

TRATAREA NEUTRULUI REȚELELOR ELECTRICE DE MEDIE TENSIUNE

1. Baze teoretice

Punctul neutru al unei rețele electrice trifazate poate fi legat la pământ în mai multe feluri cunoscute sub denumirea de „moduri de tratare a neutrului”. Cel mai folosite variante sunt:

- a) neutru izolat;
- b) neutru legat direct la pământ;
- c) neutru legat direct la pământ prin bobină de stingere;
- d) neutru legat direct la pământ prin rezistență sau inductanță redusă.

Dintre acestea, în rețelele de medie tensiune din România, se utilizează metodele c) și d) și în foarte mică măsură metoda a).

Modul de tratare a neutrului are numeroase consecințe asupra funcționării rețelelor electrice atât în regim normal, dar mai ales în regim de defect monofazat. Asemenea consecințe sunt: mărirea supratensiunilor tranzitorii și staționare, mărirea curentului de defect, posibilitățile (metoda și mijloacele) de separare a defectelor monofazate, potențialele prizelor de pământ, influențe electromagnetice în liniile de curenți slabi și altele.

1.1. Tratarea neutrului cu bobină de stingere

Această metodă are eficiența maximă în cazul rețelelor aeriene, dar se utilizează și în rețelele subterane de dimensiuni mici. Între punctul neutru și pământ este conectată o inductanță reglabilă, denumită bobină de atingere datorită efectului de permite autostingerea arcului electric de defect, dacă este corect reglată.

În cazul unui defect monofazat la pământ, prin locul defectului circulă suma curenților de punere la pământ a fazelor sănătoase (având o componentă activă datorată conductanței izolației și o componentă capacitivă datorată capacității fazelor față de pământ) și curentul bobinei de stingere (format dintr-o componentă activă datorată pierderilor din cupru și din fier și o componentă inductivă corespunzătoare inductanței bobinei) care, în această situație este supusă tensiunii fază – pământ a fazei defecte (fig. 1, a).

Conform diagramei fazoriale din fig. 1, b, curenții inductiv și capacitiv sunt în opoziție de fază, astfel încât, dacă aceste componente sunt egale în modul, prin locul defectului circulă numai un curent rezidual activ.

Dacă defectul monofazat are loc pe faza R, curentul de punere la pământ al liniilor rețelei este:

$$\underline{I}_{pp} = (\underline{U}_S - \underline{U}_R)(G + j\omega C_0) + (\underline{U}_T - \underline{U}_R)(G + j\omega C_0) = -3U_{f-p}(G + j\omega C_0).$$

Curentul care circulă prin bobina de stingere are expresia:

$$\underline{I}_b = \frac{\underline{U}_R}{R_0 + j\omega L_0} = U_{f-p} \frac{R_0 - j\omega L_0}{R_0^2 + (\omega L_0)^2} \approx U_{f-p} \left(\frac{R_0}{(\omega L_0)^2} - j \frac{1}{\omega L_0} \right).$$

Curentul rezidual circulă pe faza defectă între locul defectului și sursă ca și către pământ, având expresia:

$$\underline{I}_{rez} = \underline{I}_b - \underline{I}_{pp} = I_a + j(I_C - I_L) = I_C[\delta + j(1 - q)],$$

unde

$$I_a = U_{f-p} \left[3G + \frac{R_0}{(\omega L_0)^2} \right], \quad I_C = 3\omega C_0 U_{f-p}, \quad (1)$$

$$I_L = \frac{U_{f-p}}{\omega L_0}, \quad \delta = \frac{I_a}{I_C}; \quad q = \frac{I_L}{I_C} = \frac{1}{3\omega^2 L_0 C_0}. \quad (2)$$

δ este numit factor de amortizare, iar q este gradul de acordare al bobinei de stingere.

Modelul curentului rezidual are expresia:

$$I_{rez} = I_C \sqrt{\delta^2 + (1 - q)^2}$$

Pentru $q = 1$ (acord perfect al bobinei de stingere), curentul de punere la pământ are valoarea minimă $I_{rez} = I_a$.

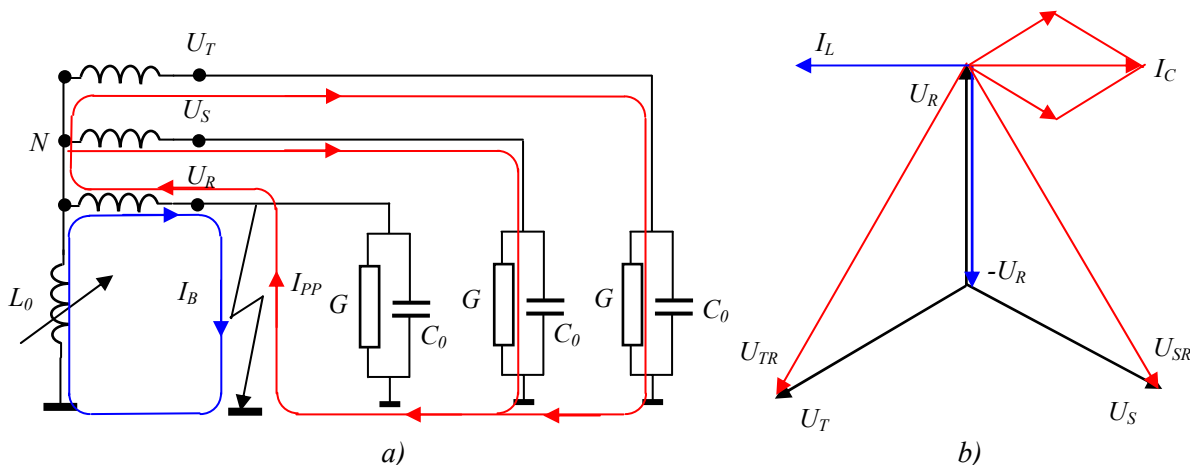


Fig. 1. Compensarea curentului capacitiv de punere la pământ cu ajutorul bobinei de stingere: a) schema electrică; b) diagrama fazorială.

Dacă neutrul rețelei este izolat, atunci prin locul defectului și prin faza defectă până la sursă circulă numai curentul de punere la pământ al liniilor rețelei. Ca urmare, determinarea mărimii curentului de punere la pământ a liniilor rețelei se poate realiza printr-o punere la pământ artificială, neutrul rețelei fiind izolat.

Tensiunea pe fazele sănătoase față de pământ devine egală cu $\sqrt{3}U_f = U_l$, ceea ce constituie supratensiunea temporară în regim staționar de defect. În regimul tranzitoriu supratensiunea poate fi mai mare, în funcție de modul de producere a defectului: metalic sau prin arc electric intermitent. Durata supratensiunilor temporare poate fi limitată prin acordarea la rezonanță a bobinei de stingere, datorită auto-eliminării defectelor care au loc prin arc electric. Posibilitățile de stingere ale arcului electric de defect, fiind mai mari în rețele aeriene, bobina de stingere este mult mai eficientă în aceste rețele.

În regim normal de funcționare a rețelelor cu bobină de stingere, între punctul neutru și pământ există o tensiune a cărei mărime depinde de gradul de acordare al bobinei, de nesimetria admitanțelor fazelor rețelei față de pământ ca și de nesimetria sistemului tensiunilor de fază ale sursei de alimentare.

Considerând că tensiunile de alimentare formează un sistem cu succesiune directă, că conductanțele izolației pe cele trei faze sunt egale și că, pe faza R, capacitatea față de pământ diferă prin coeficientul m în raport cu celelalte faze, se obține pentru modulul tensiunii de deplasare a neutrului, expresia:

$$U_N = \frac{m-1}{\sqrt{(3\delta)^2 + (2+m-3q)^2}}.$$

Mărimea tensiunii depinde de starea de acordare a bobinei de stingere fiind maximă în pentru $q=(2+m)/3$, ceea ce corespunde compensării perfecte a curentului capacitiv într-o rețea cu nesimetrie naturală de capacități față de pământ exprimată prin factorul m .

1.2. Tratarea neutrului cu impedanță redusă

Procedeele de tratare a neutrului cu bobină de stingere se dovedește mai puțin eficient în anumite situații: rețele foarte întinse având valoare mare a componentei active a curentului de defect, rețele subterane în care auto-stingerea arcului electric în izolația solidă este dificilă, rețele cu consumatori deformanți datorită cărora curentul rezidual de defect este important și conține armonici superioare. În aceste cazuri se recomandă legarea la pământ a neutrului printr-o impedanță care limitează mărimea curentului de scurtcircuit monofazat fără a afecta sensibilitatea protecțiilor prin relele destinate separării zonei cu defect.

Dimensionarea impedanței reduse pornește de la valoarea curentului de scurtcircuit monofazat maxim admisibil în rețea. Folosind metoda de calcul cu ajutorul componentelor simetrice, schemei monofilare a unei rețele de distribuție de medie tensiune (fig.2, a) îi va corespunde o schema echivalentă din fig.2, b. În această schemă, indicii d , i și h corespund componentelor directă, inversă și homopolară pentru mărimile electrice ale schemei trifazate.

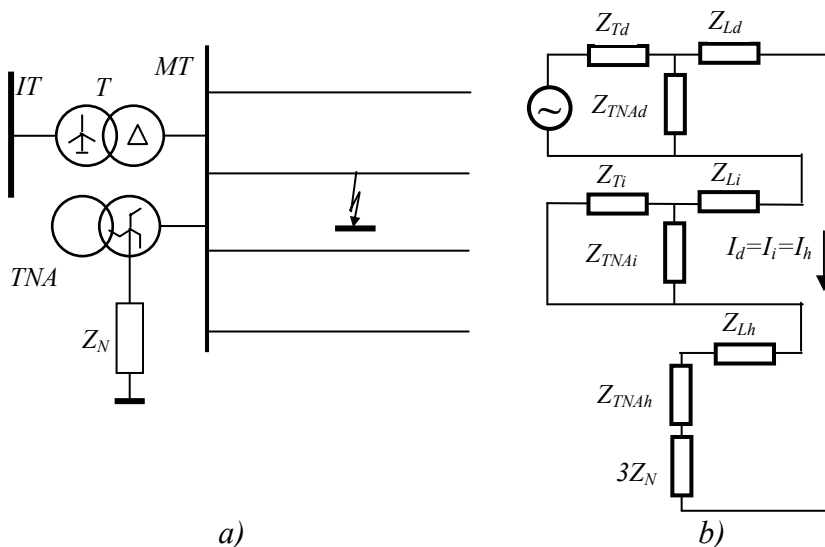


Fig.2 – Scurtcircuit monofazat într-o rețea cu neutrul tratat prin impedanță redusă
 a)-schema monofilară; b)-schema echivalentă de calcul

Impedanțele liniei din schema echivalentă corespund liniei pe care s-a produs defectul monofazat, până la locul defectului.

Componentele simetrice ale curentului de defect monofazat se determină cu relația:

$$\underline{I}_d = \underline{I}_i = \underline{I}_h = \frac{U_{f-p}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_h},$$

în care Z_d , Z_i și Z_h sunt impedanțele echivalente ale schemelor de secvență directă, inversă și homopolară în raportul cu locul defectului. Curentul de scurtcircuit monofazat are expresia:

$$\underline{I}_{kl} = 3\underline{I}_d = \frac{3U_{f-p}}{2\underline{Z}_d + \underline{Z}_h}, \quad (3)$$

deoarece pentru componentele schemei este valabilă egalitatea $\underline{Z}_d = \underline{Z}_i$.

Tensiunile fazelor sănătoase față de pământ la locul defectului, în regim staționar de defect, se calculează cu relația:

$$\underline{U}_{S,T} = U_{f-p} \left[\frac{-3\underline{Z}_h}{2(2\underline{Z}_d + \underline{Z}_h)} \pm j \frac{\sqrt{3}}{2} \right]. \quad (4)$$

2. Modelul fizic al rețelei de distribuție 20 kV

Studiul modurilor de tratare a neutrilor rețelelor de distribuție se va efectua pe un model fizic de rețea de 20 kV, având schema monofilară asemănătoare cu aceea din fig. 2, a cuprinzând 3 linii de tip constructiv diferit.

Alimentarea rețelei de distribuție este realizată printr-un transformator IT/MT având grupa de conexiuni Yd-5. Neutrul rețelei este creat cu un transformator de neutru artificial, având pe partea de medie tensiune înfășurarea conectată în Z.

Determinarea scărilor de modelare a componentelor ca și ale curentului și tensiunii se face pornind de la relația de calcul a curentului capacitiv de punere la pământ (1), alegând scara unitară de modelare pentru timp (frecvența pe model este aceeași ca în rețeaua reală), iar scara de modelare a capacităților $m_C = 5$ (pentru a obține curenți capacitivi măsurabili cu precizie bună), rezultă

$$m_I = 5m_U. \quad (5)$$

Pentru reactanțe (și rezistențe) se obține

$$m_R = m_X = \frac{I}{m_C} = \frac{I}{5}.$$

Întrucât componentele modelului pot fi considerate lineare în raport cu tensiunea aplicată, rămâne arbitrară alegerea scării de modelare a tensiunii pe model.

Modelele transformatoarelor au grupa de conexiuni identică cu a transformatoarelor reale, iar parametrii reduși, folosind scările de modelare alese. Liniile electrice sunt reprezentate prin multipoli cu câte 4 borne de intrare și de ieșire pentru a se ține seama de deosebirile dintre parametrii de secvență directă și homopolară.

Parametrii liniilor electrice reale și modelate ca și schemele de principiu ale multipolilor modelului sunt date în tabelul 1.

Parametrii transformatoarelor din rețeaua reală sunt:

- transformatorul IT/MT: $S_n = 10$ MVA, $U_n = 110/20$ kV, $U_k = 10\%$, $P_k = 100$ kW;
- transformatorul de neutru artificial: $S_n = 630$ kVA, $U_n = 20/0,4$ kV, $U_k = 6\%$, $P_k = 10$ kW.

Bobina de stingere este realizată ca inductanță variabilă, combinând reglajul în trepte (cu ajutorul prizelor bobinajului) cu reglajul continuu (folosind premagnetizarea în curent continuu). Domeniul de reglare fină este limitat de apariția saturației circuitului magnetic, dar poate acoperi distanța dintre două prize succesive ale bobinajului. Schema de principiu a

modelului bobinei de stingere este dată în fig.3, iar variația inductanței în raport cu intensitatea curentului continuu de comandă este dată în fig.4.

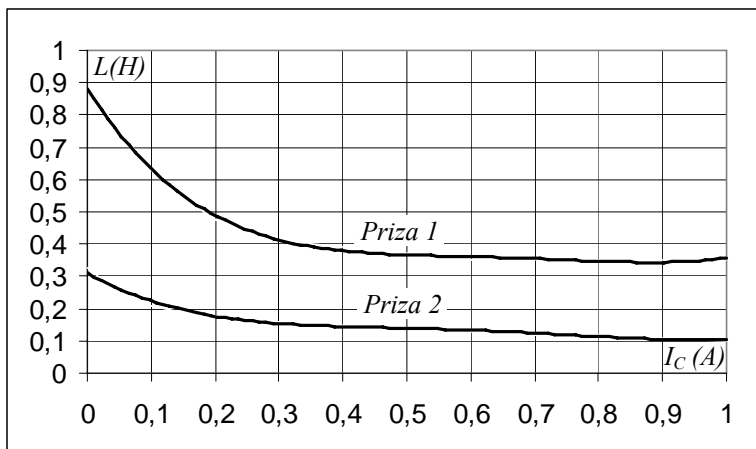
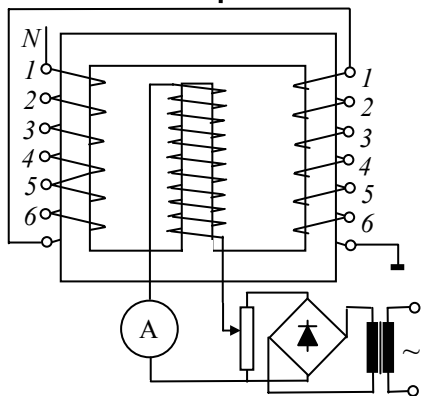


Fig.3-Schema de principiu a modelului bobinei de stingere

Fig.4-Inductanța bobinei de stingere în funcție de mărimea curentului de comandă

Tabelul 1 – Parametrii și schemele liniilor de medie tensiune modelate

Parametrul		Linia modelată					
		LEA 20 kV 70 km 7 multipoli		LES 20 kv (cablu în manta) 7.56 km 4 multipoli		LES 20 kv (cablu ecranat) 5,4 km 5 multipoli	
		reală	modelată	reală	modelată	reală	modelată
Rezistență (Ω/km), respectiv (Ω/multipol)	R _d	0,432	0,864	0,253	0,0759	0,253	0,055
	R _h	1,94	2,388	1,95	0,595	1,95	0,422
	R _N	-	0,508	-	0,170	-	0,122
Inductivitate (mH/km), respectiv (mH/multipol)	L _d	1,639	3,278	0,385	0,115	0,35	0,076
	L _h	5,08	10,16	0,024	0,227	0,84	0,18
	L _N	-	2,294	-	0,054	-	0,035
Capacitate (nF/km), respectiv (μF/multipol)	C ₁	3,78	0,189	180	1,7	405	2,19
	C ₂	3,307	0,165	180	1,7	405	2,19
	C ₃	3,78	0,189	180	1,7	405	2,19
	C ₁₂	1,88	0,094	35	0,33	-	-
	C ₂₃	1,88	0,094	35	0,33	-	-
	C ₃₁	0,90	0,045	35	0,33	-	-
Schema electrică echivalentă		<p>Equivalent circuit diagram for the LEA 20 kV line, showing series inductances L_d and L_N, series resistances R_d and R_N, and shunt capacitors C₁₂, C₂₃, and C₃₁.</p>			<p>Equivalent circuit diagram for the LES 20 kv (shielded cable) line, showing series inductances L_d and L_N, series resistances R_d and R_N, and shunt capacitors C₁, C₂, and C₃.</p>		

Panoul frontal al modelului are aspectul din fig.5

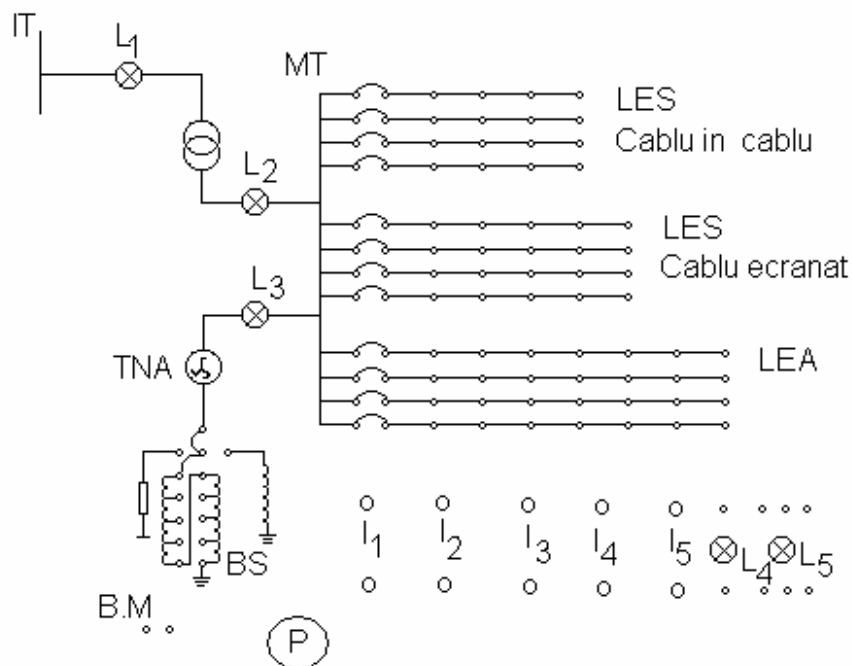


Fig.5. Modelul de rețea de medie tensiune-panoul frontal: L_1-L_5 –lămpi de semnalizare a închiderii întrerupătoarelor I_1-I_5 ; R_N, X_N, BS –elementele de tratare a neutrilor; BM - borne de măsură a curentului de comandă a modelului de bobină de stingere; P -potențiometrul pentru modificarea curentului de comandă a modelului de bobină de stingere.

Punerea în funcțiune a modelului se face după racordarea la rețea a celor două cordoane de alimentare, trifazat și monofazat. Fiecare întrerupător este acționat prin două butoane de comandă dispuse pe verticală, cel de sus comandând aclașarea, iar cel de jos, declașarea.

Prin închiderea întrerupătoarelor I_1 și I_2 se aduce tensiunea la șirul de borne care modelează barele de medie tensiune. Liniile modelului se racordează la bare prin conectori mobili.

Întrerupătorul I_3 conectează la bare transformatorul de neutru artificial (TNA). La borna de neutru a TNA se poate conecta, elementul de tratare a neutrilor ales (stânga R_N , mijloc BS, dreapta X_N).

Pentru utilizarea BS se va racorda la bornele de măsură un ampermetru de curent continuu cu domeniul de măsură 0-1 A. Întrerupătoarele I_4 și I_5 se folosesc pentru simularea unor defecte nesimetrice în rețea.

3. Modul de lucru

3.1. Neutrul izolat

- Se vor calcula curenții capacitivi de punere la pământ corespunzători fiecărei linii din rețeaua reală cu ajutorul relației (1) și a capacităților fază-pământ din tabelul 1.

- Se va măsura, pe model, curentul de punere la pământ a fiecărei linii ca și a întregii rețele. Pentru aceasta se va simula un defect monofazat, legând la pământ o fază a liniei prin contactul întrerupătorului I_4 în serie cu un ampermetru de curent alternativ cu domeniul de măsurare 0-1 A. Linia se conectează la bare prin conectori, după care se aplică tensiunea prin întrerupătoarele I_1 și I_2 , iar defectul se simulează prin închiderea întrerupătorului I_4 . Se va deduce corelația dintre curenții de punere la pământ ai liniilor rețelei și curentul de punere la pământ al întregii rețele.

- Se compară valorile măsurate pe model cu acelea calculate pentru rețeaua reală, folosind definiția scării de modelare a curentului :

$$m_I = \frac{I_{mod\ el}}{I_{real}} .$$

Scara de modelare a curentului se va determina cu relația (5), cunoscând scara de modelare a tensiunii, care se determină măsurând tensiunea pe model:

$$m_u = \frac{U_{mod\ el}}{20 \cdot 10^3} .$$

- Se măsoară tensiunile de fază și de linie în diferite puncte ale rețelei, în regim normal și în regim de defect monofazat, observând modificările provocate de către defect.

3.2. Neutrul tratat prin bobină de stingere

- În regim normal de funcționare a rețelei modelate, în care toate cele trei linii sunt racordate la bare, se va trasa curba $U_N=f(q)$ a tensiunii de deplasare a neutrilor în funcție de gradul de acordare a bobinei de stingere. Se va măsura tensiunea pe bobina de stingere pentru diferite valori ale inductanței acesteia. Valorile inductanței se determină din fig.4 cunoscând valoarea curentului de comandă și priza utilizată. Gradul de acordare q se calculează cu relația (2), în care C_0 este capacitatea fază-pământ a întregii rețele (suma capacităților fază-pământ a liniilor rețelei).

- În regim de punere la pământ monofazată în rețea, se va trasa curba $I_{rez}=f(q)$, prin măsurarea curentului de punere la pământ pentru diferite valori ale inductanței bobinei de stingere, iar gradului de acordare q se va calcula, ca mai sus.

- Se vor măsura tensiunile de fază și de linie în rețea în regim de defect monofazat, în diferite puncte din rețea, comparând rezultatele cu acelea obținute pentru neutrul izolat.

3.3. Neutrul tratat prin impedanță mică

▪ Se va calcula valoarea rezistenței R_N respectiv a reactanței inductive X_N de legare la pământ a punctului neutru, pentru a se obține o limitare a curentului de scurtcircuit monofazat la 300 A. Se va folosi relația (3). Se va considera, în schema monofilară din fig.2,a, că defectul are loc pe barele de medie tensiune (situație în care mărimea curentului de defect este maximă). Ca urmare, în schema de calcul din fig.2.b, nu mai intervin impedanțele liniei. Parametrii transformatoarelor se calculează cu relațiile:

$$X_T = \frac{U_k(\%) \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n} (\Omega), U_n (kV), S_n (MVA);$$

$$R_T = P_{sc} \frac{U_n^2}{S_n^2} 10^{-3} (\Omega), P_{sc} (kW), U_n (kV), S_n (MVA).$$

▪ Se calculează valoarea supratensiunilor pe fazele sănătoase ale rețelei, în regim staționar de defect, folosind relația (4).

▪ Se determină pe model valoarea curentului de scurtcircuit pentru diferite poziții ale defectului monofazat, pe bare sau pe linii. Se măsoară supratensiunile pe fazele sănătoase la locul de defect și în alte locuri din rețea și se compară cu valorile calculate.

Bibliografie

Gușă M., Istrate M., Gavrițaș N., Asaftei C. -Tehnica tensiunilor înalte-Supratensiuni în sistemele electroenergetice. Ed.fundației culturale Renașterea Română, 1997, pag.186-221.