

9. REGIMURI ANORMALE ALE REȚELELOR ELECTRICE

9.1. TRATAREA NEUTRULUI

Rețelele electrice care se studiază sunt rețelele trifazate simetrice pentru că acestea sunt rețele generale și deci concluziile desprinse vor putea fi particularizate și pentru celelalte tipuri.

Rețelele trifazate se construiesc în două mari variante.

1. Cu neutrul izolat (Fig.9.1.a).
2. Cu neutrul tratat față de pamânt (Fig.9.1. b,c).

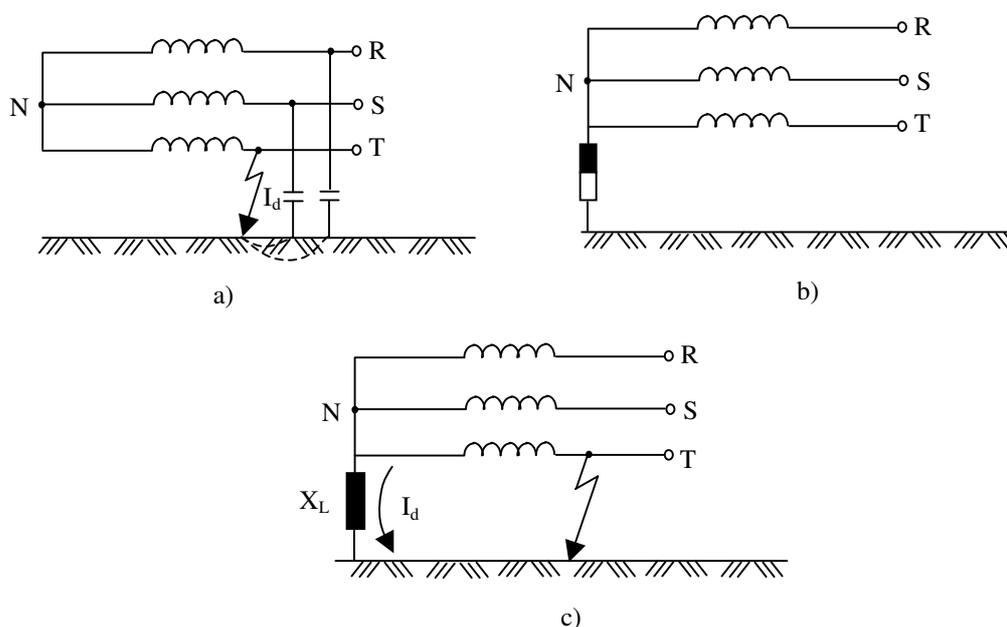


Fig.9.1. Tipuri de rețele trifazate

9.1.1. Rețea electrică cu neutrul izolat

În primul caz considerat și anume, pentru un sistem cu neutrul izolat față de pământ, punerea în contact cu pământul a uneia din faze se numește simplă punere la pământ sau punere la pământ.

În acest caz apare un curent de defect capacitiv pentru că acesta se închide prin capacitățile celorlalte faze față de pământ.

El are valoarea:

$$\begin{aligned}
 \underline{I}_d &= \frac{\underline{U}_R - \underline{U}_T}{j \frac{1}{\omega C}} + \frac{\underline{U}_S - \underline{U}_T}{j \frac{1}{\omega C}} = \frac{\omega C (\underline{U}_R + \underline{U}_S - 2\underline{U}_T)}{j} = \\
 &= \frac{\omega C (\underline{U}_R + \underline{U}_S + \underline{U}_T - 3\underline{U}_T)}{j} = j3\omega C \underline{U}_T \quad (9.1)
 \end{aligned}$$

pentru că $\underline{U}_R + \underline{U}_S + \underline{U}_T = 0$.

Deci valoarea curentului capacitiv este dependent de C și U_T .

În liniile electrice de medie tensiune și de joasă tensiune din cabluri (deci care au o capacitate) se admite un curent de punere la pământ $\leq 10A$. Un curent capacitiv $> 10A$ este inadmisibil pentru că determină supratensiuni periculoase pentru izolația fazelor sănătoase ale rețelelor.

Curenții capacitivi nu circulă permanent, ei generează o tensiune variabilă. Această variație în timp face ca arcul capacitiv să fie intermitent având o valoare maximă și o valoare minimă. Amorsarea repetată a arcului determină supratensiuni de până la 4 ori tensiunea nominală de fază.

Presupunem că în urma unui arc electric se mai pune la pământ o fază. În acest caz apare un scurtcircuit bifazat cu punere la pământ. Prin linie circulă astfel și curenții de scurtcircuit propriu-ziși.

La liniile de înaltă tensiune din cabluri sau aeriene se admit valori ale curenților capacitivi de defect de până la 30 A.

Valori mai mari ale curenților capacitivi de defect sunt inadmisibile pentru că ele conduc la supratensiuni periculoase pentru izolație și implică modificarea configurației rețelelor prin tratarea neutrului.

9.1.2. Rețele cu neutru tratat față de pământ

Se montează o impedanță inductivă (reactanță inductivă) X_L de la nul la pământ și în acest caz va apărea un curent de defect $I_d=0$ deoarece se determină valoarea reactanței X_L astfel încât curentul inductiv să fie egal cu suma curenților capacitivi la locul de defect.

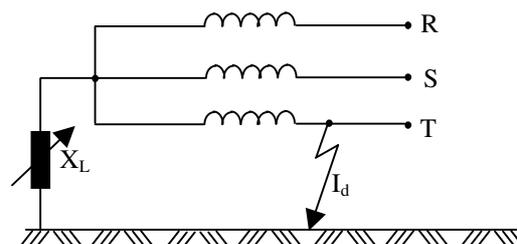
$$\underline{I}_L = \sum \underline{I}_c \quad (9.2)$$

rezultă $\underline{I}_d = 0$

$$\underline{I}_L = \frac{\underline{U}_N - \underline{U}_T}{j\omega L} = j \frac{\underline{U}_T}{\omega L} \quad (9.3)$$

$$\text{deci: } j \frac{\underline{U}_T}{\omega L} = j3\omega C \underline{U}_T \quad (9.4)$$

$$L = \frac{1}{3\omega^2 C} \quad (9.5)$$



c)

Fig.9.2. Rețea cu neutru tratat față de pământ

Bobina care se montează pe neutrul transformatoarelor poartă numele de bobină de stingere. Este important de făcut următoarea observație: dacă inductanța bobinei care se montează pe neutrul transformatorului s-ar dimensiona cu relația de mai sus ($L = \frac{1}{3\omega^2 C}$) atunci, prin locul de defect nu ar circula curent. Sistemul s-ar comporta ca și cum nu ar exista nici un defect din punct de vedere al defectului pe fază.

Fazele sănătoase ale sistemului ar fi suprasolicitate de tensiuni mari (supratensiuni generate de simpla punere la pământ). Astfel că în regim permanent de punere la pământ tensiunea pe fazele sănătoase ar fi mai mare cu $\sqrt{3}$.

Datorită și supratensiunilor generate de armonicile superioare, fazele sănătoase ar fi suprasolicitate. O simplă punere la pământ neizolată poate conduce la extinderea defectelor prin apariția de scurtcircuite bifazice sau trifazice. Pentru ca să poată fi sesizată simpla punere la pământ, inductivitatea bobinei de stingere se dimensionează prin supracompensarea curenților capacitivi.

În loc să alegem valoarea inductivității L la valoarea determinată prin calcul, se alege o inductivitate mai mică astfel încât curenții din punctul de defect să aibă aproximativ valoarea de 50 A și să aibă caracter inductiv și nu capacitiv pentru a nu încălca fazele sănătoase.

Valoarea inductanței L este cu 25 până la 15% mai mică decât valoarea calculată cu formula (9.5). Inductanța bobinei de stingere trebuie să fie reglabilă pentru că valoarea capacității rețelei se modifică odată cu modificarea configurației schemei sistemului. Modificarea inductanței trebuie să se facă continuu sau în trepte prin modificarea reluctanței circuitului magnetic.

Este indicat să se realizeze o automatizare a reglajului acestei inductanțe în funcție de valoarea curenților capacitivi ai sistemului.

9.1.3. Rețele electrice cu neutrul tratat prin legare la pământ direct

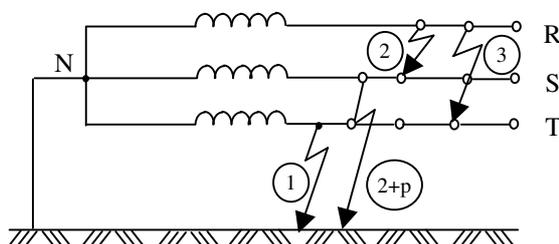


Fig.9.3. Rețea electrică cu neutrul legat la pământ

Pentru un astfel de sistem avem de-a face cu următoarele tipuri de defecte.

- ① Scurtcircuit monofazat.
- ② Scurtcircuit bifazat.
- ②+p Scurtcircuit bifazat cu punere la pământ.

③ Scurtcircuit trifazat.

Ținând seama și de defectele ce apar în cazul sistemelor cu neutru izolat se constată că există defecte comune ambelor categorii de sisteme. Defectele comune oricărui sistem electric indiferent de tratarea neutrului sunt:

- scurtcircuitate bifazate;
- scurtcircuitate bifazate cu punere la pământ;
- scurtcircuitate trifazate.

Alte tipuri de defecte care pot să apară sunt:

- întreruperea unei faze a sistemului.

Pentru alegerea echipamentelor de comutație primară, alegerea, verificarea și reglarea echipamentelor de protecție împotriva scurtcircuitelor, e necesar să știm să calculăm mărimile corespunzătoare acestor categorii de scurtcircuitate.

Echipamentele primare cât și cele de protecție trebuie să se aleagă și să se verifice astfel încât să suporte solicitările la cele mai mari mărimi de scurtcircuit și în plus echipamentele de protecție trebuie să sesizeze sigur și să izoleze rapid scurtcircuiturile care produc cele mai mari solicitări.

În sistemele "lungi" cu rețele ale căror impedanțe de scurtcircuit sunt mari, cei mai mari curenți, puteri de scurtcircuit (puteri de șoc, curenți de șoc) sunt date de scurtcircuitul trifazat metalic direct.

De aceea pentru început se calculează scurtcircuiturile trifazate directe (realizate prin contact metalic-contact direct, prin arc).

9.2. CALCULUL SCURTCIRCUITELOR TRIFAZATE, METALICE, DIRECTE

Frecvența acestor tipuri de scurtcircuitate este redusă (3÷5% din totalul scurtcircuiturilor). Cele mai frecvente sunt scurtcircuiturile asimetrice. Deși au o frecvență redusă, datorită faptului că solicitările termice și dinamice sunt pronunțat mai mari în cadrul sistemului (cu excepția scurtcircuiturilor produse direct la bornele generatorului) trebuie cunoscute.

Există trei metode de calcul pentru aceste tipuri de scurtcircuitate:

1. metoda mărimilor absolute;
2. metoda mărimilor relative;
3. metoda grafoanalitică.

9.2.1. Metoda mărimilor absolute

Considerăm un sistem electric compus din următoarele elemente:

- generator electric;
- transformator de bloc;

- linie electrică aeriană;
- un transformator coborâtor de tensiune;
- o bobină de reactanță;
- un cablu electric;
- un motor electric.

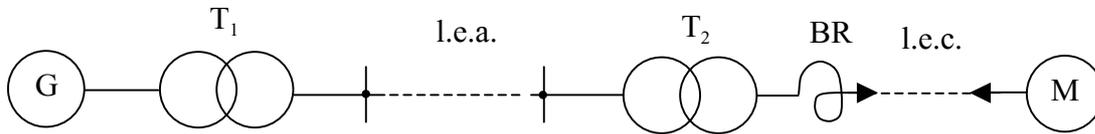


Fig.9.4. Schema sistemului electric

Metoda cuprinde parcurgerea mai multor etape:

a) Elaborarea schemelor electrice echivalente de scurtcircuit

a₁) Fixarea în cadrul sistemului a punctelor de scurtcircuit

- Se fixează punctele de scurtcircuit la bornele echipamentelor care se folosesc pentru conversia în energia electrică și invers a altor forme de energie precum și la bornele echipamentelor folosite pentru modificarea parametrilor energiei (generatoare, transformatoare, bobine de reactanță, motoare).
- Se fixează punctele de scurtcircuit în punctele unde se află montate aparate de comutație sau de măsură.

Obs: Prin echipamentele de comutație primară scurtcircuitul nu-și modifică esențial mărimile pentru că impedanța acestora influențează neglijabil curentul de scurtcircuit.

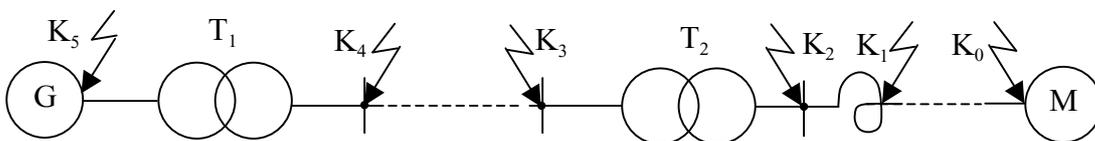


Fig.9.5. Schema sistemului electric cu punctele de scurtcircuit notate

a₂) Se notează punctele de scurtcircuit pornind de la consumator către sursă.

a₃) Se fixează din mulțimea punctelor de scurtcircuit punctul care ne interesează (K₀) și se introduc în calcul toate elementele dinspre sursă până la punctul care ne interesează.

În cazul scurtcircuitelor se neglijează rezistențele de scurtcircuit ale tuturor elementelor în afară de rezistența cablurilor electrice și a liniilor electrice aeriene de joasă tensiune.

Celelalte elemente sunt formate numai din reactanțe inductive. Se neglijează de asemenea parametrii transversali (rezistența de izolație, capacitățile liniilor). Se consideră că sistemul înainte de scurtcircuit și pe toată durata sa este simetric și sinusoidal și toate impedanțele de scurtcircuit pe fiecare fază sunt egale.

Se neglijează curenții nominali de sarcină în cazul scurtcircuitului, precum și aportul receptoarelor care funcționează în sistem la momentul producerii scurtcircuitului.

a₄) Se realizează schema echivalentă în reactanțe.

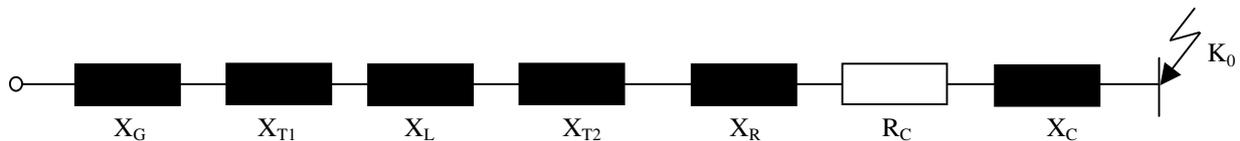


Fig. Schema echivalentă

b) Se stabilesc impedanțele de scurtcircuit din schema echivalentă

b₁) Pentru generator

Reactanța de scurtcircuit a generatorului se exprimă în procente din reactanța nominală a generatorului.

$$X_G = \frac{X_d'' \%}{100} \cdot \frac{U_{NG}^2}{S_{NG}} \quad (9.6)$$

$$X_{nG} = \frac{U_{NG}}{\sqrt{3}I_{nG}} \cdot \frac{U_{NG}}{U_{NG}} = \frac{U_{NG}^2}{S_{NG}} \quad (9.7)$$

X_d'' = reactanța longitudinală supratranzitorie a generatorului și are următoarele valori:

- la generatoare cu poli aparenti

$$X_d'' = 18 \div 20\% X_n$$

- la generatoarele cu poli înecați

$$X_d'' = 8 \div 14\% X_n$$

b₂) reactanța transformatoarelor se exprimă în raport cu tensiunea de scurtcircuit

Poate fi referită la tensiunea din primar sau la tensiunea din secundar.

$$X_{T(u_p)} = \frac{u_{sc} \%}{100} \cdot \frac{U_p^2}{S_{nT}} \quad (9.8)$$

$$X_{T(u_s)} = \frac{u_{sc} \%}{100} \cdot \frac{U_s^2}{S_{nT}} \quad (9.9)$$

b₃) Pentru linii electrice aeriene reactanța se calculează în raport cu reactanța specifică a liniei

$$X_L = X_{0l} \cdot L \text{ [km]} \quad (9.10)$$

$$X_{0l} = 0,4 \text{ } \Omega/\text{km} \quad (\text{LEA})$$

b₄) Pentru cabluri rezistența este dată de:

$$R_c = \rho \frac{l}{S} \quad \text{iar} \quad X_c = X_{0c} \cdot l_c \quad (9.11)$$

$$X_{0c} = 0,07 \div 0,11 \text{ } \Omega/\text{km}$$

b₅) Pentru bobinele de reactanță, reactanța lor este dată ca o caracteristică. Dacă nu este dată se calculează funcție de U_{nR} .

$$X_R = \frac{U_{nR}}{\sqrt{3}I_{nR}} \quad (9.12)$$

c) *Raportarea impedanțelor de scurtcircuit ale elementelor din schema echivalentă la aceeași tensiune și anume la tensiunea punctului de scurtcircuit.*

Fie o impedanță alimentată la tensiunea U .

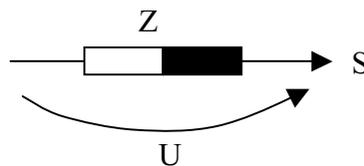


Fig.9.7. Impedanța Z

$$S = \sqrt{3}UI = \sqrt{3}U \frac{U}{\sqrt{3}Z} = \frac{U^2}{Z} \quad (9.13)$$

Facem ca prin impedanța Z să circule aceeași putere S dar la tensiunea U_1 . Atunci Z va avea teoretic altă impedanță Z_1 . De fapt se modifică numai curentul.

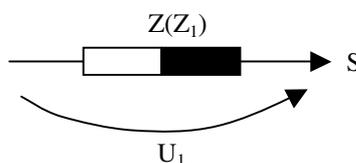


Fig.9.8. Raportarea impedației Z

$$S = \frac{U_1^2}{Z_1} = \frac{U^2}{Z} \quad (9.14)$$

rezultă:

$$Z_1 = Z \frac{U_1^2}{U^2} \quad (9.15)$$

În cazul schemei analizate facem raportarea tuturor impedanțelor din schemă la tensiunea U_{k_0} a punctului de scurtcircuit k_0 .

$$(X_G)_{U_{k_0}} = \frac{X_d'' \%}{100} \cdot \frac{U_{nG}^2}{S_{nG}} \cdot \frac{U_{k_0}^2}{U_{nG}^2} = \frac{X_d'' \%}{100} \cdot \frac{U_{k_0}^2}{S_{nG}} \quad (9.16)$$

În cazul transformatoarelor, indiferent dacă se ia reactanța transformatoarelor raportată la primar sau la secundar, se obține o singură valoare:

$$(X_T)_{U_{k_0}} = \frac{u_{sc} \%}{100} \cdot \frac{U_{k_0}^2}{S_{nT}} \quad (9.17)$$

Pentru linie se va calcula:

$$(X_L)_{U_{k_0}} = X_{oL} \cdot 1 \cdot \left(\frac{U_{k_0}}{U_L} \right)^2 \quad (9.18)$$

Pentru cablu se raportează și R_c și X_c la U_{k_0} . În cazul nostru ele sunt calculate chiar la tensiunea U_{k_0} . Același lucru se întâmplă și pentru bobina de reactanță.

d) Determinarea impedanțelor echivalente de scurtcircuit până în punctul K_0 unde se produce scurtcircuitul.

$$Z_{\Sigma K_0} = \sqrt{(\Sigma X_i)^2 + (\Sigma R_i)^2} \quad (9.19)$$

$$Z_{\Sigma K_0} = \sqrt{\left(X_{G_{k_0}} + X_{T_{1K_0}} + X_{L_{k_0}} + X_{T_{2K_0}} + X_R + X_C \right)^2 + R_C^2} \quad (9.20)$$

e) Calculul valorii curentului de scurtcircuit trifazat în punctul K_0

$$I_{sc_{K_0}}^{(3)} = \frac{U_{K_0}}{\sqrt{3} Z_{\Sigma K_0}} \quad (9.21)$$

Această valoare a curentului de scurtcircuit este supratranzitorie (valoarea curentului de scurtcircuit la timpul 0 de producerea acestuia și nu valoarea curentului de scurtcircuit permanent).

Puterea de scurtcircuit se calculează astfel:

$$S_{sc_{K_0}}^{(3)} = \sqrt{3} \cdot I_{sc_{K_0}}^{(3)} \cdot U_{K_0} \quad (9.22)$$

U_{K_0} =tensiunea nominală de linie a zonei în care s-a produs scurtcircuitul.

Valoarea curentului de șoc, care este cea mai mare valoare a curentului de scurtcircuit, va fi:

$$I_{soc_{K_0}}^{(3)} = K_{soc} \cdot I_{max\ sc_{K_0}}^{(3)} \quad (9.23)$$

$$I_{max\ sc_{K_0}}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot I_{sc_{K_0}}^{(3)} \quad (9.24)$$

$$I_{soc_{K_0}}^{(3)} = K_{soc} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{sc_{K_0}}^{(3)} \quad (9.25)$$

$$K_{soc} = \cos \omega t + e^{-\frac{t}{T}} \quad (9.26)$$

și are valorile:

$K_{soc}=1,8$ pentru scurtcircuite produse la tensiuni înalte: 110, 220, 400 KV;

$K_{soc}=1,6$ pentru scurtcircuite produse la tensiunea de: 35÷110 KV;

$K_{soc}=1,2\div 1,4$ pentru scurtcircuite produse la tensiunea de: 0,4; 6, 20 KV.

Există cazuri când nu se cunoaște exact configurația sistemului în ceea ce privește numărul de generatoare din cadrul sistemului. Se înlocuiește atunci sistemul printr-o singură putere de scurtcircuit a sistemului care poate fi cunoscută sau nu.

În practica de calcule de scurtcircuit, sistemele pot fi considerate de putere ∞ . Atunci reactanța sistemului:

$$X_s = \frac{U_s^2}{S_{sc}} = 0 \quad (9.27)$$

Există și sisteme cu putere de scurtcircuit finită. Puterea de scurtcircuit se poate da fie în mod direct și această putere are o valoare medie și corespunde zonei (de exemplu, în zona Olteniei puterea de scurtcircuit este $S_{sc}=4500\div 5000$ MVA).

Se calculează atunci:

$$X_s = \frac{U_{ns}^2}{S_{sc}} \quad (9.28)$$

Există cazuri când puterea de scurtcircuit a sistemului se poate cunoaște prin puterea de rupere a echipamentelor de comutație primară.

9.2.2. Calculul curenților de scurtcircuit folosind ca sistem de raportare de referință sistemul nominal de mărimi

Această metodă se aplică în cazul în care scurtcircuitele se produc în sisteme apropiate de sursă, adică în sisteme pentru care se cunosc generatoarele care debitează pe scurtcircuit cu toate caracteristicile lor.

Sistemul de referință pentru raportare este sistemul de mărimi nominale specifice generatoarelor care compun sistemul considerat. Aceste mărimi sunt cunoscute.

1) tensiunea nominală medie a generatoarelor

$$U_{n_{med.g.}} - \text{cunoscută} \quad (9.29)$$

2) puterea nominală a generatoarelor

$$S_{n_{g\Sigma}} = \sum_{k=1}^m S_{n_{gk}} - \text{cunoscută} \quad (9.30)$$

3) reactanța nominală a generatoarelor conectate în paralel

$$X_{n_{g\pi}}^{-1} = \frac{\sum_{k=1}^m S_{n_{gk}}}{U_{n_{med.g}}^2} - \text{se calculează} \quad (9.31)$$

$$\frac{1}{X_{n_{g\pi}}} = \frac{1}{X_{n_{g1}}} + \frac{1}{X_{n_{g2}}} + \dots + \frac{1}{X_{n_{gm}}} \quad (9.32)$$

unde:

$$X_{n_{gk}} = \frac{U_{n_{med.g}}}{\sqrt{3}I_{n_{gk}}} \cdot \frac{U_{n_{med.g}}}{U_{n_{med.g}}} = \frac{U_{n_{med.g}}^2}{S_{n_{gk}}} \quad (9.33)$$

Pentru generatoare se neglijează rezistența de scurtcircuit.

$$R_{n_{g\pi}} \cong 0 \quad (9.34)$$

4) Curentul nominal al generatoarelor conectate în paralel

$$I_{n_{\Sigma g}} = \sum_{k=1}^m \frac{S_{n_{gk}}}{\sqrt{3}U_{n_{med.g}}} - \text{se calculează} \quad (9.35)$$