

## 4. SUPRATENSIUNI DATORATE DEFECTELOR NESMETRICE ÎN REȚELELE ELECTRICE (Tratarea Neutrului Rețelelor Electrice)

4.1 Modurile de legare la pământ a punctului neutru	1
4.2. Supratensiuni datorate defectelor monofazate	3
4.2.1. Supratensiuni în regim stabilizat de defect monofazat	3
4.2.2 Supratensiuni în regim tranzitoriu de defect monofazat	9
4.3. Rețele compensate	13
4.3.1 Compensarea curentului capacitiv	13
4.3.2. Regimul tranzitoriu de stingere a arcului electric de defect	15
4.3.3. Tensiunea de deplasare a neutrului	16
4.3.4. Construcția, instalarea și exploatarea bobinelor de stingere	18
4.3.4.1. Tipuri constructive de bobine de stingere	18
4.3.4.2. Dimensionare și instalare	19
4.3.4.3. Exploatarea bobinelor de stingere	20
4. 4. Rețele cu neutrul legat la pământ	21
4.4.1. Neutrul legat direct la pământ	21
4.4.1.1. Curentul de defect monofazat	21
4.4.1.2. Supratensiunile pe fazele sănătoase	22
4.4.2. Neutrul legat la pământ prin impedanță redusă	22
4.5. Alegerea modului de tratare a neutrului rețelelor electrice	24
4. 6. Supratensiuni de regim staționar datorate dublei puneri la pământ	26

### 4.1. Modurile de legare la pământ a punctului neutru

Termenul “punct neutru” este folosit pentru a denumi un nod la care sunt legate, cu câte o bornă, toate fazele unui sistem polifazat de curent alternativ. Prezența punctului neutru accesibil semnifică existența unei conexiuni în “stea” sau în “zig-zag”. Conexiunea în “triunghi” nu permite accesarea unui punct neutru natural.

În regim echilibrat de funcționare a unei surse trifazate, care alimentează un circuit simetric cuprinzând linii electrice și consumatori, potențialul punctului neutru este zero, iar mărimea curentului în acest nod este, de asemenea, nulă. Regimul ideal presupus mai sus nu este niciodată real; ca urmare, fie că potențialul punctului neutru este diferit de zero, fie curentul prin acest nod este nenul, chiar în regim normal de

funcționare a rețelei trifazate. Mărimile menționate sunt influențate, pe lângă sursă și rețea, de impedanța dintre punctul neutru și pământ.

Problemele legate de modul de legare a punctului neutru la pământ se manifestă mai ales în regimurile nesimetrice de avarie, de care sunt responsabile mai ales rețelele și consumatorii. Cele mai frecvente regimuri de acest fel sunt defectele nesimetrice transversale la pământ (simpla și dubla punere la pământ). Mărimea impedanței dintre punctul neutru și pământ are influență decisivă asupra mărimii curenților și tensiunilor în regim de defect.

Principalele moduri de tratare a neutrului sunt prezentate în tabelul 1.

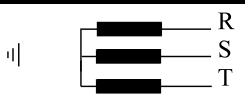
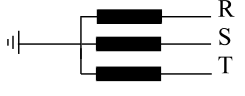
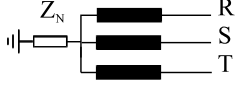
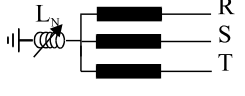
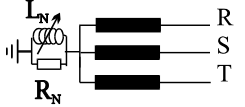
**Neutrul izolat:** între punctul neutru și pământ nu se află un element fizic de circuit, ci doar o izolație capabilă să suporte creșterile de potențial apărute în regimul normal de funcționare simetric sau în regim de defect. Dacă înfășurarea trifazată are conexiunea în triunghi și nu există alt echipament cu conexiune în stea, neutrul izolat este implicit și inaccesibil.

În toate celelalte cazuri neutrul poate fi considerat legat la pământ, dar din cauza multiplelor posibilități de realizare și a implicațiilor corespunzătoare, se adoptă denumiri specifice.

**Neutrul este legat direct (metalic) la pământ,** atunci când mărimea impedanței  $Z_N$  este aceea a conductorului dintre punctul neutru și priza de pământ ( $Z_N = 0$ ).

Legarea neutrului la pământ prin **impedanță redusă** se poate realiza printr-un rezistor sau o inductanță adecvate. Mărimea impedanței este fixă, indiferent de dimensiunile rețelei, depinzând numai de tensiunea nominală a acesteia și de tipul constructiv (aerian sau subteran).

**Tabelul 1.** Moduri de tratare a neutrului

Modul de tratare	Mărimea impedanței $Z_N$	Schema de principiu
Izolată	infinită	
Legat direct la pământ	0	
Legat la pământ prin impedanță redusă	1 - 3 $\Omega$ /kV	
Compensat (bobină de stingere)	5-100 $\Omega$ /kV	
Mixt (bobină de stingere + impedanță redusă)	1-100 $\Omega$ /kV	

**Neutrul compensat (tratat cu bobină de stingere)** se realizează prin intercalarea între punctul neutru și pământ a unei inductanțe reglabile, dimensionată în funcție atât de tensiunea nominală a rețelei cât și de întinderea acesteia.

**Soluția mixtă** reunește două elemente de tratare pentru același punct neutru și care se folosesc într-o anumită ordine, în scopul cumulării avantajelor celor două soluții

luate separat. Cea mai frecventă utilizare o are asocierea unei bobine de stingere cu o impedanță de valoare redusă.

Fiecare dintre modurile de tratare a neutrilor are domenii preferențiale de utilizare, fără a se exclude și unele suprapuneri. Alegerea soluției optime este rezultatul luării în considerare a tuturor influențelor asupra **defectului transversal monofazat** deoarece:

- acest tip de defect este cel mai frecvent în raport cu celelalte,
- este decisiv influențat de mărimea impedanței  $Z_N$ .

Aceste influențe decurg din mărimea curentului de defect și a (supra-) tensiunilor pe fazele rețelei în regim de defect. Mărimea supratensiunilor în regim de defect monofazat este decisivă pentru:

- alegerea nivelului de izolație al rețelei,
- alegerea descărcătoarelor pentru protecție la supratensiuni atmosferice și de comutație.

Mărimea curentului de defect monofazat are o gamă mai largă de influențe:

- asupra modului de detectare a defectului, a sensibilității și selectivității protecțiilor,
- asupra continuității în alimentare a consumatorilor,
- asupra solicitării termice și electrodinamice a echipamentelor rețelei,
- asupra potențialelor prizelor de pământ parcurse de curentul de defect,
- asupra tensiunilor induse în liniile de telecomunicații prin fir, care au trasee paralele cu liniile rețelei electrice.

Importanța acestor consecințe poate diferi în funcție de tensiunea nominală și tipul constructiv al rețelei. Adesea intervin și considerații subiective fie datorate tradiției locale, fie însușirii unui model, astfel că se folosesc soluții diferite în condiții asemănătoare.

## 4.2. Supratensiuni datorate defectelor monofazate

### 4.2.1. Supratensiuni în regim stabilizat de defect monofazat

Procedeul uzual de analiză a unui asemenea defect este bazat pe folosirea metodei componentelor simetrice. Potrivit acestei metode orice sistem de trei vectori a căror sumă este nulă poate fi descompus în trei sisteme de vectori și anume:

- **sistemul direct**, format din trei vectori egali în modul, defazați cu  $120^\circ$  și care se succed în ordinea acelor de ceas;
- **sistemul invers**, format din trei vectori egali în modul, defazați cu  $120^\circ$  și care se succed în ordinea inversă acelor de ceas;
- **sistemul homopolar**, format din trei vectori egali în modul având și aceeași fază.

Sistemele dezechilibrate ale tensiunilor și curenților fazelor dintr-o rețea trifazată se pot descompune în componente simetrice astfel:

$$\begin{aligned} \underline{U}_R &= \underline{U}_h + \underline{U}_d + \underline{U}_i & \underline{I}_R &= \underline{I}_h + \underline{I}_d + \underline{I}_i \\ \underline{U}_S &= \underline{U}_h + a^2 \underline{U}_d + a \underline{U}_i & \underline{I}_S &= \underline{I}_h + a^2 \underline{I}_d + a \underline{I}_i, \\ \underline{U}_T &= \underline{U}_h + a \underline{U}_d + a^2 \underline{U}_i & \underline{I}_T &= \underline{I}_h + a \underline{I}_d + a^2 \underline{I}_i \end{aligned} \quad (4.1)$$

în care  $a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ ;  $a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$ .  $1 + a + a^2 = 0$

Pentru analiza regimului de defect monofazat se va folosi o schemă echivalentă de calcul a cărei structură se obține pe baza relațiilor dintre componentele simetrice de tensiune, respectiv de curent, considerându-se condițiile specifice acestui defect și valabile la locul defectului (fig.4.1).

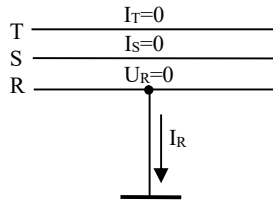


Fig.4.1 - Defect monofazat

Defectul considerat fiind o punere directă la pământ (defect metalic sau galvanic), din condiția  $\underline{U}_R = 0$ , rezultă:

$$\underline{U}_h + \underline{U}_d + \underline{U}_i = 0. \quad (4.2)$$

Din egalitatea cu zero a curenților de defect pe fazele sănătoase se obține:

$$\underline{I}_h + a^2 \underline{I}_d + a \underline{I}_i = \underline{I}_h + a \underline{I}_d + a^2 \underline{I}_i$$

sau

$$(a^2 - a) \underline{I}_d = (a^2 - a) \underline{I}_i,$$

respectiv

$$\underline{I}_d = \underline{I}_i.$$

Introducând acest rezultat într-una dintre relațiile de descompunere a curentului de pe fazele sănătoase, rezultă

$$\underline{I}_S = \underline{I}_h + a^2 \underline{I}_d + a \underline{I}_i = \underline{I}_h + (a^2 + a) \underline{I}_d = \underline{I}_h - \underline{I}_d = 0.$$

Ca urmare:

$$\underline{I}_h = \underline{I}_d = \underline{I}_i. \quad (4.3)$$

Condițiile (4.2) și (4.3) permit întocmirea schemei echivalente de calcul din fig.4.2, a). În această figură, **D**, **I** și **H** reprezintă schemele echivalente ale rețelei în raport cu locul defectului, valabile pentru cele trei componente simetrice.

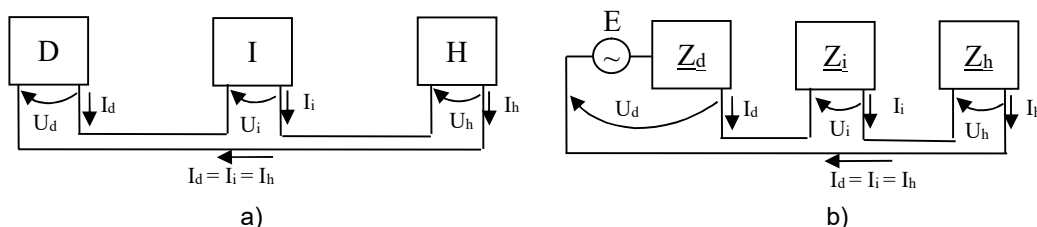


Fig.4.2 Schema echivalentă pentru defectul monofazat.

Cele trei scheme sunt conectate în serie. În schema de secvență directă este inclusă și sursa, considerată a furniza un sistem de trei tensiuni egale în modul și defazate cu  $120^\circ$ , formând astfel un sistem direct de tensiuni. Nu există tensiuni electromotoare pe secvențele inversă și homopolară. Punând în evidență sursa, schema se poate modifica ca în fig.4.2, b).

Pentru componentele simetrice de tensiune, se poate scrie:

$$\underline{U}_d = \underline{E} - \underline{Z}_d \underline{I}_d, \quad \underline{U}_i = -\underline{Z}_i \underline{I}_i, \quad \underline{U}_h = -\underline{Z}_h \underline{I}_h. \quad (4.4)$$

Pentru componentele simetrice de curent este valabilă relația:

$$I_d = I_i = I_h = \frac{E}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_h}. \quad (4.5)$$

Tensiunile pe fazele rețelei în regim stabilizat de defect monofazat, rezultă

- pentru faza R

$$\underline{U}_R = \underline{U}_h + \underline{U}_d + \underline{U}_i = E - (\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_h)I_d = E - \frac{E}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_h}(\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_h) = 0$$

- pentru faza S

$$\underline{U}_S = \underline{U}_h + a^2 \underline{U}_d + a \underline{U}_i = -\underline{Z}_h I_d + a^2 (E - \underline{Z}_d I_d) + a(-\underline{Z}_i I_d)$$

- pentru faza T

$$\underline{U}_T = \underline{U}_h + a \underline{U}_d + a^2 \underline{U}_i = -\underline{Z}_h I_d + a(E - \underline{Z}_d I_d) + a^2(-\underline{Z}_i I_d)$$

Pentru rețelele de transport și distribuție a energiei electrice, care conțin numai elemente pasive (fără generatoare), se poate admite că

$$\underline{Z}_d = \underline{Z}_i.$$

Astfel

$$\underline{U}_S = -\underline{Z}_h I_d + a^2 E - (a^2 + a)\underline{Z}_d I_d = a^2 E + (\underline{Z}_d - \underline{Z}_h)I_d.$$

$$\underline{U}_T = -\underline{Z}_h I_d + a E - (a^2 + a)\underline{Z}_d I_d = a E + (\underline{Z}_d - \underline{Z}_h)I_d.$$

Introducând expresia (4.5) a curentului pe secvența directă, se obține

$$\underline{U}_S = a^2 E + (\underline{Z}_d - \underline{Z}_h) \frac{E}{2\underline{Z}_d + \underline{Z}_h} = E \left( a^2 + \frac{\underline{Z}_d - \underline{Z}_h}{2\underline{Z}_d + \underline{Z}_h} \right). \quad (4.6)$$

$$\underline{U}_T = a E + (\underline{Z}_d - \underline{Z}_h) \frac{E}{2\underline{Z}_d + \underline{Z}_h} = E \left( a + \frac{\underline{Z}_d - \underline{Z}_h}{2\underline{Z}_d + \underline{Z}_h} \right). \quad (4.7)$$

Daca se neglijează rezistențele schemei, respectiv,  $\underline{Z} = jx$  rezultă

$$\underline{U}_{S,T} = E \left( -\frac{1}{2} \mp j \frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{X_d - X_h}{2X_d + X_h} \right) = E \left( \frac{-2X_d - X_h + 2X_d - 2X_h}{2(2X_d + X_h)} \mp j \frac{\sqrt{3}}{2} \right).$$

În final

$$\underline{U}_{S,T} = E \left( \frac{-3X_h}{2(2X_d + X_h)} \mp j \frac{\sqrt{3}}{2} \right). \quad (4.8)$$

Modulul tensiunii pe fazele sănătoase este

$$U_{S,T} = E \sqrt{\frac{9X_h^2}{4(2X_d + X_h)^2} + \frac{3}{4}} = E \sqrt{\frac{9X_h^2 + 3(4X_h^2 + 4X_d X_h + X_h^2)}{4(2X_d + X_h)^2}}.$$

$$U_{S,T} = \sqrt{3}E \frac{\sqrt{X_h^2 + X_d X_h + X_h^2}}{2X_d + X_h} \quad (4.9)$$

Dacă se notează  $\alpha = X_h/X_d$ , se obține forma

$$U_{S,T} = \sqrt{3}E \frac{\sqrt{1 + \alpha + \alpha^2}}{2 + \alpha}. \quad (4.10)$$

Relația (4.10) exprimă dependența modului tensiunii pe fazele sănătoase de raportul reactanțelor echivalente ale rețelei, în raport cu locul defectului, pe secvențele homopolară și directă. Mărimea acestui raport depinde de modul de tratare a neutrului rețelei ca și de poziția defectului în rețea. Pentru observarea acestei dependențe, se va considera un exemplu de calcul.

### Exemplu:

Se consideră cazul unui defect monofazat pe o linie de medie tensiune, conectată la o stație de transformare având configurația de bază uzuală în sistemul energetic național (fig.4.3,a). Este specific faptul înfășurarea de medie tensiune a transformatorului IT/MT are conexiunea în triunghi, ceea ce impune prezența unui transformator de neutru artificial (TNA). În amonte de bara de ÎT a stației se află rețeaua de transport, care, pentru simplificare, poate fi considerată ca o sursă de putere infinită.

Schema echivalentă de secvență directă, obținută în raport cu locul defectului este reprezentată în fig.4.3,b. În această schemă,  $\underline{Z}_L$  este impedanța directă a liniei până la locul defectului, iar  $\underline{Z}_T$  și  $\underline{Z}_{TNA}$  sunt impedanțele celor două transformatoare.

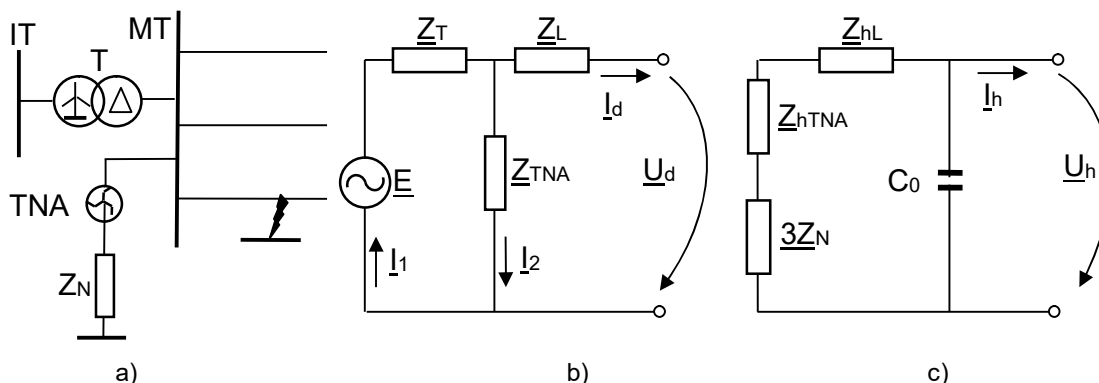


Fig.4.3 Schemele monofilară (a), de secvență directă (b) și de secvență homopolară (c)

Pentru ca, într-o asemenea schemă, să se poată pune în evidență o impedanță echivalentă  $\underline{Z}_d$  ca în fig.4.2, se vor prelucra în mod adecvat ecuațiile schemei, scrise pe baza legilor lui Kirchoff:

$$\underline{E} = \underline{Z}_T \underline{I}_1 + \underline{Z}_L \underline{I}_d + \underline{U}_d, \quad \underline{Z}_{TNA} \underline{I}_2 - \underline{U}_d - \underline{Z}_L \underline{I}_d = 0, \quad \underline{I}_1 = \underline{I}_2 + \underline{I}_d.$$

Din a doua ecuație rezultă

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{Z}_L \underline{I}_d + \underline{U}_d}{\underline{Z}_{TNA}}.$$

Introducând această expresie în prima relație și simplificând, astfel încât coeficientul lui  $\underline{U}_d$  să fie 1, se obține:

$$\begin{aligned}
 E &= \underline{Z}_T \underline{I}_I + \underline{Z}_L \underline{I}_d + \underline{U}_d = \underline{Z}_T \left( \frac{\underline{Z}_L \underline{I}_d + \underline{U}_d}{\underline{Z}_{TNA}} + \underline{I}_d \right) + \underline{Z}_L \underline{I}_d + \underline{U}_d = \\
 &= \underline{U}_d \left( 1 + \frac{\underline{Z}_T}{\underline{Z}_{TNA}} \right) + \underline{I}_d \left( \underline{Z}_L + \frac{\underline{Z}_T \underline{Z}_L}{\underline{Z}_{TNA}} + \underline{Z}_T \right) = \underline{U}_d \frac{\underline{Z}_T + \underline{Z}_{TNA}}{\underline{Z}_{TNA}} + \underline{I}_d \frac{\underline{Z}_L \underline{Z}_{TNA} + \underline{Z}_T \underline{Z}_L + \underline{Z}_T \underline{Z}_{TNA}}{\underline{Z}_{TNA}} = \\
 &\underline{U}_d \frac{\underline{Z}_T + \underline{Z}_{TNA}}{\underline{Z}_{TNA}} + \underline{I}_d \frac{\underline{Z}_L (\underline{Z}_{TNA} + \underline{Z}_T) + \underline{Z}_T \underline{Z}_{TNA}}{\underline{Z}_{TNA}}
 \end{aligned}$$

$$\frac{\underline{Z}_{TNA}}{\underline{Z}_T + \underline{Z}_{TNA}} E = \underline{U}_d + \frac{\underline{Z}_L (\underline{Z}_{TNA} + \underline{Z}_T) + \underline{Z}_T \underline{Z}_{TNA}}{\underline{Z}_{TNA}} \frac{\underline{Z}_{TNA}}{\underline{Z}_T + \underline{Z}_{TNA}} \underline{I}_d$$

$$\frac{\underline{Z}_{TNA}}{\underline{Z}_T + \underline{Z}_{TNA}} E = \underline{U}_d + \left( \underline{Z}_L + \frac{\underline{Z}_T \underline{Z}_{TNA}}{\underline{Z}_T + \underline{Z}_{TNA}} \right) \underline{I}_d$$

sau  $\underline{E}_e = \underline{U}_d + \underline{Z}_d \underline{I}_d$ .

Prin echivalare, se obțin relațiile de calcul pentru:

- t.e.m. echivalentă  $\underline{E}_e = \frac{\underline{Z}_{TNA}}{\underline{Z}_T + \underline{Z}_{TNA}} E$  (4.11)

- impedanța echivalentă de secvență directă  $\underline{Z}_d = \underline{Z}_L + \frac{\underline{Z}_{TNA} \underline{Z}_T}{\underline{Z}_{TNA} + \underline{Z}_T}$ . (4.12)

Așadar, t.e.m. în schema echivalentă de calcul a defectului nesimetric diferă de aceea a sursei, iar impedanța  $\underline{Z}_d$  a schemei de secvență directă se obține ca impedanța echivalentă a schemei respective pasivizată, în raport cu locul defectului.

Schema de secvență inversă este identică, în acest caz, cu schema de secvență directă pasivizată, iar impedanța echivalentă este, de asemenea, identică cu aceea de secvență directă.

Schema echivalentă pentru secvența homopolară este aceea din fig.4.3,c. În această schemă apare impedanța de tratare a neutrului, care nu există în schemele directă și inversă, deoarece curenții pe secvențele respective au suma egală cu zero în punctul neutru. Conexiunea în triunghi a transformatorului IT/MT pe partea de MT împiedică închiderea curentului homopolar prin această înfășurare, astfel că transformatorul **T** nu mai apare în această schemă. Capacitatea  $C_0$  din schema homopolară este capacitatea fază-pământ a întregii rețele racordată la sistemul de bare MT. În cazul în care  $\underline{Z}_N$  are mărime redusă (neutru legat la pământ direct sau prin impedanță de limitare a curentului de scurtcircuit monofazat) și defectul are rezistență mică, această capacitate poate fi neglijată. Schema de secvență homopolară fiind pasivă, obținerea impedanței echivalente nu ridică probleme de principiu.

Analiza mărimii supratensiunilor pe fazele sănătoase are ca punct de plecare relația (4.10).

În figura 4.4 este reprezentată variația factorului de supratensiune temporară pe fazele sănătoase,  $k_s = U_s / \pi E$ , în funcție de mărimea raportului  $\alpha$ .

Domeniul de valori ale factorului  $\alpha$  ( $-\infty < \alpha < \infty$ ), acoperă toate modurile posibile de tratare a neutrului rețelei și toate pozițiile defectului în rețea. Pentru evaluarea acestui factor, trebuie ținut seama de mărimea reacțanței homopolare în raport cu reactanța directă pentru componentele rețelei considerate. Astfel:

- în cazul liniilor electrice  $X_h > X_d$ , în funcție de construcția liniei (aeriană cu sau fără conductoare de protecție, subterană), raportul acestora fiind de ordinul unităților;
- pentru transformatoare cu conexiunea înfășurărilor de tip Yd sau Yyd,  $X_h = X_d$ ;
- pentru transformatoare cu conexiunea înfășurărilor de tip Yz,  $X_h \ll X_d$ ;
- pentru transformatoare cu conexiunea înfășurărilor de tip Yy,  $X_h \gg X_d$ .

Dacă transformatorul T ar avea conexiune Yy, în schema homopolară apar reactanța acestuia ca și ale elementelor din amonte pe partea de IT. Dacă în acea zonă există un alt punct neutru legat la pământ atunci curenții homopolari pot circula, iar reactanța homopolară a transformatorului este apropiată de reactanța directă.

Dacă defectul apare pe partea înfășurării cu conexiune în triunghi a unui transformator, curenții homopolari nu pot circula prin această înfășurare, iar reactanța homopolară a transformatorului este infinită (nu mai apare în schemă).

Gama de valori posibile ale raportului  $\alpha = X_h/X_d$  poate fi împărțită în funcție de modul de tratare a neutrului rețelei astfel:

- pentru **neutrul izolat** ( $Z_N \rightarrow \infty$ ), în schema de secvență homopolară elementul principal rămâne capacitatea  $C_0$  față de pământ. Ca urmare reactanța capacitivă are semnul “-”, iar  $\alpha < 0$ . Valorile practic posibile ale lui  $\alpha$  (în modul) sunt mari, către limita din stânga a axei, fiind invers proporționale cu mărimea capacității  $C_0$ , respectiv cu lungimea totală a liniilor rețelei;

- pentru **neutrul legat direct la pământ** ( $Z_N = 0$ ), capacitatea  $C_0$  este șuntată de către impedanța transformatorului, iar  $\alpha$  are valori de ordinul câtorva unități (1..3). Dacă rețeaua conține multe transformatoare cu neutrul legat direct la pământ precum și linii scurte, sunt posibile și valori  $\alpha < 1$ ;

- pentru **neutrul legat la pământ prin impedanță redusă**,  $3 < \alpha < 10$ , fiind cu atât mai mare cu cât  $Z_N$  este mai mare;

- pentru **neutrul compensat (bobină de stingere)** mărimea factorului  $\alpha$  este cea mai mare, în valoare absolută, fiind invers proporțională cu abaterea de la acordarea perfectă a bobinei. Pentru supracompensare  $\alpha > 0$ , iar pentru subcompensare  $\alpha < 0$ .

Asupra valorii parametrului  $\alpha$  are influență și poziția defectului în rețea, respectiv distanța față de barele stației de transformare. Cu cât această distanță crește, se mărește contribuția liniei în reactanța echivalentă. Întrucât, pentru majoritatea liniilor electrice, reactanța homopolară este mai mare decât reactanța directă, valoarea parametrului  $\alpha$  crește cu cât defectul este mai îndepărtat de stația de transformare.

Curbele din fig. 4.4 arată că, în cazul neutrului izolat, nivelul supratensiunilor pe fazele sănătoase este cel mai ridicat. Zona corespunzătoare supratensiunii maxime,  $\alpha = -2$ , este prea puțin probabil să poată fi atinsă în rețelele existente astăzi, care au linii relativ scurte și surse de putere mare. Urmează, în ordinea descrescătoare a nivelului supratensiunilor temporare, neutrul compensat, neutrul tratat cu impedanța redusă și neutrul legat direct la pământ.

Rezistența defectului contribuie la reducerea mărimii supratensiunilor pe fazele sănătoase, mai ales în zona  $\alpha < 0$ . Datorită rezistențelor, neglijate în studiul precedent, factorul maxim de supratensiune este limitat chiar dacă se atinge tot condiția  $\alpha = -2$ . În zonele cu valori mari ale raportului  $\alpha$ , influența rezistenței defectului este nesemnificativă.



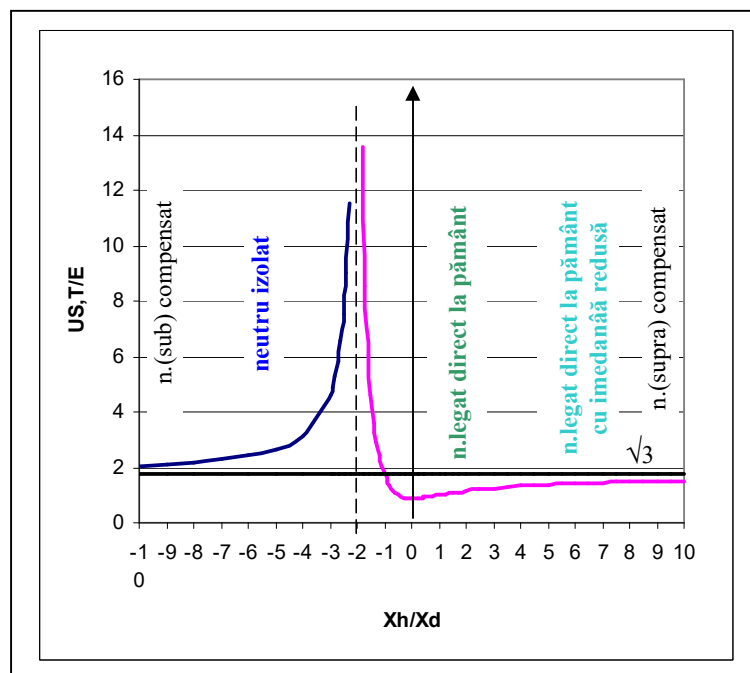


Fig. 4.4 Supratensiuni de regim staționar datorate defectului monofazat la pământ

#### 4.2.2 Supratensiuni în regim tranzitoriu de defect monofazat

Analiza regimului tranzitoriu de defect monofazat prezintă dificultăți pentru calculul clasic, folosind scheme echivalente și ecuațiile integro-diferențiale corespunzătoare, din cauza complexității schemelor rețelelor reale. Din acest motiv, se va lua în considerare o schemă simplificată până la limita la care fenomenele specifice acestui regim tranzitoriu nu sunt afectate în esența lor (fig.4.5). Această schemă corespunde destul de bine cazului defectului monofazat într-o rețea care conține o linie alimentată de la o sursă. Inductanțele  $L$  corespund transformatorului și sursei, iar  $L_N$  reprezintă elementul de tratare a neutrului. Nu sunt luate în considerare rezistențele componentelor schemei, iar defectul se modelează prin închiderea întrerupătorului I.

Evoluția regimului tranzitoriu este influențată de condițiile inițiale, respectiv de momentul producerii defectului (străpungerea sau contornarea izolației). Se va lua în considerare momentul cel mai probabil și anume atunci când tensiunea fază-pământ trece prin valoarea maximă pe faza defectă.

Dacă defectul are loc pe faza  $R$ , la momentul menționat, atunci valorile instantanee ale tensiunilor fază-pământ sunt

$$u_R = -U_m, \quad u_S = U_m/2, \quad u_T = U_m/2, \quad (4.13)$$

iar ale tensiunilor între faze

$$u_{SR} = u_{TR} = 3U_m/2. \quad (4.14)$$

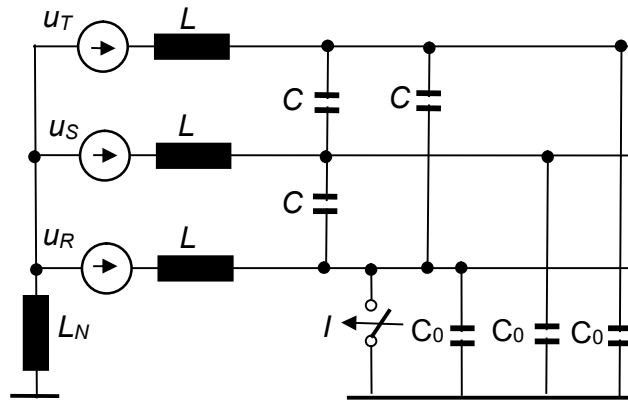


Fig.4.5 Schema echivalentă pentru regimul tranzitoriu de defect monofazat

Procesul tranzitoriu poate fi divizat în două etape.

**a) egalizarea tensiunilor pe capacitățile conectate în paralel**

Ținând seama de faptul că diferența de potențial dintre fazele **S** și **T** este nulă la momentul inițial, schema din figura 4.5 se transformă ca în figura 4.6,a) prin conectarea în paralel a capacităților fazelor **S** și **T** față de pământ și față de faza **R**. Capacitatea dintre fazele **S** și **T** este șuntată din același motiv. Prin apariția defectului (închiderea întrerupătorului **I**) cele două grupe de capacități ale fazelor sănătoase sunt conectate în paralel. Întrucât acestea sunt încărcate la tensiuni diferite, are loc redistribuirea sarcinilor între ele până la egalizarea tensiunilor la bornele grupării. Acest proces se petrece foarte rapid, instantaneu chiar, dacă se neglijează rezistențele conductoarelor și a defectului.

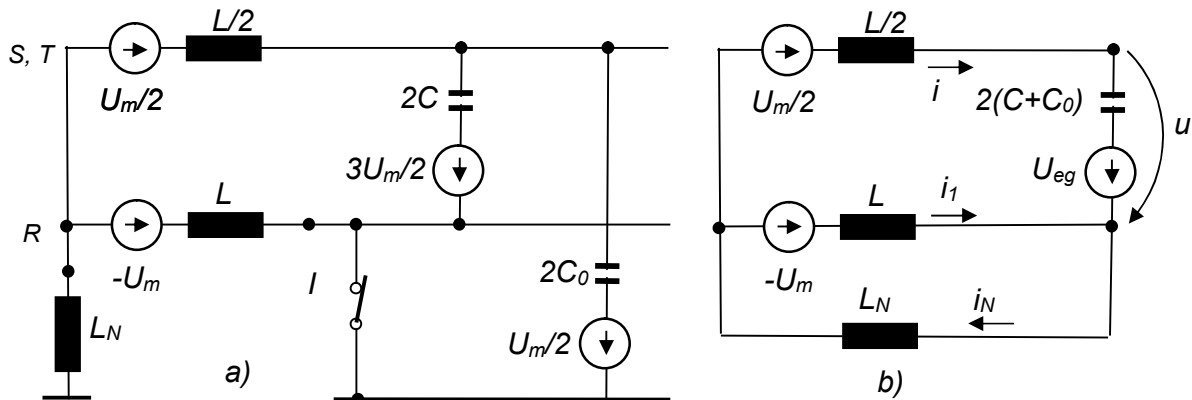


Fig.4.6 Etapele regimului tranzitoriu de defect monofazat

Rezultă:

$$U_{eg} = \frac{2C_0 \frac{U_m}{2} + 2C \frac{3U_m}{2}}{2C_0 + 2C} = \frac{U_m}{2} \frac{3C + C_0}{C + C_0} < \frac{3}{2} U_m. \quad (4.15)$$

**b) reîncărcarea capacităților de la sursă**

Diferența de potențial dintre faze fiind  $3U_m/2$ , iar  $U_{eg}$  fiind mai mică decât aceasta, urmează a doua fază a procesului tranzitoriu, în decursul căreia se reîncarcă capacitățile dintre fazele **R** și **S,T** de la sursă, până la atingerea valorii de regim permanent,  $3U_m/2$ . Acest proces se poate analiza cu ajutorul schemei din figura 4.6,b. Ecuațiile schemei se pot scrie în valori instantanee (4.16), iar prin transformare Laplace, în forma (4.17). Se urmărește obținerea expresiei tensiunii  $u$ , care apare pe fazele sănătoase față de pământ.

$$\begin{cases} \frac{U_m}{2} + U_m = \frac{L}{2} \frac{di}{dt} + u - L \frac{di_1}{dt}; & -U_m = L \frac{di_1}{dt} + L_N \frac{di_N}{dt} \\ u = U_{eg} + \frac{1}{2(C+C_0)} \int i dt & i_N = i + i_1 \end{cases} \quad (4.16)$$

$$\begin{cases} \frac{3U_m}{2s} = \frac{L}{2} sI + U - LsI_1; & -\frac{U_m}{s} = LsI_1 + L_N sI_N \\ U = \frac{U_{eg}}{s} + \frac{I}{2s(C+C_0)}; & I_N = I + I_1 \end{cases} \quad (4.17)$$

Din sistemul (4.17), prin eliminări succesive, rezultă soluția, în domeniul operational,

$$U = \frac{U_m}{2L(C+C_0)} \frac{s^2 + \omega_0^2}{s(s^2 + \omega_1^2)}, \quad (4.18)$$

$$\text{în care } \omega_1^2 = \frac{L + L_N}{L(L + 3L_N)(C + C_0)}, \omega_0^2 = \frac{1}{L(3C + C_0)}. \quad (4.19)$$

Prin transformare inversă, din (4.18) se obține componenta liberă a tensiunii pe fazele sănătoase în regim tranzitoriu de defect monofazat

$$u_I(t) = U_m \frac{LC - L_N C_0}{(L + L_N)(C + C_0)} \cos \omega_1 t. \quad (4.20)$$

Această expresie se poate particulariza pentru diferite moduri de tratare a neutrului, astfel:

- pentru neutrul legat la pământ direct, ( $L_N = 0$ )

$$u_I(t) = U_m \frac{C}{C + C_0} \cos \omega_{10} t, \quad \omega_{10}^2 = \frac{1}{L(C + C_0)}, \quad (4.21)$$

- pentru neutrul izolat ( $L_N \rightarrow \infty$ ) sau compensat ( $L_N \gg L$ )

$$u_I(t) = U_m \frac{C_0}{C + C_0} \cos \omega_{11} t, \quad \omega_{11}^2 = \frac{1}{3L(C + C_0)}. \quad (4.22)$$

Componenta de regim forțat a tensiunii pe fazele sănătoase este cunoscută de la analiza regimului permanent de defect monofazat:

- pentru neutru legat la pământ,  $u_f(t) = U_m \cos \omega t$ ,
- pentru neutru izolat sau compensat,  $u_f(t) = \sqrt{3} U_m \cos \omega t$ .

Pentru ambele cazuri, frecvența oscilațiilor de regim liber este considerabil mai mare decât frecvența industrială, încât se poate admite că, în momentul în care tensiunea sursei atinge, pe fazele sănătoase, valoarea de vârf, același lucru se întâmplă și pentru oscilația de regim liber. Ca urmare, valoarea maximă a tensiunii se va obține ca sumă a amplitudinilor oscilațiilor de regim liber și de regim forțat. Rezultă:

- **pentru neutru legat la pământ**

$$U_{\max} = U_m \left( 1 + \frac{C}{C + C_0} \right), \quad (4.23)$$

- **pentru neutru izolat sau compensat**

$$U_{\max} = U_m \left( \sqrt{3} + \frac{C_0}{C + C_0} \right). \quad (4.24)$$

Cele mai frecvent întâlnite valori, în cazurile practice, pentru raportul  $C/C_0$  sunt cuprinse între 1/3 și 1/4. Factorul de supratensiune tranzitorie,  $U_{\max}/U_m$ , rezultă a fi:

- în rețelele cu neutru direct legat la pământ 1,2 - 1,25.
- în rețelele cu neutru izolat sau compensat 2,48 - 2,53.

Dacă este vorba de o rețea subterană echipată cu cabluri cu câmp radial, se poate considera  $C \ll C_0$ , astfel că factorul de supratensiune rezultă a fi 1 în cazul neutrilor legat direct la pământ și 2,73 în cazul neutrilor izolat sau compensat.

Analiza efectuată mai sus este valabilă în cazul unei rețele simple, pentru o punere la pământ netă, rezistența defectului fiind neglijată. Modalitatea cea mai frecventă de producere a acestor defecte este conturnarea izolației externe sub influența supratensiunilor atmosferice și/sau a poluării. În asemenea cazuri, apariția și modul de evoluție al arcului electric de conturnare influențează în mare măsură nivelul supratensiunilor de regim tranzitoriu.

Astfel, dacă intensitatea curentului prin arcul electric de defect este suficient de mică, acesta se poate stinge la trecerea prin zero a curentului. Ca urmare tensiunea pe faza defectă revine la valoarea normală printr-un proces tranzitoriu a cărui evoluție diferă în funcție de modul de tratare a neutrilor. În cazul neutrilor izolat, revenirea se face cu supratensiuni care pot determina reaprinderea arcului de defect. Regimul tranzitoriu de punere la pământ se reia, dar cu valori inițiale schimbate pentru tensiunile fazelor rețelei și care depind de momentul reaprinderii. Un asemenea proces de “reaprireri repetate” poate fi însoțit de supratensiuni mult mai mari pe fazele sănătoase decât în cazul defectului metalic. Aceste fenomene fac ca neutru izolat să nu fie recomandat în practică.

În cazul neutrilor compensat, de asemenea, intensitatea curentului de defect este mică, dar revenirea tensiunii pe faza defectă are loc monoton crescător, ceea ce reduce mult probabilitatea de re-aprindere a arcului electric.

### 4.3. Rețele compensate

Conectarea, între punctul neutru al rețelei și pământ, a unei inductanțe de mărime corespunzătoare poate produce auto-eliminarea defectelor monofazate, care

apar prin arc electric. Din acest motiv echipamentul respectiv este cunoscut sub numele de **bobină de stingere** sau, după numele celui care a propus primul această soluție, bobină Petersen.

Pentru defectele prin contact galvanic, acțiunea inductanței, de micșorare a curentului de defect, are ca rezultat numai limitarea potentialului prizei de pământ prin care circulă acest curent, fără ca defectul să poată fi eliminat.

#### 4.3.1 Compensarea curentului capacitiv

Conform fig.4.7, datorită prezenței inductanței dintre punctul neutru și pământ, pe faza defectă până la locul defectului, prin neutru și prin locul defectului circulă un curent  $I_N$ , defazat inductiv față de tensiunea pe neutru, deci în opoziție de fază față de curentul capacitiv de punere la pământ (dacă se neglijează componentele active). Ca urmare, dacă cei doi curenți au aceeași intensitate, curentul de defect se anulează (de fapt se reduce la suma componentelor active), ceea ce asigură eliminarea defectelor prin arc electric și revenirea la regimul normal de funcționare.

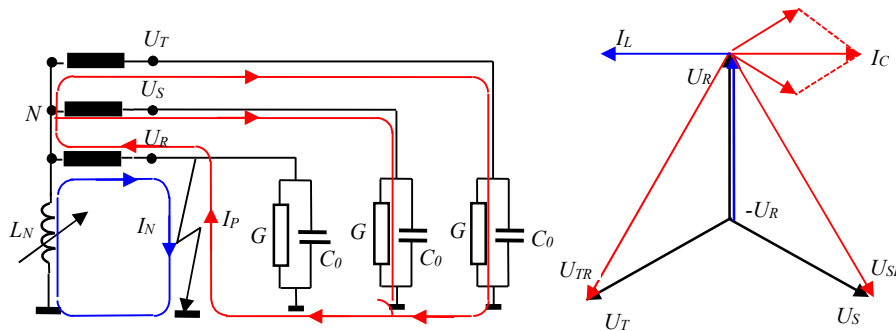


Fig.4.7 - Compensarea curentului capacitiv de punere la pământ

Curentul inductiv este

$$\underline{I}_N = \frac{U_R}{R_N + j\omega L_N} = U_R \left[ \frac{R_N}{(\omega L_N)^2} - j \frac{1}{\omega L_N} \right], \quad (4.25)$$

iar curentul capacitiv de punere la pământ este

$$\underline{I}_p = (\underline{U}_S - \underline{U}_R) \underline{Y}_S + (\underline{U}_T - \underline{U}_R) \underline{Y}_T.$$

Notând admitanța fază-pământ a rețelei cu  $\underline{Y}_0 = G_0 + j\omega C_0$ ,

$$\underline{I}_p = (a^2 U_R - U_R) \underline{Y}_0 + (a U_R - U_R) \underline{Y}_0 = -3U_R (G_0 + j\omega C_0).$$

Curentul rezidual devine:

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_N - \underline{I}_p = U_R \left[ \left( \frac{R_N}{(\omega L_N)^2} + 3G_0 \right) + j \left( 3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L_N} \right) \right]. \quad (4.26)$$

Notând componentele acestui curent :

$$I_C = 3\omega C_0 U_R, \quad I_a = U_R \left[ \frac{R_N}{(\omega L_N)^2} + 3G_0 \right], \quad I_L = \frac{U_R}{\omega L_N},$$

rezultă expresia  $I_0 = I_a + j(I_C - I_L)$  (4.27)

sau

$$I_0 = I_C [d + j(1 - q)], \quad (4.28)$$

unde s-au facut notațiile:

- factorul de amortizare al rețelei  $d = \frac{I_a}{I_C} = \frac{\frac{R_N}{(\omega L_N)^2} + 3G_0}{3\omega C_0}$ , (4.29)

- gradul de acordare al bobinei de stingere  $q = \frac{I_L}{I_C} = \frac{1}{3\omega^2 L_N C_0}$ . (4.30)

Prin reglarea mărimii inductanței, se poate atinge situația de compensare totală a curentului capacitiv,  $q = 1$ , care corespunde minimului curentului de defect. Acest curent minim reprezintă componenta activă datorată conductanței izolației și pierderilor active în bobina de stingere, contribuția principală revenind bobinei de stingere.

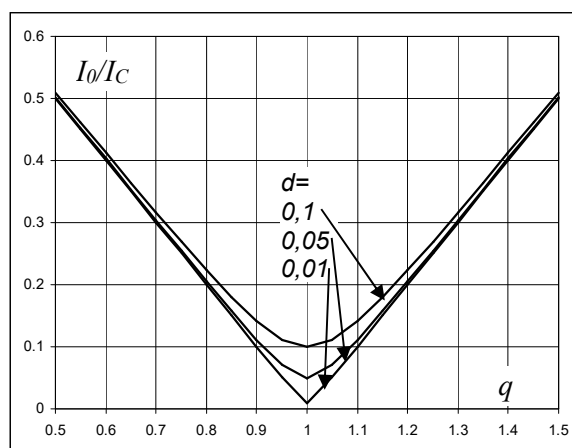


Fig.4.8 – Curentul rezidual în rețeaua compensată

Compensarea perfectă este cunoscută și sub numele de acord la rezonanță. Denumirea provine din faptul că această condiție corespunde stării de rezonanță în circuitul RLC paralel, format din inductanța bobinei de stingere ( $L_N$ ) și capacitățile față de pământ ale fazelor rețelei ( $3C_0$ ).

Situația în care  $q < 1$  se numește **subcompensare**, iar aceea pentru care  $q > 1$ , se numește **supracompensare**.

### 4.3.2. Regimul tranzitoriu de stingere a arcului electric de defect

Dacă, prin acțiunea bobinei de stingere, arcul electric a fost stins, începe un regim tranzitoriu de revenire la normal a tensiunii pe faza defectă. Analiza acestui proces tranzitoriu se va realiza folosind o schemă echivalentă cât mai simplă (fig.4.9), asemănătoare cu aceea din figura 4.6,a), dar în care condițiile inițiale corespund regimului de defect monofazat pe faza **R**, la momentul când tensiunile electromotoare ale sursei au valorile

$$u_R = -U_m, \quad u_S = U_m/2, \quad u_T = U_m/2.$$

Înteruperea arcului electric de punere la pământ este simulată prin deschiderea întrerupătorului **I**. Calculul urmărește determinarea expresiei tensiunii  $u(t)$ , a fazei **R** față de pământ. Sunt valabile următoarele ecuații:

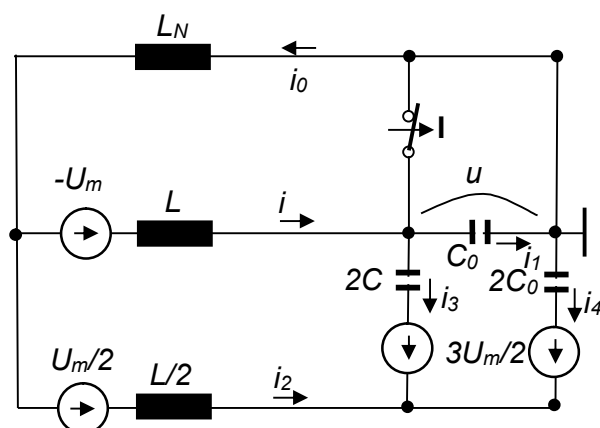


Fig.4.9-Schema echivalentă la stingerea arcului de punere la pământ

$$\begin{cases} -U_m = L \frac{di}{dt} + L_N \frac{di_0}{dt} + u \\ \frac{U_m}{2} - \frac{3U_m}{2} = \frac{L}{2} \frac{di_2}{dt} - \frac{1}{2C_0} \int i_4 dt + L_N \frac{di_0}{dt} \\ 0 = \frac{1}{2C} \int i_3 dt - u - \frac{1}{2C_0} \int i_4 dt \\ i = i_1 + i_3, i_2 = i_3 + i_4, i_1 = i_0 + i_4, i_1 = C_0 \frac{du}{dt} \end{cases} \quad (4.31)$$

Rezolvarea acestui sistem (de exemplu folosind calculul operațional), permite obținerea soluției de regim liber a procesului tranzitoriu de revenire:

$$u_1(t) = U_m \cos \omega_0 t, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_0(L + 3L_N)}}. \quad (4.32)$$

Deoarece în schema din fig. 4.9 nu sunt luate în considerare rezistențele elementelor componente, iar regimul liber trebuie să fie amortizat, se va multiplica soluția (4.32) cu un factor corespunzător atenuării. Soluția de regim forțat este, conformă condiției inițiale pentru tensiunea fazei **R**,

$$u_f = -U_m \cos \omega t,$$

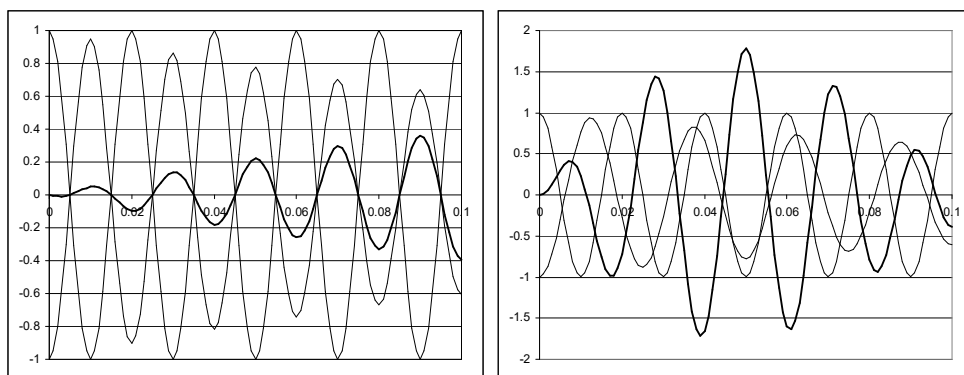
astfel că expresia tensiunii de revenire pe faza **R** este

$$U_{rev}(t) = -U_m(\cos\omega t - e^{-dt}\cos\omega_0 t). \quad (4.33)$$

Având în vedere că  $L \ll L_N$ , expresia pulsației de regim liber se poate scrie

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{3L_N C_0}} = \omega\sqrt{q}. \quad (4.34)$$

Pentru  $q = 1$  rezultă  $\omega = \omega_0$ , ceea ce este echivalent cu rezonanța.



a)  $q = 1$

b)  $q = 1,3$

**Fig. 4.10** - Revenirea tensiunii pe faza defectă

În cazul acordării perfecte a bobinei de stingere ( $q = 1$ ), tensiunea revine la valoarea normală, pe faza defectă, cu atât mai lent cu cât factorul de amortizare  $d$  este mai mic, fără apariția de supratensiuni. Dacă însă bobina este dezacordată, indiferent de sens, regimul de revenire este însoțit de supratensiuni atât pe fazele sănătoase cât și pe aceea cu defect.

În figura 4.10 sunt reprezentate formele tensiunii pe faza defectă după stingerea unui arc electric, în condițiile bobinei de stingere corect acordată (**a**) și dezacordată cu 25% (**b**). În această ultimă situație se observă prezența unei supratensiuni ceea ce poate determina reaprinderea arcului electric la locul defectului dacă restabilirea rigidității izolației nu este destul de rapidă (de exemplu, în cazul străpungerii izolației cablurilor), anulând astfel eficacitatea bobinei de stingere.

### 4.3.3. Tensiunea de deplasare a neutrului

În regim normal de funcționare a rețelei compensate, între punctul neutru al acesteia și pământ există o diferență de potențial, numită tensiune de deplasare a neutrului. Mărima acestei tensiuni se poate calcula cu expresia generală:

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{U}_R \underline{Y}_R + \underline{U}_S \underline{Y}_S + \underline{U}_T \underline{Y}_T}{\underline{Y}_R + \underline{Y}_S + \underline{Y}_T + \underline{Y}_N}. \quad (4.35)$$

Dacă sistemul trifazat de tensiuni se consideră echilibrat:

$$\underline{U}_R = U_f, \underline{U}_S = a^2 U_f, \underline{U}_T = a U_f,$$

iar admitanțele fazelor rețelei sunt egale

$$\underline{Y}_R = \underline{Y}_S = \underline{Y}_T = G_0 + j\omega C_0,$$



atunci tensiunea de deplasare a neutrului este nulă. În realitate dacă sistemul trifazat de tensiuni poate fi considerat echilibrat, admitanțele fază-pământ nu sunt niciodată egale mai ales datorită deosebirilor în mărimea capacităților  $C_0$  pe fazele liniilor. Considerând cazul unei nesimetrii monofazate de capacități

$$\underline{Y}_R = G_0 + j\omega m C_0, \underline{Y}_S = \underline{Y}_T = G_0 + j\omega C_0 \quad (4.36)$$

unde  $C_0$  este capacitatea fază - pământ a rețelei, iar

$$\underline{Y}_N = \frac{1}{R_N + j\omega L_N} = \frac{R_N}{(\omega L_N)^2} - j \frac{1}{\omega L_N}, \quad (4.37)$$

se obține

$$\underline{U}_N = U_f \frac{j\omega C_0(m-1)}{3G_0 + \frac{R_N}{(\omega L_N)^2} + j\omega C_0 \left( 2 + m - \frac{1}{\omega^2 L_N C_0} \right)}. \quad (4.38)$$

După simplificări și folosirea notațiilor pentru factorul de amortizare  $d$  și gradul de acordare  $q$ , se obține forma

$$\underline{U}_N = U_f \frac{j^{(m-1)}}{[3d + j(2+m-3q)]}. \quad (4.39)$$

Rezultă ca tensiunea de deplasare a neutrului este o mărime complexă, care poate fi caracterizată prin modul și fază, a căror mărime depinde de gradul de dezechilibru al admitanțelor fază-pământ dar și de gradul de acordare a bobinei de stingere:

$$U_N = U_f \frac{m-1}{\sqrt{(3d)^2 + (2+m-3q)^2}}, \quad \varphi_N = 90 - \arctg \frac{2+m-3q}{3d}. \quad (4.40)$$

În figura 4.11 sunt reprezentate funcțiile  $U_N(q)$  și  $\varphi_N(q)$  pentru cazul capacității fază-pământ diferită pe faza  $R$  față de celelalte două și pentru valori ale parametrilor  $m$  și  $d$ , specifice liniilor aeriene și liniilor subterane, astfel:

- pentru linii aeriene:  $m = 0,95$ ,  $d = 0,01$ ;
- pentru linii subterane  $m = 0,99$ ,  $d = 0,05$ .

Din examinarea acestor curbe rezultă concluzii pentru rețelele compensate:

- valoarea maximă a modulului tensiunii de deplasare a neutrului se atinge pentru acord la rezonanță;
- mărimea acestei tensiuni este direct proporțională cu gradul de dezechilibru al capacităților fază-pământ și invers proporțională cu coeficientul de amortizare (datorat pierderilor active în circuitul echivalent de secvență homopolară al rețelei);
- faza tensiunii de deplasare a neutrului, pentru acord la rezonanță, are o valoare fixă indiferent de factorul de amortizare, dar care depinde puțin de gradul de dezechilibru al capacităților;
- în funcție de gradul de acordare al bobinei, faza tensiunii de deplasare a neutrului variază față de valoarea de la acord perfect cu maximum  $\pm\pi/2$ ;

Forma dependenței tensiunii de deplasare a neutrului (în modul și fază) de gradul de acordare a bobinei de stingere permite realizarea acordării acesteia în timpul funcționării normale a rețelei, astfel că în momentul producerii unui defect monofazat

bobina să fie pregătită pentru a asigura maximul de eficacitate a stingerii arcului electric.

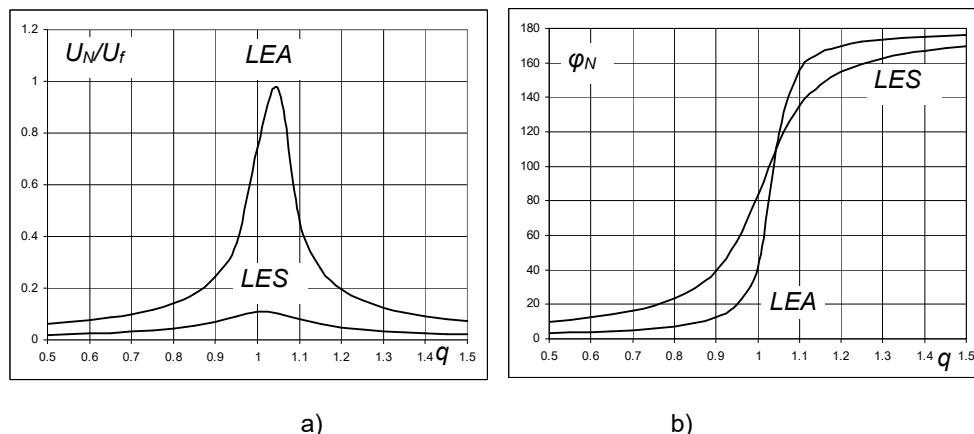


Fig.4.11 - Modulul (a) și faza (b) tensiunii de deplasare a neutrului în funcție de gradul de acordare

Tensiunea de deplasare a neutrului poate atinge valori destul de mari pentru a fi inacceptabile mai ales în cazul rețelelor aeriene. O primă consecință este modificarea tensiunilor fază-pământ, pe unele faze acestea devenind prea mari pentru a putea fi suportate de către izolație în regim permanent. De exemplu, pentru acord la rezonanță, considerând parametrii numerici de mai sus, tensiunile de fază (în u.r.) rezultă:

- pentru rețeaua aeriană  $U_R = 1,943$ ,  $U_S = 2,580$ ,  $U_T = 0,943$ ;
- pentru rețeaua subterană  $U_R = 1,002$ ,  $U_S = 1,057$ ,  $U_T = 0,943$ .

Altă consecință este posibilitatea semnalizărilor false a defectelor monofazate care, în cazul rezistenței de defect suficient de mari, produc tensiune homopolară la fel de mare ca și aceea datorată acordării perfecte a bobinei de stingere.

Se mai poate menționa și o consecință din domeniul compatibilității electromagnetice și anume influența asupra liniilor de telecomunicații învecinate, datorită existenței în regim permanent a unei tensiuni homopolare importante și a unui curent homopolar corespunzător.

Ca urmare, se recomandă reglarea la supracompensare a bobinelor de stingere în măsură suficientă pentru a menține tensiunea de deplasare la valori acceptabile. Se observă însă, că această recomandare trebuie aplicată numai rețelelor aeriene sau predominant aeriene.

#### 4.3.4. Construcția, instalarea și exploatarea bobinelor de stingere

##### 4.3.4.1. Tipuri constructive de bobine de stingere

Caracteristica constructivă principală a acestor echipamente este posibilitatea de reglare a inductanței într-o gamă de valori cât mai largă pentru ca bobina să poată fi acordată corect în situații diferite privind extinderea rețelei. Există mai multe posibilități tehnice de realizare a unei inductanțe reglabile, dintre care s-au aplicat practic următoarele:

**a) înfășurare cu prize fixe**, comutabile numai după scoaterea de sub tensiune a bobinei de stingere. Această soluție are dezavantaje pentru exploatare atât datorită reglării în trepte relativ mari cât și datorită duratei manevrelor de scoatere de sub tensiune la fiecare reglare, astfel că în prezent este abandonată. Se remarcă însă

reactualizarea într-o forma evoluată a reglării în trepte fixe, sub forma mai multor bobine fără prize, cu inductanțe diferite, alese pentru a putea asigura o acordare convenabilă prin cuplarea lor automată cu ajutorul unor contactoare de înaltă tensiune, cu camere de stingere în vid. Comanda acestor contactoare este asigurată de un echipament de reglare automată. Compensarea brută a curentului capacitiv este completată cu sisteme de protecție la defecte monofazate deosebit de sensibile, astfel încât pot sesiza defecte de tip punere la pământ (defecte însoțite de curenți mici prin locul ounerii la pământ);

**b) înfășurare fixă așezată pe un miez magnetic de construcție specială, având posibilitatea de reglare a reluctanței** prin deplasarea unei piese (plonjor). Această variantă, în prezent cea mai răspândită, prezintă avantajul unei game de reglare întinse (de ex. 10-50 A sau 10-120 A, utilizate frecvent în România), menținând funcționarea pe zona liniară a caracteristicii de magnetizare. Deplasarea plonjorului poate fi acționată cu un motor electric cu sens de rotație reversibil, comandat de la distanță, în timp ce bobina se află sub tensiune. Comanda funcționării motorului poate fi realizată manual sau automat.

**c) înfășurare fixă așezată pe un miez magnetic de asemenea fix, iar reglarea inductanței se realizează prin modificarea permeabilității magnetice a miezului.** Aceasta se poate obține folosind o înfășurare suplimentară alimentată cu tensiune continuă variabilă (înfășurare de premagnetizare). Dezavantajul unei asemenea soluții este posibilitatea de funcționare pe porțiunea neliniară a caracteristicii de magnetizare, deci introducerea unor armonici în curentul bobinei ceea ce poate reduce eficacitatea compensării. Combinarea reglării statice cu înfășurarea cu prize reglabile permite o exploatare convenabilă în condițiile unei construcții fără piese în mișcare, deci mult mai fiabilă.

Varianta constructivă preferată, indiferent de modul de reglare a inductanței, este: înfășurare cu miez de fier, în carcasă metalică cu izolație internă tip hârtie-ulei și izolator de trecere din porțelan.

#### 4.3.4.2. Dimensionare si instalare

Dat fiind rolul de compensare a curentului capacitiv, principalii parametri de proiectare a bobinelor de stingere sunt tensiunea nominală și curentul nominal (mai rar se specifică puterea). Având în vedere că, pe durata exploatării, configurația rețelelor se modifică destul de frecvent datorită manevrelor operative și că există un proces de dezvoltare prin extinderea unor linii și apariția altora noi, bobina de stingere trebuie să asigure compensarea optimă a curentului capacitiv în aceste condiții. Din acest motiv se instalează bobine cu rezervă de reglare pentru posibilitatea funcționării la supracompensare (max. 15%) și potrivită prognozei de dezvoltare a rețelei.

Bobinele de stingere se instalează în stațiile de transformare, folosind punctele neutre ale transformatoarelor. Dacă înfășurarea care alimentează rețeaua compensată are conexiune în triunghi, punctul neutru trebuie creat în mod artificial cu ajutorul unui transformator trifazat sau a unei inductanțe trifazate.

Transformatorul la al cărui punct neutru se conectează bobina de stingere trebuie să aibă reactanța homopolară cât mai redusă. În felul acesta, în schema echivalentă de secvență homopolară, partea din tensiunea homopolară care se repartizează pe reactanța transformatorului va fi redusă, iar bobina de stingere va primi practic întreaga tensiune a fazei defecte.

Reactanța homopolară a transformatoarelor depinde esențial de grupa de conexiuni a înfășurărilor. Deoarece conexiunea în **Z** prezintă cea mai redusă valoare a

reactanței homopolare, aceasta este preferată pentru construcțiile de creare a neutrului artificial.

#### 4.3.4.3. Exploatarea bobinelor de stingere

O cerință principală în timpul funcționării rețelelor compensate este menținerea permanentă a stării optime de acordare a bobinei de stingere, care este un compromis între compensarea cât mai aproape de rezonanță a curentului capacitiv și limitarea tensiunii de deplasare a neutrului.

Alegerea gradului de acordare optim depinde de structura fiecărei rețele:

- **supracompensare de cel mult 10-15% pentru rețele aeriene sau mixte, dar preponderent aeriene.** O astfel de abatere de la compensarea perfectă nu afectează hotărâtor stingerea arcului de defect și menține tensiunea de deplasare a neutrului în limite acceptabile. Opțiunea pentru supracompensare provine din necesitatea evitării ajungerii la acord perfect în cazul întreruperii unei faze pe o linie, dar mai ales din faptul că supratensiunile tranzitorii și permanente în caz de defect monofazat sunt mai reduse în cazul supracompensării.

- **compensare perfectă pentru rețele subterane sau mixte, dar preponderent subterane.** Ponderea mare a rețelei subterane limitează tensiunea de deplasare a neutrului în cazul acordării la rezonanță, iar stingerea defectului din izolația solidă a cablurilor și accesoriilor acestora, are șanse de reușită numai dacă se reduce la minim curentul de defect și procesul de revenire este cât mai lent.

Reglarea propriu-zisă a bobinelor de stingere se poate realiza în timpul funcționării normale a rețelei. Primul mod de reglare este cel mai folosit, având avantajul pregătirii bobinei pentru funcționare corectă la apariția defectului monofazat și nefiind necesară o viteză de reglare mare. Informațiile necesare reglării bobinei de stingere pot fi obținute, în principal:

- prin cunoașterea, pentru orice schemă operativă a rețelei, a curentului capacitiv a acesteia. Asemenea informații sunt dificil de obținut și folosit în timp util de către personalul de exploatare;

- prin măsurarea tensiunii de deplasare a neutrului și reglarea bobinei în sensul atingerii valorii maxime urmată de supracompensare, dacă este cazul.

Importanța reglării corecte în permanență face necesară recurgerea la automatizarea acordării bobinei. În acest scop se pot folosi sisteme de reglare în buclă închisă (cu reacție negativă), care folosesc ca mărime de intrare fie modulul tensiunii de deplasare a neutrului fie faza acesteia. Examinarea curbelor de variație a tensiunii de deplasare a neutrului, în modul și fază, din figura 4.11, permite deducerea principiilor de reglare posibile:

- **reglare de tip extremal** dacă se urmărește modulul tensiunii de deplasare. Faptul că, aceeași mărime a tensiunii de deplasare corespunde unor grade de acordare diferite situate în zonele de subcompensare și respectiv supracompensare, face necesară găsirea mai întâi a sensului de reglare și apoi efectuarea reglării propriu zise.

- **reglare de tip prescriere** dacă se urmărește faza tensiunii de deplasare. În acest caz, sensul abaterii fazei tensiunii de deplasare în raport cu punctul de funcționare prescris conține și informația referitoare la sensul necesar al reglării.

## 4. 4. Rețele cu neutrul legat la pământ

### 4.4.1. Neutrul legat direct la pământ

#### 4.4.1.1. Curentul de defect monofazat

Curentul de defect monofazat este format, în acest caz, prin însumarea curentului capacitiv al rețelei și a curentului de scurtcircuit monofazat. A doua componentă predominantă, astfel încât contribuția curentului capacitiv se poate neglija.

Folosind metoda componentelor simetrice se obține, pentru curentul de defect monofazat, expresia

$$I_{k1} = \frac{3E_e}{X_d + X_i + X_h} = \frac{3E_e}{2X_d + X_h}, \quad (4.41)$$

în timp ce pentru curentul de scurtcircuit trifazat, relația de calcul este

$$I_{k3} = \frac{E_e}{X_d}. \quad (4.42)$$

Raportul celor doi curenți

$$\frac{I_{k1}}{I_{k3}} = \frac{3X_d}{2X_d + X_h} = \frac{3}{2 + \alpha}, \quad (\alpha = X_h/X_d) \quad (4.43)$$

poate fi folosit pentru evaluarea comparativă a consecințelor legării directe a neutrlui la pământ asupra funcționării rețelei în regim de defect monofazat.

Dacă  $X_h = X_d$  și considerând  $X_d = X_i$ , ceea ce este acceptabil, rezultă egalitatea dintre curenții de scurtcircuit mono- și trifazat. Dată fiind ponderea substanțial mai mare a defectelor monofazate, o asemenea situație ar însemna o solicitare termică, electrodinamică și mecanică foarte grea pentru întrerupătoare, ceea ce conduce la cheltuieli de întreținere mari.

Condiția menționată se poate atinge numai în cazul unei rețele dense, cu linii relativ scurte, cu multe stații de transformare având toate punctele neutre ale transformatoarelor legate direct la pământ. Reducerea intensității curentului de defect monofazat necesită ca  $X_h > X_d$ , ceea ce se poate obține prin izolarea unora dintre punctele neutre ale rețelei interconectate, restul rămânând legate la pământ. În acest scop, punctele neutre ale transformatoarelor sunt uneori legate la pământ prin intermediul unui separator având în paralel și un descărcător (pentru protecția izolației neutrlui), astfel încât neutrul să poată fi izolat față de pământ, la nevoie.

În toate cazurile însă, mărimea curentului de defect monofazat este mult mai mare decât curentul de sarcină, astfel încât defectul este numit scurtcircuit, iar protecțiile pot deconecta rapid și selectiv linia sau echipamentul afectat.

#### 4.4.1.2. Supratensiunile pe fazele sănătoase

Examinând graficul supratensiunilor de regim permanent în funcție de raportul  $X_h/X_d$ , se observă că factorul de supratensiune variază între limite relativ largi. Mărimea acestor supratensiuni influențează în mod direct alegerea descărcătoarelor cu rezistență variabilă, în privința parametrului "tensiunea maximă admisibilă pe descărcător". Alegerea descărcătoarelor în mod acoperitor, pentru valoarea maximă a

factorului de supratensiune temporară nu este convenabilă deoarece și nivelul de protecție rezultă mai mare, iar izolația va fi mai scumpă.

În scopul reducerii costului izolației, s-a adoptat o împărțire în două categorii a rețelelor în funcție de nivelul acestor supratensiuni. Se folosește, în acest scop, **factorul de legare la pământ,  $k_p$** , care reprezintă raportul dintre tensiunea fază-pământ pe fazele sănătoase în regim de defect monofazat și tensiunea fază-pământ în regim normal de funcționare al rețelei, în același loc din rețea.

Se consideră că rețeaua este:

- **efectiv legată la pământ** dacă  $k_p < 1,4$  și
- **neefectiv legată la pământ** dacă  $k_p > 1,4$ .

Corelarea valorii acestei limite cu mărimea raportului  $X_h/X_d$ , considerând și prezența rezistențelor, conduce aproximativ la  $X_h/X_d = 3$ . Pentru această valoare, raportul  $I_{k1}/I_{k3} = 0,6$ .

Având în vedere valorile reduse ale reactanței echivalente homopolare în cazul neutrului legat direct la pământ, raportul  $X_h/X_d$ , are valori mici, ( $k < 3$ ), astfel că acest tip de rețea poate fi considerat ca efectiv legată la pământ. Corespunzător, supratensiunile pe fazele sănătoase au valorile cele mai reduse; factorul de supratensiune nu depășește 1,4 u.r.

#### 4.4.2. Neutrul legat la pământ prin impedanță redusă

Între punctul neutru și pământ se conectează o impedanță (rezistență sau reactanță inductivă) de mărime fixă, dimensionată astfel încât să limiteze intensitatea curentului de scurtcircuit monofazat la o valoare maximă admisă și care să satisfacă simultan două cerințe:

- să mențină în limite admisibile efectele termice și electrodinamice produse de curentul de scurtcircuit în rețea;
- să permită utilizarea unor protecții cât mai simple și sigure pentru deconectarea selectivă a liniei sau echipamentului în care s-a produs defectul monofazat.

Prima cerință are ca scop reducerea solicitărilor termice și electro-dinamice a căilor de curent parcurse de curentul de defect precum și limitarea potențialelor pe prizele de pământ ale stâlpilor, stațiilor și posturilor de transformare; se cere deci o valoare cât mai redusă a curentului de scurtcircuit monofazat.

A doua cerință conduce la alegerea unei valori cât mai mari a curentului de defect, pentru a simplifica schemele de protecție prin rele.

Compromisul între aceste două tendințe a condus la următoarea alegere a valorii maxime a curentului de scurtcircuit monofazat:

- 300 A în rețelele aeriene sau mixte, dar predominant aeriene;
- 1000 A în rețelele pur sau predominant subterane.

Corespunzător acestor valori, mărimea impedanței de tratare a neutrului va trebui să fie, aproximativ:

- 0,58  $\Omega/kV$  pentru rețele subterane;
- 1,92  $\Omega/kV$  pentru rețele aeriene și mixte.

Mărimea impedanței rezultate fiind mult mai mică decât aceea a unei bobine de stingere, s-a adoptat termenul de **impedanță redusă** pentru impedanța de legare a neutrului la pământ.

În asemenea condiții se obține, în cele mai multe cazuri,  $X_n/X_d > 3$ , astfel că factorul de legare la pământ rezultă  $k_p > 1,4$ . Așadar, aceste rețele sunt neefectiv legate la pământ.

Soluția de tratare a neutrului cu impedanță redusă este folosită în exclusivitate în rețelele de medie tensiune, mai ales în țări europene.

În unele țări (Franța, Spania) această soluție a fost aplicată chiar de la începutul dezvoltării rețelelor de medie tensiune, datorită avantajelor privind realizarea și eficacitatea protecției prin relee împotriva defectelor monofazate.

În alte țări, în care soluția tradițională și predominantă de tratare a neutrului a fost bobina de stingere, s-a trecut la tratarea cu impedanță redusă în rețelele subterane de întindere mare, în care eficiența bobinei de stingere este redusă. Cauzele acestei reduceri de eficacitate sunt:

- mărirea curentului capacitiv deosebit de ridicată, astfel că puterile și costul bobinelor de stingere instalate devin prea mari. Divizarea rețelei în mai multe rețele de dimensiuni mai mici este, de asemenea, costisitoare;

- ponderea componentei active în curentul de defect monofazat fiind mai mare decât la rețele aeriene, rezultă curent rezidual destul de mare pentru a nu permite autoeliminarea defectelor monofazate, chiar în situația acordării la rezonanță a bobinei de stingere;

- în rețelele subterane, urbane și industriale, sunt prezente adesea armonici superioare în curba tensiunilor de fază, datorită consumatorilor deformanți. Aceste armonici se regăsesc și în curentul de defect monofazat, dar nu pot fi compensate de către bobina de stingere. Ele contribuie la mărirea curentului rezidual;

- defectele care se produc în izolația internă (materiale în stare solidă), nu pot fi eliminate definitiv cu certitudine, deoarece această izolație este neauto-regeneratoare. Astfel este posibilă instalarea regimului de ardere intermitentă a arcului electric, însoțit de supratensiuni periculoase, care pot produce străpungerea izolației uneia dintre fazele sănătoase într-un alt punct slab, oriunde în aceeași rețea;

- datorită distanțelor mici dintre faze în cazul cablurilor, se produce cu mare probabilitate extinderea defectului la celelalte faze, deci apariția unui număr mult mai mare de defecte polifazate și deteriorarea importantă a cablului afectat.

Aceste dezavantaje dispar în cazul tratării cu impedanță redusă deoarece:

- mărirea rețelei nu are influență importantă asupra dimensionării impedanței de tratare a neutrului;

- curentul de defect monofazat este suficient de mare pentru a asigura deconectarea rapidă, astfel încât deteriorarea cablului este minoră, iar extinderea defectului la celelalte faze, exclusă.

Din cauza dificultății de menținere a potențialului pe prizele de pământ în limitele admise, acest mod de tratare a neutrului este prea costisitor pentru rețelele aeriene. Prizele de pământ naturale ale stâlpilor liniilor aeriene au rezistența mult mai mare decât prizele posturilor din rețelele subterane, iar lungimea mare a liniilor rețelelor aeriene face ca probabilitatea producerii defectelor la stâlpi să fie mult mai mare în comparație cu posturile de transformare. Reducerea mărimii acestor rezistențe implică costuri prea mari pentru a fi acceptate, cu excepția unor situații particulare. În condițiile înăsprii cerințelor privind protecția populației și animalelor în raport cu rețelele electrice, normele europene impun valori reduse ale potențialelor admisibile pe prizele de pământ ale acestor instalații. De asemenea, supratensiunile transmise în rețelele de joasă tensiune datorită defectelor din rețelele de medie tensiune sunt limitate prin aceste norme. În aceste condiții are loc, în prezent, schimbarea metodei de tratare a neutrului rețelelor aeriene de medie tensiune de la rezistență redusă la bobina de stingere.

Deși, în principiu, impedanța redusă se poate realiza ca un rezistor sau o inductanță, cea mai mare răspândire o are utilizarea rezistorului. Principalele motive sunt:

- influența mai redusă a mărimii capacității fază-pământ a rețelei asupra valorii curentului de defect monofazat (fig.4.11), datorită însumării vectoriale a curentului capacitiv de punere la pământ cu curentul prin neutru care este în fază cu tensiunea fazei defecte în cazul rezistorului și defazat în urmă cu 90 grade în cazul inductanței;
- factor de supratensiune mai redus pe fazele sănătoase în timpul defectului monofazat în cazul rezistorului, deși această deosebire nu este atât de importantă

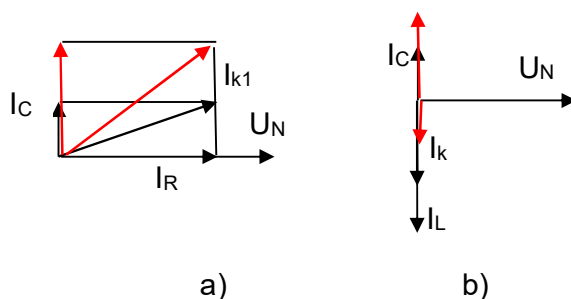


Fig.4.12-Curenții de scurtcircuit monofazat în cazurile de tratare a neutrlui cu rezistor (a) sau inductanță (b)

pentru a justifica o reducere a nivelului de izolație.

Din punct de vedere economic însă, este mai avantajoasă soluția inductanței. Aceasta se poate realiza ca o bobină fără miez, din conductor de aluminiu, cu izolație uscată sau în ulei de transformator. Rezultă avantaje precum:

- regim termic foarte ușor, pe durata defectului, datorită lipsei disipării de energie activă în inductanță;
- gabarit (dimensiuni, masă) și cost mult mai reduse comparativ cu rezistorul.

#### 4.5. Alegerea modului de tratare a neutrlui rețelelor electrice

Aspectele examinate mai sus, legate direct de influența modului de tratare a neutrlui rețelei asupra regimului de defect monofazat, permit înțelegerea implicațiilor unei alegeri atât asupra aspectelor tehnice cât și economice privind construcția și exploatarea rețelelor de transport și distribuție.

S-au menționat mai sus consecințele care decurg din mărimile curenților și tensiunilor în timpul regimului de defect monofazat atât asupra rețelei respective cât și asupra ambianței reprezentată de alte rețele electrice (prin perturbații) și de prezența populației în vecinătatea instalațiilor electrice.

Importanța acestor consecințe este diferită, în funcție de tipul rețelei în privința rolului în sistemul electroenergetic (transport, distribuție), de tensiunea nominală a rețelei, de tipul constructiv (aeriană, subterană mixtă).

Rezultatul numeroaselor studii efectuate asupra acestor aspecte se concretizează în recomandări privind alegerea modului de tratare a neutrlui, considerat optim în funcție de toți factorii menționați.

**În rețelele de înaltă și foarte înaltă tensiune** soluția, folosită în toate țările, este **legarea directă la pământ**. Întrucât, pe măsura creșterii tensiunii de serviciu, costul izolației capătă pondere tot mai mare în costul total al rețelei, se alege această soluție pentru care nivelul supratensiunilor datorate defectelor monofazate este cel mai redus.

Deși astfel curentul de defect monofazat poate fi destul de mare, se consideră inacceptabilă doar depășirea mărimii curentului de scurtcircuit trifazat. Pentru evitarea acestei situații, soluția cea mai frecvent folosită este nelegarea la pământ a neutrelor



unor transformatoare dintr-o rețea cu mai multe stații de transformare, astfel ca să se mențină factorul de legare la pământ mai mic decât 1,4.

În privința potențialelor pe prizele de pământ parcurse de curentul de defect monofazat, fiind vorba de linii de înaltă și foarte înaltă tensiune, majoritatea stâlpilor acestora se află în zone puțin frecventate de populație și animale domestice. De asemenea protecțiile, sensibile și rapide, asigură deconectarea în timp foarte scurt a liniei defecte.

Continuitatea în alimentare a consumatorilor nu este afectată de aceste deconectări în primul rând datorită prezenței automaticii RAR și în al doilea rând datorită alimentărilor duble sau de rezervă ale stațiilor de transformare din aceste rețele.

**În cazul rețelelor de medie tensiune** soluțiile de tratare a neutrului sunt mai diverse. În aceste rețele, care alimentează consumatori racordați fie direct la medie tensiune fie prin posturile de transformare MT/JT, costul izolației este mai redus, dar continuitatea în alimentare este de primă importanță. Se preferă soluții de tratare a neutrului care nu implică deconectarea rapidă a liniei defecte, deoarece, în acest mod, se pot folosi scheme de alimentare a consumatorilor cu rezerve mai reduse (scheme radiale, simplu buclate).

Rețelele de medie tensiune pot fi pur aeriene, pur subterane sau mixte. Acest fapt influențează alegerea soluției de tratare a neutrului.

Astfel, modul optim de tratare a neutrului acestor rețele este:

- în **rețelele pur aeriene**, legarea neutrului la pământ prin **bobină de stingere**;
- în **rețelele pur subterane**, legarea neutrului la pământ prin **impedanță de valoare redusă**;
- în **rețelele mixte**, folosirea uneia dintre cele două soluții, în funcție de ponderea celor două tipuri de linii.

Aceste soluții satisfac și cerința limitării pericolului de electrocutare pentru persoane și animale domestice, prin faptul ca potențialele prizelor de pământ parcurse de curentii de defect monofazat pot fi menținute în limite admisibile, ținând seama și de timpul de acțiune a protecției prin rele. Astfel, în rețelele aeriene compensate, în care obținerea unei rezistențe de dispersie reduse a prizei de pământ a stâlpilor este costisitoare, curentul de defect are valoare redusă. În rețelele subterane, rezistențele prizelor de pământ sunt mult mai mici astfel că tratarea cu impedanță redusă poate fi admisă, mai ales că protecția poate deconecta rapid sectorul defect.

Influența asupra liniilor de telecomunicații este mai importantă în cazul liniilor aeriene având traseu paralel cu acestea. Curentul de defect redus permite evitarea unor influențe dăunătoare. În cazul liniilor subterane, durata redusă a regimului de defect ca și limitarea curentului de defect, permit încadrarea în limitele admise a acestor perturbații.

Aspectul cel mai puțin rezolvat în cazul rețelelor compensate rămâne detectarea și deconectarea defectelor. În acest domeniu se remarcă, în prezent, propunerea de noi soluții de protecție, relativ complicate, posibile datorită tehnicilor electronice și de calcul numeric.

Rețelele de **joasă tensiune**, au punctul neutru **legat direct la pământ**. În aceste rețele, accesibile majorității populației, cerința principală o constituie înlăturarea pericolului de electrocutare datorită defectelor izolației. Soluția aleasă permite deconectarea rapidă a defectului. Folosirea conductorului de nul, legat la neutrul transformatorului din postul de transformare și la mai multe prize de pământ ale clădirilor (în cazul rețelelor subterane) sau ale stâlpilor (în cazul rețelelor aeriene), asigură valori reduse ale rezistenței prizelor de pământ.

#### 4. 6. Supratensiuni de regim staționar datorate dublei puneri la pământ

Schema de principiu pentru acest defect net este următoarea:

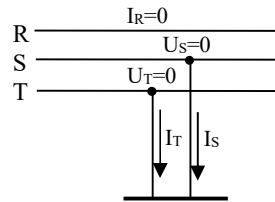


Fig.4.13 - Dublă punere la pământ

Acestei configurații îi corespund, la locul defectului, condițiile:

$$\underline{U}_S = \underline{U}_T = 0, \quad \underline{I}_R = 0.$$

Prin descompunerea în componente simetrice a tensiunilor și curenților de fază, condițiile anterioare conduc la:

$$\underline{U}_h + a^2 \underline{U}_d + a \underline{U}_i = \underline{U}_h + a \underline{U}_d + a^2 \underline{U}_i,$$

$$(a^2 - a) \underline{U}_d = (a^2 - a) \underline{U}_i,$$

$$\underline{U}_d = \underline{U}_i.$$

Introducând acest rezultat în expresia tensiunii pe faza **S**, se obține:

$$\underline{U}_S = \underline{U}_h + a^2 \underline{U}_d + a \underline{U}_i = \underline{U}_h + (a^2 + a) \underline{U}_d = \underline{U}_h - \underline{U}_d = 0.$$

În final

$$\underline{U}_h = \underline{U}_d = \underline{U}_i.$$

Condiția referitoare la curentul fazei **R** conduce la

$$\underline{I}_h + \underline{I}_d + \underline{I}_i = 0.$$

Aceste rezultate permit alcătuirea schemei echivalente de calcul prin metoda componentelor simetrice pentru dubla punere metalică la pământ:

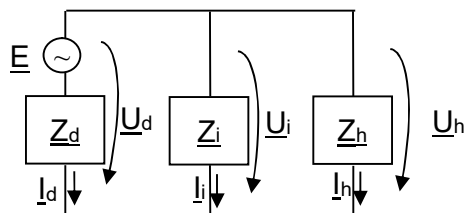


Fig.4.14 - Schema echivalentă pentru dubla punere la pământ

Componentele simetrice de tensiune, conform schemei din fig.4.14 sunt:

$$\underline{U}_d = \underline{E} - \underline{Z}_d \underline{I}_d, \quad \underline{U}_i = -\underline{Z}_i \underline{I}_i, \quad \underline{U}_h = -\underline{Z}_h \underline{I}_h.$$

Expresia componentei directe de curent rezultă a fi:

$$I_d = \frac{E}{Z_d + \frac{Z_i Z_h}{Z_i + Z_h}} = E \frac{Z_i + Z_h}{Z_d(Z_i + Z_h) + Z_i Z_h} = E \frac{Z_d + Z_h}{Z_d(Z_d + 2Z_h)},$$

dacă se acceptă că  $Z_d = Z_i$ .

Din egalitatea tensiunilor directă și inversă rezultă expresia curentului invers:

$$I_i = -\frac{E - Z_d I_d}{Z_d} = -\frac{1}{Z_d} E - Z_d \frac{Z_d + Z_h}{Z_d(Z_d + 2Z_h)} E = \frac{E}{Z_d} \left( -1 + \frac{Z_d + Z_h}{Z_d + 2Z_h} \right).$$

În final

$$I_i = -E \frac{Z_h}{Z_d(Z_d + 2Z_h)}.$$

Din egalitatea tensiunilor inversă și homopolară rezultă expresia curentului homopolar:

$$I_h = \frac{Z_d}{Z_h} I_i = \frac{-E}{Z_d + 2Z_h}.$$

Tensiunea pe faza **R** (sănătoasă) rezultă a fi:

$$\begin{aligned} \underline{U}_R = \underline{U}_h + \underline{U}_d + \underline{U}_i &= E \frac{Z_h}{Z_d + 2Z_h} + E - E \frac{Z_d + Z_h}{Z_d(Z_d + 2Z_h)} Z_d + \\ &+ E \frac{Z_h}{Z_d(Z_d + 2Z_h)} Z_d = E \left( \frac{Z_h}{Z_d + 2Z_h} + 1 - \frac{Z_d + Z_h}{Z_d + 2Z_h} + \frac{Z_h}{Z_d + 2Z_h} \right) \end{aligned}$$

În final,

$$\underline{U}_R = E \frac{3Z_h}{Z_d + 2Z_h}.$$

Dacă se neglijează părțile reale ale impedanțelor complexe, adică se neglijează rezistențele schemei, și se notează  $\alpha = X_h/X_d$ , se obține:

$$U_R = E \frac{3X_h}{X_d + 2X_h} = E \frac{3\alpha}{1 + 2\alpha}.$$

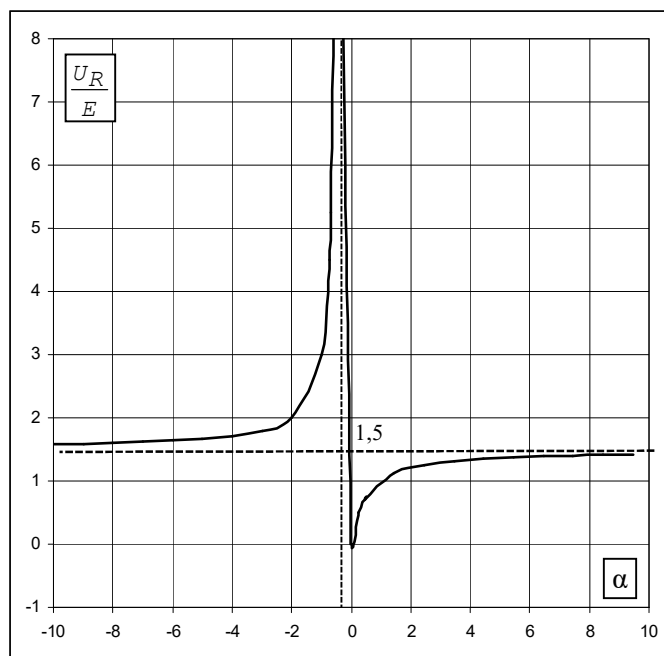
Reprezentarea grafică a funcției  $U_R(\alpha)$  prezintă două asimptote:

- o asimptotă orizontală, având ordonata

$$U_R = \lim_{\alpha \rightarrow \pm\infty} \frac{3\alpha}{1 + 2\alpha} E = \frac{3E}{2};$$

- o asimptotă verticală, având abscisa  $\alpha = -1/2$ .

Factorul de supratensiune rezultă mai redus decât în cazul simplei puneri la pământ, rămânând și în acest caz posibilitatea teoretică a unor supratensiuni foarte mari dacă  $\alpha$



**Fig.4.15**-Factorul de supratensiune staționară în cazul dublei puneri la pământ

= - 0,5. Realizarea practică este însă și mai puțin probabilă decât condiția  $\alpha = - 2$  din cazul defectului monofazat în rețele cu neutrul izolat.