\beta \cdot \left[ 1 + \left( \sum_{i=1}^N b_i \right)^{-1} \right]^{-1} + \quad (13.30)$$

$$+ 8760 \cdot d_\tau \cdot \left[ \sum_{i=1}^N X_i \cdot \mu_i \cdot b_i \right] \cdot \left[ 1 + \sum_{i=1}^N b_i \right]^{-1}$$

Înlocuind relațiile (13.15), (13.21) și (13.30) în expresia (13.14) rezultă valoarea cheltuielilor anuale, ca funcție de variabilele de optimizat  $X_i$  și parametrii de fiabilitate ai elementelor serie componente  $\lambda_i$  și  $\mu_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

### 13.3.2. Restricțiile modelului

După natura și tipul restricțiilor impuse modelului de optimizare, acestea se pot împărți în două grupe distincte:

**Restricții tehnice** – acestea sunt impuse variabilelor de optimizare pe considerente tehnico-funcționale  $a_i^{\min}$  și tehnico-constructive  $a_i^{\max}$ , având forma:

$$a_i^{\min} \leq X_i \leq a_i^{\max}, \quad i = \overline{1, N} \quad (13.31)$$

**Restricții de performanță** – acestea sunt cerute de condiția ca sistemul la funcționare în varianta optimă, să asigure o siguranță în funcționare peste o limită minimă impusă. Această limită minimă a fiabilității este impusă de consumator prin doi parametri:

- în cazul consumatorilor la care daunele sunt proporționale cu durata întreruperii, parametrul impus este gradul de asigurare în alimentarea cu energie electrică,  $G$ :

$$G^{\min} = \frac{W_p - W_n^{\max}}{W_p} \cdot 100[\%] \quad (13.32)$$

unde:

$W_p$  – cantitatea de energie planificată a fi livrată într-o anumită perioadă  $T$ ;

$W_n^{max}$  – cantitatea maximă de energie admisă a fi nelivrată în perioada  $T$ , datorită întreruperilor accidentale în instalațiile furnizorului de energie.

În acest caz, dacă se alege ca parametru de fiabilitate al sistemului în studiu probabilitatea de succes,  $P_S$ , avem următoarele restricții:

$$P_S \geq P_S^{\min}; \quad P_S^{\min} = G^{\min} / 100 \quad (13.33)$$

$$P_S = \prod_{i=1}^N P_S^i; \quad P_S^i = 1 - \prod_{j=1}^{X_i} q_{ij} = 1 - q_i^{X_i}; \quad q_i = \left(1 + \frac{\mu_i}{\lambda_i}\right)^{-1} \quad (13.34)$$

- pentru cazul consumatorilor la care daunele sunt proporționale cu numărul de întreruperi în alimentarea cu energie pe o anumită perioadă (de exemplu, un an), parametrul impus este numărul maxim de întreruperi admis pe un an –  $NI^{max}$ . Parametru de fiabilitate al sistemului va fi în acest caz numărul mediu de întreruperi în funcționarea schemei pe an,  $M[\tau(t)]$  iar restricția impusă acestuia de performanțele schemei va fi:

$$M[\tau(t)] \leq NI^{\max} \quad (13.35)$$

Funcția obiectiv (3.14), împreună cu restricțiile (13.31), (13.33) și (13.35) formează modelul matematic de optimizare a fiabilității unui sistem radial de transport al energiei electrice, cu rezervare pentru fiecare element serie al sistemului.

Modelul, prin neliniaritatea funcției obiectiv și al restricțiilor impuse, formează o problemă de programare neliniară ce poate fi soluționată numai prin metodele programării matematice.

#### 13.4. Desfășurarea lucrării

1. Se studiază textul lucrării.
2. Se va rezolva următoarea problemă:

Să se optimizeze fiabilitatea sistemului de alimentare radială a unui consumator de pe barele de MT ale unei stații de transformare de 110/20 kV, situată la distanța de 1,5 km. Schema de alimentare cuprinde, Fig. 13.3: o linie electrică în cablu 20 kV, celulă de linie echipată cu întrerupător, o celulă de transformator echipată cu separator și un transformator de 100 kVA.

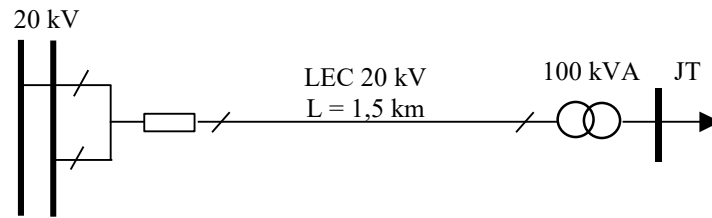


Fig. 13.3. Rețeaua de alimentare

Optimizarea fiabilității schemei este necesară pentru asigurarea unui grad de continuitate economic justificat în alimentarea cu energie electrică a unui consumator de 75 kVA în ipoteza unor valori diferite pentru daunele fixe pe întrerupere, respectiv daunele proporționale cu durata întreruperii.

Indicatorii de fiabilitate pentru elementele componente ale schemei de alimentare sunt:

Tabelul 13.1. Indicatorilor de fiabilitate pentru principalele echipamente electrice

Echipamentul	Indicatorii de fiabilitate [ $10^{-4} \text{ h}^{-1}$ ]	
	Intensitate de defectare $\lambda$	Intensitatea de reparare $\mu$
Intrerupătoare (fără dispozitive de acționare)	0,010 ÷ 0,020	500,0 ÷ 1000,0
Separatoare	0,001 ÷ 0,004	400,0 ÷ 800,00
Transformatoare	0,010 ÷ 0,020	50,00 ÷ 100,00
Bare colectoare	0,010 ÷ 0,040	400,0 ÷ 600,00
LEC 20 kV	0,200 ÷ 0,400	100,0 ÷ 200,00