

## Tratarea neutrului în rețelele electrice

### 1. Considerații generale

Tratarea neutrului rețelelor electrice reprezintă unul din factorii de care depinde siguranța în alimentarea cu energie electrică a consumatorilor.

Fenomenele ce se manifestă în aceste instalații de distribuție influențează în mod nemijlocit principalii parametri calitativi ai energiei electrice livrate către consumatori și în mod deosebit, indicatorul ce caracterizează continuitatea în alimentarea cu energie electrică.

Opțiunea pentru un sistem de tratare sau altul, este rezultatul unui compromis făcut între exigențele ce decurg din două puncte de vedere :

1) punctul de vedere al furnizorului de energie electrică :

-localizarea automată și selectivă a defectelor ;

-eliminarea automată și selectivă a defectelor ;

2) punctul de vedere al clientului :

-alimentarea fără întreruperi ;

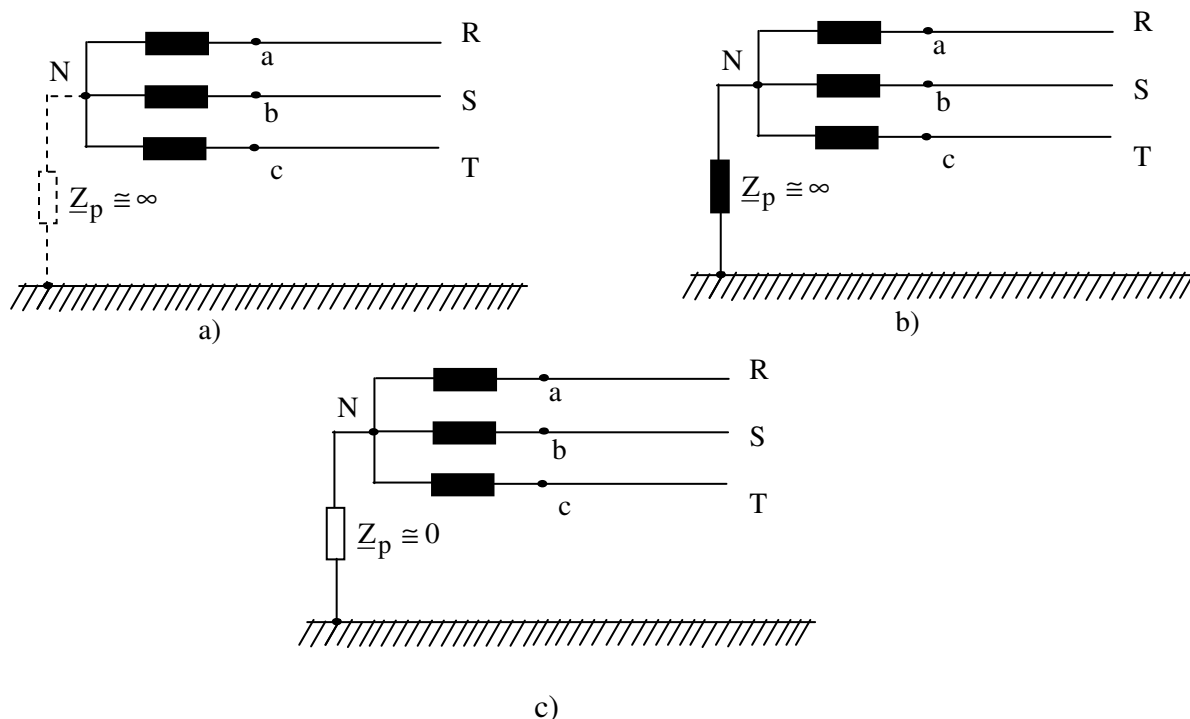
-compatibilitatea cu sistemele de distribuție de pe platformele industriale.

Punctul neutru al înfășurărilor transformatoarelor și generatoarelor cu conexiune Y reprezintă un punct median față de cele trei faze al cărui potențial, de obicei, în regim de funcționare normal simetric și sinusoidal, este egal cu potențialul pământului. În general, însă, în funcție de legăturile existente între sistemul trifazat și pământ, potențialul punctului neutru față de pământ poate lua orice valoare : corespunzător, întregul potențial al sistemului trifazat se poate "deplasa" față de potențialul pământului.

Deplasarea punctului neutru al unui sistem trifazat este dat de modul în care se realizează legătura dintre punctul neutru și pământ. Dacă se realizează o legătură electrică de o impedanță oarecare între neutrul transformatorului și pământ, aceasta va tinde să "țină" potențialul neutrului egal cu cel al pământului. Cu cât impedanța de legătură este mai mică, cu atât căderea de tensiune pe ea este mai mică și posibilitatea de a "ține" neutrul la potențialul pământului este mai eficace. Dacă nu se realizează nici o legătură a neutrului la pământ, întregul sistem trifazat poate în general să "floreze" în raport cu potențialul pământului; poziția sistemului trifazat, inclusiv a neutrului acestuia, se va stabili la un potențial ce depinde de ansamblul de legături electrice dintre sistemul trifazat și pământ, de valoarea și caracterul acestuia.

Din punct de vedere al poziției neutrului față de pământ se pot deosebi următoarele tipuri de rețele :

- rețele cu neutrul izolat- la care neutrul nu are nici o legătură voită cu pământul, cu excepția celor realizate prin aparate de măsură, semnalizare și protecție, acestea având o impedanță foarte mare (figura 1.a) ;
- rețele compensate- la care neutrul este legat la pământ prin bobine a căror reactanță are o asemenea valoare încât în cazul unui defect între o fază a rețelei și pământ, curentul inductiv care circulă între locul de defect și bobină compensează substanțial componenta capacitivă a curentului de defect (figura 1.b) ; în cazul unei rețele corect compensate prin bobina de stingere, curentul rezultat în punctul de defect este astfel limitat încât arcul electric de punere la pământ se stinge spontan ;
- rețele cu neutrul legat la pământ- fie direct, fie printr-o rezistență sau reactanță de valoare suficient de mică (figura 1.c).



**Fig.1. Situații relative ale neutrului transformatoarelor (sau generatoarelor) față de pământ :**  
a) rețea cu neutru izolat ; b) rețea cu neutru compensat; c) rețea cu neutru legat la pământ.

Alegerea modului de tratare a neutrului rețelei este o problemă complexă, legată de mai mulți factori, dintre care determinant este modul de comportare al rețelei în cazul punerilor la pământ. Punerile la pământ cele mai frecvente apar în rețele datorită conturnărilor determinate de supratensiunile atmosferice. Modul de tratare a neutrului rețelei trebuie să contribuie la lichidarea cât mai rapidă a arcului electric de punere la pământ, de frecvență industrială, care apare în urma conturnării izolației și - dacă este posibil - fără a se întrerupe alimentarea consumatorilor. Totodată este necesar ca la punerea la pământ a unei faze, curentul de scurtcircuit monofazat să fie mai mic decât cel trifazat.

Din punct de vedere al tratării neutrului, rețelele electrice de distribuție se caracterizează în funcție de raportul dintre curentul de scurtcircuit monofazat  $I_{sc}^{(1)}$  și cel trifazat  $I_{sc}^{(3)}$ , astfel :

$$\frac{I_{sc}^{(1)}}{I_{sc}^{(3)}} \leq 0,25 - \text{rețele având curenți mici de punere la pământ ;}$$

$$\frac{I_{sc}^{(1)}}{I_{sc}^{(3)}} \in [0,25; 1] - \text{rețele având curenți mari de punere la pământ ;}$$

$$\frac{I_{sc}^{(1)}}{I_{sc}^{(3)}} > 1 - \text{rețele având curenți foarte mari de punere la pământ.}$$

În caz de defect (punere la pământ, scurtcircuit cu pământul), rețeaua de distribuție se comportă diferit în funcție de sistemul de tratare al neutrului adoptat. Soluțiile aplicate tratării neutrului diferă de la o țară la alta.

Obiectivul tratării neutrului rețelelor electrice constă în reducerea curentului de defect monofazat fază-pământ (cazul cel mai des întâlnit în exploatare). Această reducere diminuează riscurile pentru personal în timpul unui defect și limitează consecințele pe alte

instalații electrice. Pentru defectele cu arc electric, această reducere provoacă stingerea arcului electric fără efecte periculoase pentru exploatarea rețelelor și în consecință aduce o ameliorare considerabilă a calității furnizării de energie electrică.

Planul de protecție cu punere la pământ inductivă poartă denumirea de rețea compensată. Pentru a asigura o reducere satisfăcătoare a curentului de defect, este necesar să se adapteze în mod continuu valoarea inductanței neutrului la starea rețelei.

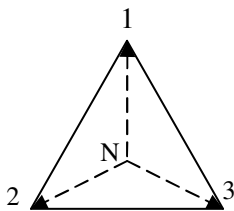
## 2. Tratarea neutrului în rețelele electrice

În orice sistem trifazat echilibrat direct sau invers, de joasă sau înaltă tensiune, există un neutru electric situat în centrul de greutate al triunghiului echilateral (figura 2), format din tensiunile compuse 12, 23 și 31. Într-o rețea electrică alimentată din secundarul unui transformator cu conexiunea triunghi, de exemplu, acest neutru există și se definește prin cele trei tensiuni simple reprezentate prin fazorii N1, N2, N3.

Dacă rețeaua este perfect izolată, potențialul acestui neutru nu este fix și poate lua orice valoare cuprinsă teoretic între zero și tensiunea simplă a rețelei de 50 Hz.

Astfel, când rețeaua trifazată este simetrică și nu prezintă defecte, potențialul punctului neutru coincide cu potențialul pământului, așa cum se observă în figura 3a. Toate cele trei faze au capacitățile față de pământ, rezistențele de izolație și tensiunile electrice egale. În aceste condiții, conductoarele neutre, în cazul când ele există, nu vor fi parcurse de curent, iar punctele neutre ale transformatoarelor cu înfășurările conectate în stea, vor avea potențialul față de pământ egal cu zero.

În consecință, *la funcționarea rețelelor în regimuri normale simetrice, este indiferent dacă neutrul transformatoarelor este izolat sau legat la pământ.*



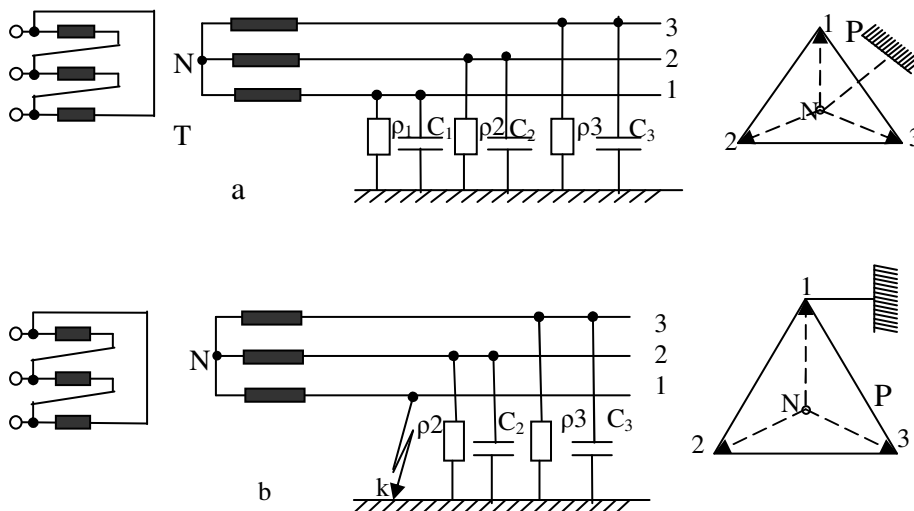
**Fig.2.** Reprezentarea neutrului și determinarea experimentală a acestuia

În realitate, punctul neutru al unei rețele electrice este rar confundat cu pământul și are potențialul zero. În cele mai multe cazuri, el are un anumit potențial în raport cu pământul, creat de diverse cauze.

Astfel dacă capacitățile față de pământ ale fazelor și rezistențele de izolație ale acestora nu sunt identice, atunci se creează o oarecare nesimetrie a rețelei care se caracterizează printr-o deplasare a punctului neutru în raport cu pământul.

Dacă se consideră cazul extrem de punere la pământ a unei faze, capacitatea și rezistența de izolație ale acesteia devin nule, iar potențialul punctului neutru față de pământ corespunde tensiunii de fază a rețelei, așa cum se observă în diagrama tensiunilor dată în figura 3b. În consecință, tratarea neutrului transformatoarelor prezintă o importanță deosebită la funcționarea rețelelor în regiuni nesimetrice, când una din faze se pune accidental la pământ. Analizând cazul din figura 3b, se poate constata că fazele sănătoase vor avea față de pământ o tensiune egală cu tensiunea compusă a rețelei.

Acest lucru face ca izolația lor să fie solicitată de  $\sqrt{3}$  ori mai mult decât în cazul funcționării în regim normal. Dacă însă neutrul va fi legat la pământ, atunci punerea accidentală la pământ a unei faze generează un s.c. monofazat.



*Fig.3. Variația potențialului punctului neutru al unei rețele trifazate în raport cu pământul*

Deci modul de tratare a neutrului transformatoarelor din rețele electrice determină, în anumite condiții, fie apariția unor curenți cu intensități mari, fie a unor supratensiuni.

Problemele întâlnite la joasă tensiune (JT) sunt în mod esențial legate de securitatea persoanelor ținându-se cont de faptul că tensiunile utilizate în JT nu sunt scutite de pericole.

În principal există trei metode, principal diferite, pentru tratarea neutrului transformatoarelor, și anume:

- neutrul legat direct la pământ
- neutrul legat la pământ printr-o impedanță printr-o impedanță, în particular prin bobină de stingere
- neutrul izolat față de pământ.

Fiecare din aceste metode se aplică în funcție de caracteristicile și tensiunea nominală a rețelei, prezentând avantaje și dezavantaje.

### **2.1. Rețele cu neutrul legat direct la pământ**

O măsură radicală împotriva variației sensibile a potențialului punctului neutru și a supratensiunilor care o însoțesc este legarea la pământ a punctului neutru al transformatoarelor. Această metodă se utilizează, în general, pentru rețelele aeriene de înaltă tensiune de 110 kV, și se realizează printr-o legătură solidă la pământ a punctului neutru al unuia sau mai multor transformatoare. În acest caz, orice punere la pământ a unei faze devine un scurtcircuit monofazat. Dacă punerea la pământ este accidentală și se realizează printr-un arc electric, atunci eliminarea defectului poate fi provocată prin declanșarea și reanclanșarea automată rapidă.

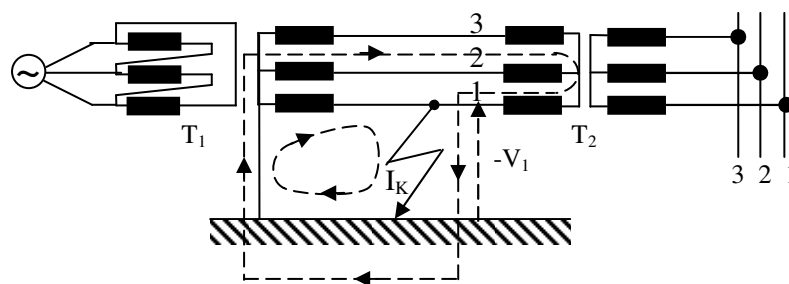
În figura 4 se prezintă o rețea trifazată cu neutrul legat la pământ, în care una din faze este pusă la pământ. Intensitatea curentului care circulă prin pământ, între locul defectului și neutrul legat la pământ, se poate determina cu ajutorul componentelor simetrice. La același rezultat se poate ajunge în mod direct, conform figurii 4. Curentul care circulă prin pământ între locul defectului și neutrul legat la pământ are două componente, determinate de tensiunea fazei –  $\underline{V}_1$ . Prima dintre acestea se închide direct prin înfășurarea fazei scurtcircuitate a transformatorului  $T_1$  și pământ; intensitatea sa este limitată de fluxul de scăpări a acestei faze a transformatorului  $T_1$ , care determină inductanța  $L_1$ . A doua componentă se închide pe două ramuri egale și în paralel, prin înfășurările celorlalte două faze ale transformatorului, prin cele două conductoare sănătoase, prin transformatorul  $T_2$ , cu

inductanță de scăpări  $L_2$ , înapoi la locul de scurtcircuit. În acest caz, capacitățile rețelei nu au nici o importanță practică.

Curentul total de scurtcircuit care trece prin pământ este determinat de relația:

$$I_K = \frac{V_1}{\omega L_1} + 2 \frac{V_1}{\omega L_1 + \omega L_2} = \frac{V_1}{\omega L_1} \left( 1 + \frac{2}{1 + \frac{L_2}{L_1}} \right) \quad (1)$$

unde pentru simplificare au fost neglijate rezistențele liniilor și ale circuitelor din pământ, iar reactanțele lor au fost incluse în cele ale transformatoarelor. Dacă transformatorul  $T_2$  de la capătul liniei are o putere mică în comparație cu cea a transformatorului legat la pământ, sau dacă linia este deconectată la acest capăt, inductanța  $L_2$  devine foarte mare în comparație cu inductanța  $L_1$ . Ca urmare, al doilea termen din ecuația (1) tinde către zero, iar intensitatea curentului de scurtcircuit monofazat este determinată practic numai de inductanța înfășurării conectate la linia defectă. Dacă însă transformatorul  $T_2$  are o putere mare, inductanța  $L_2$  este mică în comparație cu inductanța  $L_1$  și paranteza ecuației (1) se apropie de valoarea 3. În acest caz, transformatorul cu punctul neutru legat la pământ are practic cele trei borne scurtcircuitate și prin aceasta, reactanța de scurtcircuit a celor trei înfășurări devine  $\omega L_1/3$ . Curenții de scurtcircuit monofazat încarcă cu sarcini nesimetrice importante centralele din sistem și produc scăderea apreciabilă a tensiunii. În unele cazuri, intensitatea acestora depășește pe cea a curenților de scurtcircuit trifazat. De aceea, orice scurtcircuit monofazat determină acționarea protecției prin rele, care comandă declanșarea circuitului avariat. În acest fel se evită distrugerile care pot fi cauzate de arcul electric, iar scurtcircuitul monofazat nu se mai poate transforma în scurtcircuit bifazat sau trifazat.



*Fig.4. Curentul de scurtcircuit monofazat într-o rețea trifazată*

De asemenea, în cazul unei legări rigide la pământ a neutrului, acele părți ale bobinajelor transformatoarelor care se află în apropierea neutrului, nu vor avea față de pământ un potențial prea mare, chiar în timpul defectului. Datorită acestui fapt este posibil ca nivelul izolației acestor bobine să fie redus față de cel al bobinelor din apropierea bornelor de înaltă tensiune ale transformatorului. O astfel de izolație în trepte a înfășurării se numește degresivă și costă mult mai puțin.

Dezavantajul principal al legării neutrului direct la pământ constă în faptul că apariția curenților de scurtcircuit monofazat provoacă perturbări în liniile de telecomunicații și în transmisiunile radiofonice. De aceea este necesar ca pe aceste linii de telecomunicații să se monteze mijloace speciale de protecție împotriva perturbărilor produse de liniile de transport de energie electrică situate în apropiere. O soluție, utilizată și în țara noastră, constă în respectarea anumitor distanțe între liniile de telecomunicații și cele de transport de energie electrică.

Din punct de vedere al tensiunilor pe fază, simetria perfectă a acestora s-ar menține în cazul unui scurtcircuit monofazat, numai dacă rezistența prizei de legare la pământ ar fi teoretic nulă. În realitate însă, rezistența prizei de legare la pământ, deși are o valoare foarte

mică, condiționează o cădere de tensiune datorită intensităților mari ale curenților de scurtcircuit monofazat. Ca urmare potențialul neutrului nu rămâne egal cu zero, ceea ce face ca tensiunea fazelor sănătoase să crească într-o oarecare măsură. Din această cauză se impune ca verificarea prizei să fie făcută frecvent, deoarece încălzirea puternică a acesteia, la trecerea curenților de scurtcircuit monofazat, provoacă o creștere a rezistenței pământului prin „coacere” și neutrul riscă să fie legat la pământ printr-o impedanță ridicată, fără ca exploatarea să fie prevenită.

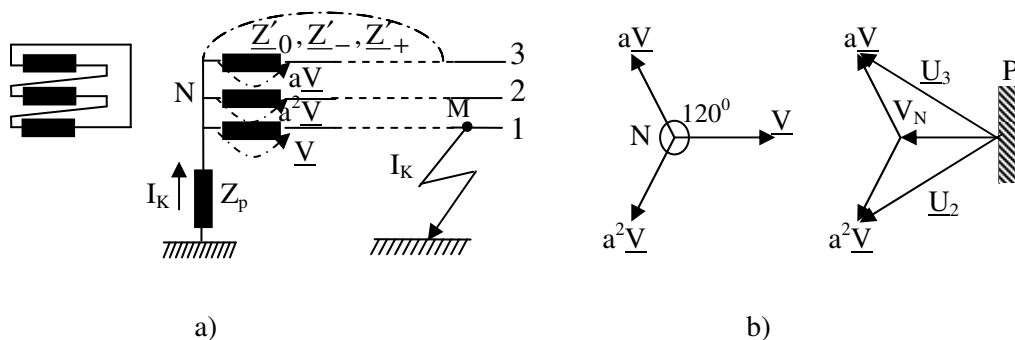
Conform recomandărilor CEI, la rețelele cu neutrul legat direct la pământ, tensiunea fazelor sănatoase nu trebuie să depășească 0,8 din tensiunea între faze, în cazul unui scurtcircuit monofazat. În același timp, intensitatea curenților de scurtcircuit monofazat nu trebuie să depășească pe cea a curenților de scurtcircuit trifazat, pentru care sunt dimensionate aparatele electrice de comutație din rețele. În afara unor mijloace speciale, realizarea acestor condiții impune un anumit raport între reactanța de secvență zero (0) și de secvență pozitivă (+) a rețelei, determinate față de locul de scurtcircuit, care trebuie să fie mai mare decât 1 și mai mic decât 3,  $\left(1 < \frac{X_0}{X_+} < 3\right)$ .

Această condiție se realizează legând direct la pământ numai punctele neutre ale unora dintre transformatoare, celelalte rămânând izolate. În general, se recomandă ca în fiecare instalație electrică de înaltă tensiune să existe cel puțin un transformator cu neutrul legat direct la pământ.

## 2.2. Rețele cu neutrul legat prin impedanță

Limitarea curentului de defect monofazat se poate realiza prin montarea de impedanțe în conexiunile de legare la pământ a transformatoarelor.

Fie, de exemplu, rețeaua trifazată din figura 5 al cărei neutr este legat la pământ prin impedanța  $Z_p$ .



**Fig.5.** Legarea la pământ a neutrului unei rețele trifazate prin intermediul unei impedanțe

În cazul unei puneri la pământ în punctul M, curentul de scurtcircuit este:

$$I_k = \frac{3V}{3Z_p + Z'_0 + Z'_- + Z'_+} \quad (2)$$

unde:  $V$ - tensiunea pe fază a rețelei;

$3Z_p$  - impedanța pe fază a punctului neutru;

$Z'_+, Z'_-, Z'_0$  - impedanțele echivalente de secvență pozitivă, negativă și zero ale rețelei între neutr și locul de defect.

Potențialul punctului neutru în raport cu pământul:

$$\underline{V}_N = -\underline{Z}_p \underline{I}_K = -3\underline{Z}_p \underline{I}_0 = \frac{-3\underline{Z}_p \underline{V}}{3\underline{Z}_p + \underline{Z}'_0 + \underline{Z}'_- + \underline{Z}'_+} \quad (3)$$

unde:  $I_0$  este componenta de succesiune zero a curentului de scurtcircuit.

Din această ultimă relație se constată că dacă impedanța  $3\underline{Z}_p$  este mare în raport cu suma impedanțelor  $\underline{Z}'_+$ ,  $\underline{Z}'_- + \underline{Z}'_0$ , atunci potențialul neutrului se apropie de tensiunea de fază a rețelei  $V$  și tensiunile fazelor sănătoase tind către tensiunea de linie  $\sqrt{3} V$ . Acest lucru se constată și din digrama tensiunilor dată în figura 5.b din care reiese că tensiunile fazelor sănătoase au valorile:

$$\underline{U}_2 = \underline{V}_N + a^2 \underline{V} \quad \text{și} \quad \underline{U}_3 = \underline{V}_N + a \underline{V} \quad (4)$$

Dacă însă se dorește evitarea unor potențiale ridicate pe neutrul transformatoarelor, se aleg impedanțe cu valori reduse, însă în acest caz, curentul de defect poate atinge valori importante. În consecință, este necesar să se aleagă o anumită impedanță, care să limiteze intensitatea curentului și potențialul neutrului la anumite valori. Aceste limite depind de tensiunea de lucru a rețelei și de concepția de dezvoltare în ansamblu a acesteia. Astfel, pentru rețeaua de medie tensiune din țara noastră intensitatea curentului poate fi limitată de impedanțe pînă la 300 A, în timp ce pentru rețeaua franceză, ea este limitată pînă la 800 A.

Impedanțele punctelor neutre pot fi formate fie din rezistențe, fie din bobine de inductanță. Acestea din urmă, mai puțin voluminoase decît rezistențele metalice, sînt mai raspîndite în rețele; ele produc pierderi practic neglijabile cînd sunt parcurse de curenții de scurtcircuit și nu se constată supratensiuni periculoase în timpul regimurilor tranzitorii care însoțesc stabilirea sau ruperea unui scurtcircuit.

#### A. Legarea la pămînt a neutrului prin bobine de stingere.

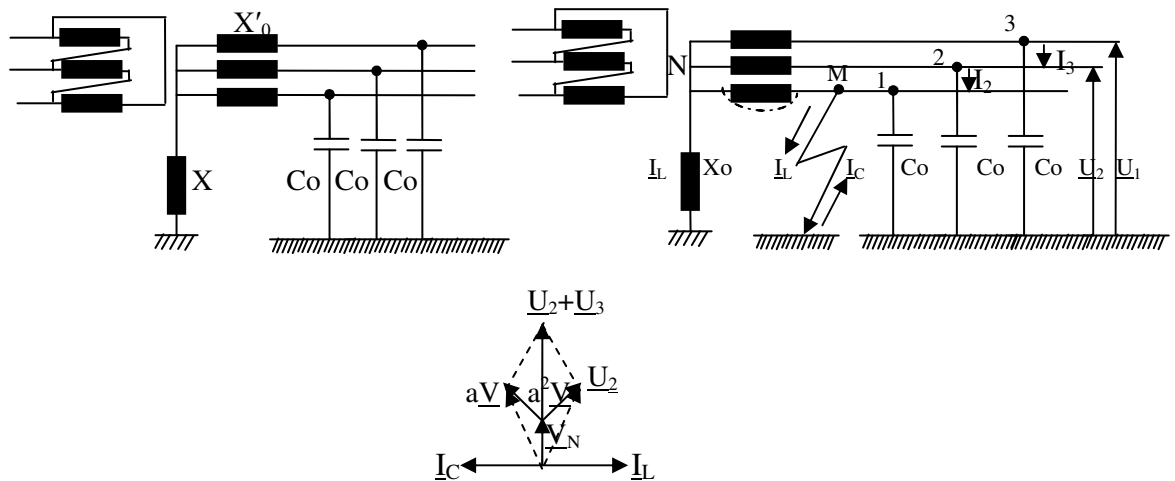
Un caz particular important de întrebuițare a bobinelor de inductanță în conexiunea neutrului unor transformatoare din rețelele aeriene de 35 kV este acela în care bobina este aleasă așa fel, încît să existe o rezonanță între capacitatea și inductanța de secvență zero pe fază.

Fie, de exemplu, cazul prezentat în figura 6a în care s-a presupus linia scurtă, astfel încît se poate considera capacitatea localizată. Dacă se notează cu  $X$  reactanța bobinei și cu  $X'_0$  reactanța de secvență zero a transformatorului, atunci condiția de rezonanță este exprimată prin relația:

$$(3X + X'_0) \cdot C_0 \omega = 1 \quad (5)$$

În această ipoteză impedanța de secvență zero a rețelei este foarte mare, teoretic infinită, dacă rezistențele ohmice sunt nule. Curentul în locul de defect este foarte mic și arcul electric se poate stinge la prima sa trecere prin zero. O astfel de bobină se numește bobină de stingere sau bobină Petersen. Toate defectele la pămînt cu caracter trecător, care sunt cele mai frecvente, sunt astfel eliminate fără intervenția protecțiilor, deci a întreruptoarelor.

Rolul fizic al bobinei de stingere este să permită circulația în locul defect a unui curent reactiv de scurtcircuit  $I_L$ , care se opune curentului capacitiv  $I_C$  rezultat din compunerea curenților capacitivi ai fazelor sănătoase, cărora li se aplică tensiunile compuse ale rețelei. Acest rezultat reiese din figura 6b în care se consideră neglijabilă reactanța transformatorului în raport cu cea a bobinei. După cum se observă, curentul de defect are două componente și anume: o componentă  $I_C$  care urmează traseul capacităților fazelor sănătoase și o alta care parcurge bobina  $X$ . Tensiunea punctului neutru  $\underline{V}_N = -\underline{V}$ , iar tensiunile  $\underline{U}_2$  și  $\underline{U}_3$  au amplitudinea egală cu tensiunea compusă a rețelei.



**Fig.6.** Reprezentarea rezonanței într-o rețea cu neutrul legat la pământ printr-o bobină de stingere

Curentul capacitiv care traversează defectul, conform figurii 6b și 6c, are valoarea:

$$\underline{I}_C = j\omega C_0(\underline{U}_2 + \underline{U}_3) = 3j\omega C_0 V_N = -3j\omega C_0 V \quad (6)$$

iar curentul din bobină:

$$\underline{I}_L \cong -\frac{jV}{X} = \frac{V}{jX} \quad (7)$$

Pentru ca acești doi curenți să fie egali și opuși, fiind dat sensul lor conform figurii 6b, este necesar ca:

$$3j\omega C_0 V = \frac{jV}{X} \quad (8)$$

sau în valoare absolută:

$$3X\omega C_0 = 1$$

care reprezintă condiția de rezonanță (5), unde se consideră reactanța transformatorului  $X'_h$  neglijabilă.

Bobina de stingere este construită cu miez de fier și cu întrefier și are o inductanță foarte mare, care poate fi modificată fie prin schimbarea numărului de spire, fie prin modificarea întrefierului. Alegând inductanța conform relației (5) rezultă, că în cazul punerii la pământ a unei faze, bobina poate compensa teoretic în totalitate curentul capacitiv, iar arcul electric se stinge, dat fiind faptul că el nu mai este alimentat. În consecință, *tratarea neutrului cu bobină de stingere elimină posibilitatea apariției arcului electric intermitent, însă prezintă dezavantajul că la funcționarea rețelei cu o fază pusă la pământ, tensiunile fazelor sănătoase față de pământ cresc pînă la valoarea tensiunii între faze.*

### Observații:

**a.** În mod practic, nu este necesară îndeplinirea riguroasă a condiției de rezonanță pentru ca arcul electric să se stingă definitiv și să nu devină intermitent, ci se merge cu un dezacord de 15-25%. Cercetările arată că arcul electric dintre o fază a unei linii electrice și pământ, cu tensiunea nominală cuprinsă între 35 kV și 110 kV, poate deveni intermitent dacă intensitatea curentului de defect care îl alimentează este cuprinsă între 5 și 30 A. În cazul utilizării bobinelor de stingere cu un dezacord normal de 15-25%, arcul electric nu devine intermitent chiar dacă intensitatea curentului de punere la pământ atinge intensități apropiate de limita superioară sau mai mari. Acest rezultat nu este în contradicție cu indicația conform



căreia arcul se stinge numai pentru un curent mai mic de 5 A. Explicația constă în faptul că bobina dezacordată favorizează stingerea arcului electric atât datorită limitării curentului de defect, cât și datorită limitării tensiunii de revenire la bornele canalului de arc.

Dezacordarea bobinei se realizează totdeauna în sensul unei supracompensări. Aceasta înseamnă că prin bobina de stingere trece un curent inductiv mai mare decât cel capacitiv, astfel încât curentul rezultat care alimentează arcul electric rămâne inductiv.

**b.** Rezultatele obținute sunt valabile în cazul unor linii scurte. Când liniile sunt lungi, trebuie să se țină seama de repartitia constantelor, iar condiția de stingere a arcului este reprezentată printr-o expresie mai complicată în care intervine impedanța caracteristică de secvență zero a liniei și impedanțele de secvență zero ale elementelor situate la cele două extremități. Această condiție prezintă particularitatea importantă că ea este independentă de poziția defectului pe linie; dacă bobina este bine reglată, stingerea arcului este asigurată oricare ar fi poziția defectului.

**c.** Curentul de punere la pământ se anulează teoretic numai în locul de defect; în linie, curentul crește cu distanța față de defect și devine maxim în bobină, unde admițând că tensiunea  $V_N$  a punctului neutru este egală cu tensiunea pe fază  $V$ , ia valoarea  $\frac{V}{X}$ .

Trebuie menționat însă că de fapt, curentul de defect nu devine niciodată nul, chiar dacă bobina este perfect acordată, deoarece există totdeauna un curent remanent, determinat de componentele active ale curentului de scurtcircuit și de armonicilor.

Reglarea corectă a inductanței bobinei din conexiunea neutrului poate conduce la reducerea aproape totală a curentului staționar de punere la pământ. O conturnare, de la linie la pământ, a unui izolator al unui stâlp determină, în orice împrejurare, un curent numai în primul moment al străpungerii. În continuare, curentul staționar se va reduce foarte mult prin efectul de rezonanță și arcul electric nu se va menține, dacă intensitatea curentului remanent nu depășește 30 A.

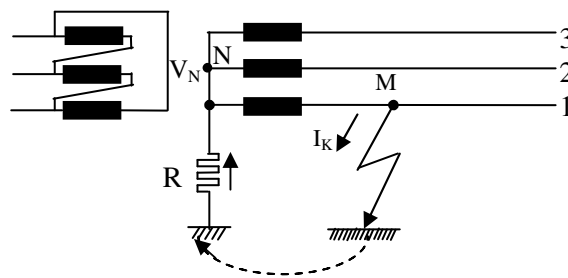
### **B. Legarea la pământ a neutrului prin rezistență**

Reducerea intensității curenților de scurtcircuit poate fi realizată și prin introducerea unei rezistențe în sistemul de legare la pământ a neutrului. În acest caz, tensiunea neutrului față de pământ nu rămâne constantă și poate lua valori suficient de mari.

Fie, de exemplu, rețeaua trifazată din figura 7 cu neutrul legat la pământ prin rezistența  $R$ , în care una din faze este pusă la pământ. Curentul de scurtcircuit monofazat are valoarea dată de relația:

$$I_K = \frac{V}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \quad (9)$$

în care s-a neglijat rezistența conductoarelor rețelei și a transformatorului în raport cu rezistența  $R$  și s-a considerat că  $L$  reprezintă inductanța proprie rezultantă a întregului circuit.



**Fig.7. Rețea trifazată cu neutrul legat la pământ prin rezistență**

Potențialul neutrului față de pământ este exprimat prin căderea de tensiune în rezistența R, produsă de curentul de scurtcircuit  $I_K$ :

$$V_N = I_K R = I_K \sqrt{\left(\frac{V}{I_K}\right)^2 - \omega^2 L^2} \quad (10)$$

în care a fost introdusă valoarea lui R reieșită din ecuația (9). Dacă se consideră  $I_{K_{\max}}$  curentul de scurtcircuit monofazat corespunzător legării directe la pământ a neutrului.

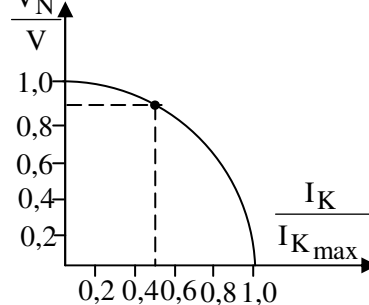
$$I_{K_{\max}} = \frac{V}{\omega L} \quad (11)$$

și se face raportul dintre potențialul neutrului și tensiunea pe fază, se obține:

$$\frac{V_N}{V} = \sqrt{1 - \left(\frac{I_K}{I_{K_{\max}}}\right)^2} \quad (12)$$

Această relație, reprezentată în diagrama circulară din figura 8, permite să se studieze variația potențialului  $V_N$  cu scăderea curentului de scurtcircuit monofazat. Se constată, de exemplu, că reducerea curentului la jumătate din valoarea sa maximă prin folosirea unei rezistențe, face ca potențialul punctului neutru față de pământ să fie:

$$V_N = V \sqrt{1 - (0,5)^2} = 0,867 V \quad (13)$$



**Fig.8.** Variația potențialului neutrului la scăderea curentului de scurtcircuit, prin introducerea unei rezistențe în conexiunea neutrului

Acest rezultat nu diferă mult de cel obținut în cazul unei rețele cu neutrul legat prin bobină de stingere sau cu neutrul izolat, când potențialul acestuia față de pământ este egal cu tensiunea pe fază. Introducerea rezistenței în circuitul neutrului are avantajul că anulează tensiunile de rezonanță, care se pot produce la bornele capacităților.

### 2.3 Rețele cu neutrul izolat față de pământ.

În aceste rețele, înainte de defect, potențialul neutrului este teoretic același cu cel al pământului, iar la producerea defectului acesta devine egal cu tensiunea simplă a rețelei. Prezența capacităților rețelei permite un schimb de energie între faza defectă și fazele sănătoase, iar intensitatea curentului la locul de defect este cu atât mai mare, cu cât capacitățile au valori mai ridicate, adică rețeaua legată galvanic este mai extinsă.

Dacă se consideră faza 1 pusă la pământ, conform figurii 9 rezultă că:

$$\underline{I}_c = \underline{I}_2 + \underline{I}_3 \quad (14)$$

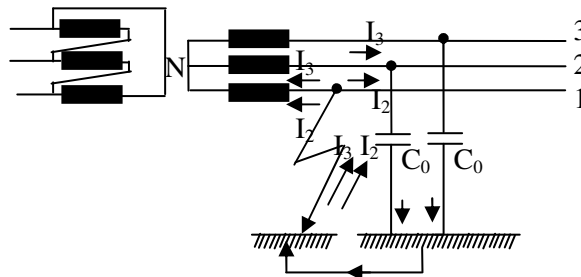
Deoarece curenții capacitivi  $\underline{I}_2$  și  $\underline{I}_3$  au intensități mult mai mici față de curenții de sarcină ai liniei, se poate considera că tensiunile pe faze, măsurate față de punctul neutru, nu se dezechilibrează în mod sensibil. Ca urmare, rețeaua va continua să funcționeze alimentând consumatorii cu energie electrică în condiții satisfăcătoare, cu toate că una dintre faze este pusă la pământ.

Deși tensiunile fazelor în raport cu punctul neutru al transformatorului rămân aproximativ aceleași ca în rețeaua fără defect, potențialul fazelor față de pământ se modifică. Astfel, potențialul față de pământ al fazei defecte este nul, iar al celor sănătoase crește cu  $\sqrt{3}$ , devenind egal cu tensiunea compusă. Corespunzător, cresc și curenții capacitivi ai fazelor sănătoase în raport cu regimul normal, care în cazul figurii 9 devin:

$$I_1 = 0; \quad I_2 = j\omega C_0 \underline{U}_2; \quad I_3 = j\omega C_0 \underline{U}_3 \quad (15)$$

Curentul de defect este determinat de relația (14).

Acest mod de tratare a neutrului creează în regim staționar supratensiuni pe fazele sănătoase, egale cu tensiunea compusă a rețelei. În cazul când la locul de defect apare un arc electric intermitent, ca urmare a fenomenelor tranzitorii, aceste supratensiuni pot crește de 3,5÷4 ori tensiunea pe fază a rețelei. Arcul electric intermitent și supratensiunile care-l însoțesc pot să persiste un număr mare de perioade, ceea ce va avea drept consecință străpungerea izolației rețelei și în alte puncte mai slabe, transformând punerea la pământ într-un scurtcircuit bifazat sau trifazat. Din această cauză trebuie luate măsuri de protecție a rețelei pentru evitarea unui astfel de arc.



*Fig.9. Rețea trifazată cu neutrul izolat*

Ținând seama de condițiile de stabilire a unui arc electric intermitent, se stabilește că exploatarea unei rețele cu neutrul izolat poate fi lipsită de pericolul supratensiunilor tranzitorii periculoase, în cazul rețelelor aeriene cu tensiuni nominale până la 35 kV, precum și pentru cele de 35 kV cu lungimi reduse, de ordinul a 30÷40 km.

Pentru, rețelele subterane apariția arcului electric intermitent este mai rară. De aceea, în acest caz, exploatarea rețelelor cu neutrul izolat este recomandabilă la tensiuni de 6÷10 kV, cu condiția ca intensitatea curentului de defect să nu depășească 10 A. Dacă această intensitate este depășită, atunci izolația cablului se poate distruge în locul de defect și punerea la pământ se transformă într-un scurtcircuit trifazat.

## ALEGEREA REZISTENȚEI DE TRATARE A NEUTRULUI

Datorită creșterii cureților capacitivi ai rețelelor în cablu, prin trecerea de la izolația cu hârtie la cea cu PVC și funcționării neselective a instalațiilor de protecție în unele cazuri, la nivel național s-a adoptat soluția tratării neutrului prin rezistență în rețelele de distribuție cu tensiunea 3...35 kV și curentul capacitiv de punere la pământ mai mare de 10 A. Rețelele existente tratate cu bobină de stingere vor fi trecute în timp la tratarea prin rezistență.

Prin utilizarea modului de tratare prin rezistență, aceasta modifică valoarea cureților de defect, punerea la pământ transformându-se într-un s.c. monofazat de valori controlabile.

Valoarea rezistenței ohmice se alege astfel încât să limiteze curentul de s.c. monofazat pe barele de m.t. la:

- 300 A pentru LEA și rețelele mixte cu un curent capacitiv (ec. (16)) până la 150 A;
- 600 A pentru LEC și rețelele mixte cu un curent capacitiv (ec. (16)) mai mare de 150 A;
- 1000 A pentru LEC realizate cu cabluri A2YSY sau cele cu ecran de plumb, însoțite pe traseu de un conductor de compensare.

$$C_o = \begin{cases} \text{tabelul 6.3 pg.138 IEE cabluri} \\ 5 \cdot 10^{-3} \mu\text{F} / \text{km LEA} \end{cases} \text{capacitatea specifică față de pământ}$$
$$I_c = 3 \cdot U_f \cdot \omega \cdot (C_t - C_l) \quad [A] \quad (16)$$

unde  $C_t$  – capacitatea pe fază a întregii rețele în raport cu barele, [ $\mu\text{F}$ ];

$C_l$  – capacitatea pe fază a liniei cu defect, [ $\mu\text{F}$ ].

Mărima rezistenței ohmice se determină din relațiile de calcul al curentului de s.c. monofazat limitat:

$$\underline{I}_k^{(1)} = \frac{3U}{(\sum R + 3R_N) + j\sum X} \quad (17)$$

unde  $U$  – tensiunea de fază a rețelei;

$\sum R = \sum R_+ + \sum R_- + \sum R_0$  suma rezistențelor de secvență ale rețelei până în locul de defect

$\sum X = \sum X_+ + \sum X_- + \sum X_0$  suma reactanțelor de secvență ale rețelei până în locul de defect

$R_N$  – valoarea rezistenței de limitare a curentului de s.c. monofazat.

Rezultă:

$$R_N = \frac{1}{3} \frac{\sqrt{(3U)^2 - (\sum X)^2 \cdot (I_{lim ita}^{(1)})^2}}{I_{lim ita}^{(1)}} - \frac{\sum R}{3} \quad (18)$$

Se alege din catalog (Tabelul 8.8 pg 241 IEEE) o rezistență superioară valorii calculate:

$$R_N \leq R_{cata log} \quad (19)$$