

**NORMATIV PRIVIND METODOLOGIA DE CALCUL
AL CURENȚILOR DE SCURTCIRCUIT ÎN REȚELELE ELECTRICE CU
TENSIUNEA SUB 1 kV**

NTE 006/06/00

**Instituție responsabilă
de elaborarea
normei tehnice energetice: SC ELECTRICA S.A.**

Elaborator : S.C. ELECTRICA S.A.

Aprobat prin : Ordinul nr. 7 din 31.03.2006 al Președintelui ANRE

Înlocuiește : PE 134 - 2/1996

2006

CUPRINS

Normativ privind metodologia de calcul a curenților de scurtcircuit în rețelele electrice cu tensiunea sub 1 kV

CUPRINS	Pag.	
I. Scop	3	
II. Domeniu de aplicare	3	
III. Terminologie și abrevieri	4	
IV. Documente de referință	11	
V. Metode generale și ipoteze de calcul	11	
VI. Metode de calcul	13	
ANEXE	Pag.	
Anexa 1	Calculul curenților de scurtcircuit într-o rețea de JT	27
Anexa 2	Noțiuni privind metoda componentelor simetrice	43
Anexa 3	Relații de calcul pentru rezistențele și reactanțele elementelor de rețea	53
Anexa 4	Date caracteristice pentru transformatoare MT/JT kV	54
Anexa 5	Determinarea impedanței zero la transformatoarele MT/JT și rețea	57
Anexa 6	Valoarea rezistenței R și a reactanței pozitive X_L , pentru conductoare de Al neizolate la $f=50$ Hz	58
Anexa 7	Caracteristicile cablurilor de JT și ale cablurilor cu conductoare izolate torsadate	59
Anexa 8	Raportul dintre componenta zero și cea pozitivă ale impedanței pentru cablurile CYY și ACYY, în funcție de calea de întoarcere la $f=50$ Hz	60
Anexa 9	Parametrii cablurilor de joasă tensiune	61
Anexa 10	Impedanța unor elemente din circuitele electrice de joasă tensiune	65

NORMATIV PRIVIND METODOLOGIA DE CALCUL AL CURENȚILOR DE SCURTCIRCUIT ÎN REȚELELE ELECTRICE CU TENSIUNEA SUB 1 kV

I. SCOP

Art.1. Scopul normativului este de a prezenta o metodă practică de calcul a curenților de scurtcircuit într-o rețea de joasă tensiune. Această metodă corespunde riguros PE 134/1995 și conduce la rezultate prudente și suficient de exacte.

Art.2. Sunt luați în considerare doi curenți, care diferă în amplitudine:

a) curențul de scurtcircuit maxim care provoacă cele mai mari efecte termice și electromagnetice și care determină caracteristicile necesare ale echipamentului electric; corespunde regimului cu toate elementele sistemului energetic de distribuție în funcțiune (surse și rețea).

b) curențul de scurtcircuit minim care poate servi la reglajul dispozitivelor de protecție, la verificarea condițiilor de pornire a motoarelor ș.a; corespunde regimului cu număr minim de elemente (surse și rețea) care poate asigura alimentarea consumului.

II. DOMENIU DE APLICARE

Art.3. Prezentul normativ se referă la calculul curenților de scurtcircuit în rețelele de joasă tensiune de curent alternativ, cu frecvența nominală - 50 Hz. Ținând seama de practica mondială de exploatare în regim normal a acestor rețele, normativul se va referi numai la rețelele radiale de joasă tensiune [art.7, c].

Art.4. Normativul are la bază "Normativul privind metodologia de calcul a curenților de scurtcircuit în rețelele electrice cu tensiunea peste 1 kV" (PE 134/1995). El este aplicabil dacă condițiile simplificatoare de la art. 9 sunt îndeplinite.

III. TERMINOLOGIE ȘI ABREVIERI

Art.5. Pentru scopul acestui normativ se definesc următorii termeni referitori la instalații electrice cu tensiunea nominală sub 1 kV.

Defect	Modificarea locală a unui circuit electric (de exemplu ruperea unui conductor, slăbirea izolației).
Scurtcircuit	Legătura galvanică - accidentală sau voită, printr-o impedanță de valoare relativ redusă, între două sau mai multe puncte ale unui circuit care, în regim normal, au tensiuni diferite.
Scurtcircuit departe de generator	Un scurtcircuit în timpul căruia valoarea componentei simetrice de c.a. rămâne practic constantă.
Curent de scurtcircuit	Curentul care se încheie la locul de scurtcircuit, produs de un defect sau de o manevră incorectă într-o rețea electrică. <i>Curentul de scurtcircuit</i> este inițial asimetric în raport cu axa de timp și poate fi descompus într-o componentă de curent periodică (simetrică) și o componentă aperiodică (vezi fig. 1). Notă: se evidențiază diferența dintre curentul la locul de defect și curenții care circulă în ramurile rețelei după producerea scurtcircuitului.

Curentul aport la scurtcircuit	Curentul care parcurge laturile rețelei în condițiile unui scurtcircuit într-un punct al acesteia.
Curent de scurtcircuit (prezumat)	Curentul care ar circula dacă scurtcircuitul ar fi înlocuit cu unul ideal printr-o impedanță nulă, fără nici o modificare a alimentării.
Curentul de scurtcircuit simetric	Valoarea efectivă a componentei simetrice (a curentului alternativ c.a.) cu o frecvență egală cu cea de exploatare, componenta aperiodică a curentului fiind neglijată.
Curentul inițial de scurtcircuit I''_k	Valoarea efectivă a componentei simetrice a c.a. de scurtcircuit în momentul producerii scurtcircuitului, dacă impedanța rămâne constantă (fig.1).
Puterea de scurtcircuit inițială S''_k	Mărime convențională $S''_k = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I''_k$ unde U_N - tensiunea nominală a rețelei.
Curentul de scurtcircuit de șoc i_p ($i_{\text{șoc}}$)	Valoarea instantanee maximă posibilă a unui curent de scurtcircuit. Această valoare depinde în principal de momentul apariției scurtcircuitului (valoarea și faza tensiunii electromotoare). Calculul se face luându-se în considerare condițiile de fază și de moment în care se produc curenții maximi posibili.
Curentul de trecere I_D	Valoarea maximă instantanee a curentului care parcurge o siguranță fuzibilă sau bobina de declanșare a unui aparat de deconectare rapidă în timpul funcționării acesteia.
Curentul de rupere I_b (I_r)	Valoarea efectivă a unei perioade a componentei simetrice de c.a. la un scurtcircuit net în momentul separării contactelor primului pol al unui aparat de comutație.
Curentul permanent de scurtcircuit I_k	Valoarea efectivă a curentului de scurtcircuit stabilizat (fig.1). Această valoare depinde de caracteristicile rețelei și de caracteristicile reglajului de tensiune ale generatoarelor.
Curentul motorului asincron cu rotorul în scurtcircuit I_{RS}	Cea mai mare valoare efectivă a curentului unui motor asincron cu rotorul în scurtcircuit alimentat la tensiunea nominală U_{NM} și la frecvența nominală.
Circuit electric echivalent	Un model de descriere a funcționării unui circuit printr-o rețea cu elemente ideale.
Sursă de tensiune	Un element activ care poate fi reprezentat printr-o sursă ideală de tensiune independentă de toți curenții și toate tensiunile din circuit, în serie cu un element pasiv.
Tensiunea nominală a sistemului U_N	Este tensiunea prin care se denumește o rețea și la care se face referire pentru anumite caracteristici de funcționare a rețelei. Tensiunile nominale sunt standardizate.
Tensiunea de exploatare U	Valoarea medie a tensiunii la care este exploatată o rețea în regim normal. Valoarea acesteia este, de regulă, raportată la tensiunea nominală ($U/U_N - c$). Se consideră a fi tensiunea în punctul de scurtcircuit înainte de apariția acestuia.
Sursa echivalentă de tensiune c $U_N/\sqrt{3}$	Tensiunea sursei ideale, care se aplică în punctul unde se produce scurtcircuitul, în rețeaua de succesiune pozitivă, ca singura tensiune activă a sistemului (modul de calcul al scurtcircuitului se prezintă în art.13).

<p>Factorul de tensiune c</p>	<p>Raportul dintre tensiunea sursei echivalente de tensiune și tensiunea $U_N/\sqrt{3}$.</p> <p>Introducerea factorului c este necesară, deoarece pe de o parte tensiunea variază în timp și spațiu, datorită schimbării ploturilor la transformatoare, iar pe de altă parte, în cazul adoptării unor metode simplificate (în care se neglijează sarcinile și capacitățile), el are rolul unui factor de corecție.</p> <p>Valorile factorului de tensiune c sunt prezentate în Tabelul 1.</p>
<p>Impedanțe de scurtcircuit la locul de defect K.</p>	<p>Impedanța pozitivă (Z_k^+) (impedanța directă) a unui sistem trifazat de tensiune alternativă - impedanța pe fază într-un sistem de succesiune pozitivă (directă) văzută de la locul de defect K.</p> <p>Impedanța negativă (Z_k^-) (impedanța inversă) a unui sistem trifazat de tensiune alternativă - impedanța pe fază într-un sistem de succesiune negativă (inversă) văzută de la locul de defect K.</p> <p>Notă: în prezenta instrucțiune, care se referă la scurtcircuite departe de generator, se admite, în toate cazurile</p> $\underline{Z}^+ = \underline{Z}^-$ <p>Impedanța zero (Z_k^0) (impedanța homopolară) a unui sistem trifazat de tensiune alternativă - impedanța pe fază într-un sistem de succesiune zero (homopolară) văzută de la locul de defect K; se include și impedanța dintre neutru și pământ $3Z_N$.</p> <p>Impedanța de scurtcircuit a unui sistem trifazat (Z_k) - formă prescurtată de exprimare pentru impedanța pozitivă, în cazul calculului curenților de scurtcircuit trifazați.</p>
<p>Impedantele de scurtcircuit ale echipamentului electric</p>	<p>Impedanța de scurtcircuit pozitivă (Z^+) a unui echipament electric - raportul dintre tensiunea fază - neutru și curentul de scurtcircuit corespunzător fazei unui echipament alimentat de un sistem de tensiuni de succesiune pozitivă (fig. 2).</p> <p>Impedanța de scurtcircuit negativă (Z^-) a unui echipament electric - raportul dintre tensiunea fază - neutru și <i>curentul de scurtcircuit</i> corespunzător fazei unui echipament alimentat de un sistem de tensiuni de succesiune negativă (fig. 2).</p> <p>Impedanța de scurtcircuit zero (Z^0) a unui echipament electric - raportul dintre tensiunea pe fază (fază - pământ) și <i>curentul de scurtcircuit</i> al unei faze a echipamentului electric când acesta este alimentat de la o <i>sursă de tensiune</i> de tensiune alternativă, dacă cele trei conductoare de fază, paralele, sunt utilizate pentru alimentare și un al patrulea conductor și pământul drept conductor de întoarcere (fig. 2).</p>
<p>Timp minim de deconectare - t_{min}</p>	<p>Cel mai scurt timp între începutul unui <i>curent de scurtcircuit</i> și prima separare a contactelor unui pol al aparatului de deconectare.</p> <p>Timpul t_{min} este suma dintre timpul cel mai scurt de acționare al releului și cel mai scurt timp de deschidere al întreruptorului.</p>

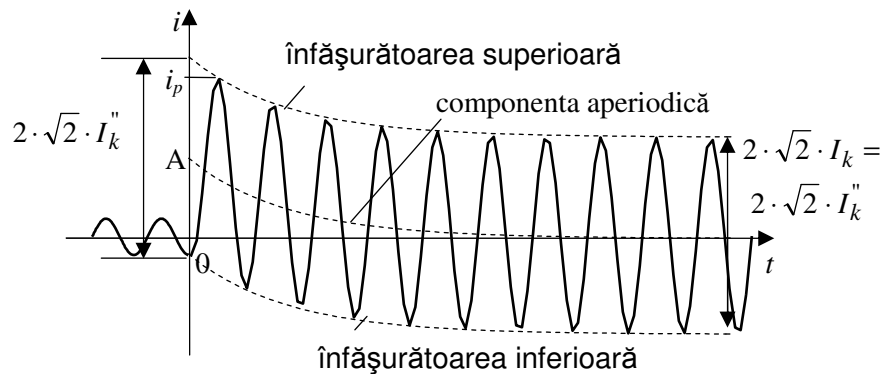
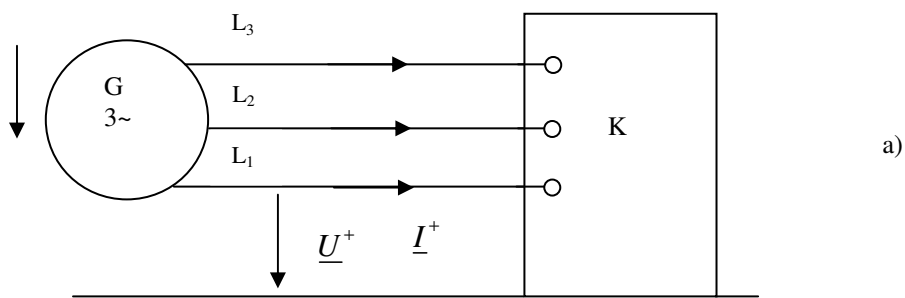


Fig. 1 – variația curentului de scurtcircuit în cazul unui defect departe de generator (reprezentare schematică):
 I_k'' – curentul inițial de scurtcircuit; i_p – curentul de scurtcircuit de șoc; I_k – curentul permanent de scurtcircuit.

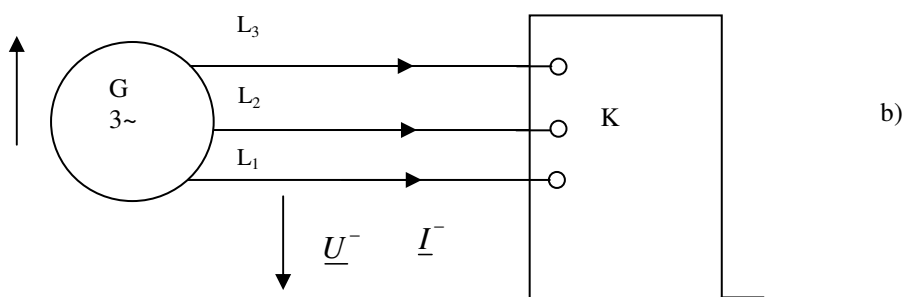
Valorile factorului de tensiune c

Tabel 1

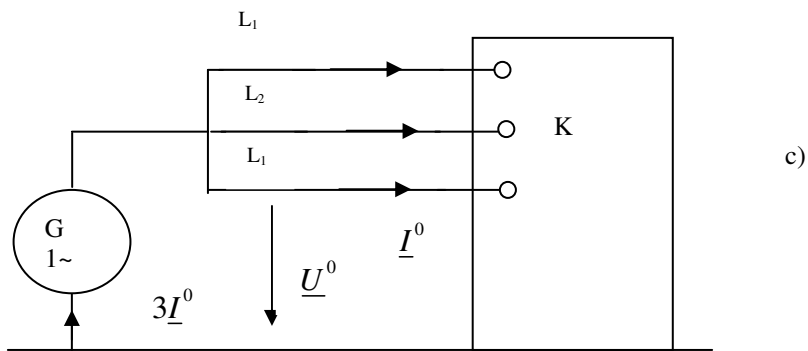
Tensiuni nominale U_N	Factorul de tensiune c pentru	
	Calculul curentului de scurtcircuit maxim	Calculul curentului de scurtcircuit minim
joasă tensiune: 100 V- 1000 V 230/400 V alte valori	1,00 1,05	0,95 1,00
medie tensiune: 1 – 20(35) kV	1,10	1,00



a) Impedanța pozitivă de scurtcircuit:
$$\underline{Z}^+ = \frac{\underline{U}^+}{\underline{I}^+}$$



b) Impedanța negativă de scurtcircuit:
$$\underline{Z}^- = \frac{\underline{U}^-}{\underline{I}^-}$$



c) Impedanța zero de scurtcircuit:
$$\underline{Z}^0 = \frac{\underline{U}^0}{\underline{I}^0}$$

Fig. 2 – Impedanța de scurtcircuit a unui sistem trifazat de tensiune alternativă la scurtcircuit în K

Art.6. Simboluri, indici și exponenți.

Simbolurile reprezintă mărimi care, într-un sistem coerent de unitate de măsură ca Sistemul Internațional (*SI*) - au valori numerice și dimensiuni diferite.

a) Simboluri

I''_k - curent inițial de scurtcircuit (valoare efectivă);

I_N - curentul nominal a unui echipament electric (valoare efectivă);

i_p ($i_{șoc}$) - curent de scurtcircuit de șoc (valoare instantanee);

I_D - curent de trecere;

I_b (I_l) - curent de rupere (valoare efectivă);

I_k - curent permanent de scurtcircuit (valoare efectivă);

I_{RS} - curentul de pornire al motorului asincron (valoare efectivă);

S''_k - puterea de scurtcircuit inițială;

S_N - puterea aparentă nominală a unui echipament electric;

P_{kT} - pierderile în înfășurările unui transformator la curentul nominal (putere activă);
(corespund pierderilor în înfășurare la proba de scurtcircuit trifazat $I_k=I_{nom}$)

U_N - tensiunea nominală, dintre faze, a unei rețele (valoare efectivă);

U - tensiunea de exploatare (valoare efectivă);

c - factorul de tensiune;

$cU_N/\sqrt{3}$ - sursa echivalentă de tensiune;

\underline{Z}^+ - impedanța de scurtcircuit pozitivă (directă);

\underline{Z}^- - impedanța de scurtcircuit negativă (inversă);

\underline{Z}^0 - impedanța de scurtcircuit zero (homopolară);

R, r - rezistența;

r_o - rezistența lineică (pe unitatea de lungime);

X sau x - reactanța;

x_o - reactanța lineică (pe unitatea de lungime);

U_k - tensiunea de scurtcircuit nominală a unui transformator, procente din tensiunea nominală;

U_R - căderea de tensiune rezistivă nominală într-un transformator, procente din tensiunea nominală;

l - lungimea unei linii;

t_{min} - timp minim de deconectare;

t - raportul de transformare nominal $t \geq 1$;

MA - motor asincron

η - randamentul motorului asincron;

χ - factor de șoc

G - generator

$\lambda (\cos \varphi)$ - factor de putere

ρ - rezistivitate

q_n - secțiunea nominală

b) Inidici

N - valoare nominală;

$K, K3$ - scurtcircuit trifazat (fig. 3 a);

$K2$ - scurtcircuit bifazat (fig. 3 b);

$K1$ - scurtcircuit monofazat, fază - neutru sau fază - pământ (fig. 3 c);

r - valoare raportată la o tensiune aleasă;

K - defect, locul de scurtcircuit (defect);

MT - medie tensiune;

JT - joasă tensiune;

L - linie;

M - motor;

S - punct de legătură a unei alimentare (sursă);

T - transformator.

c) Exponenți

- " - valoare inițială (supratranzitorie).
 - +
 -
 - 0
- componenta pozitivă (directă);
- componenta negativă (inversă);
- componenta zero (homopolară);

IV. DOCUMENTE DE REFERINȚĂ

Art.7. Prezentul normativ se bazează pe următoarele acte normative:

- a) Legea energiei electrice nr. 318/2003
- b) Procedură privind revizuirea prescripțiilor energetice în domeniile producerii, transportului, dispecerizării, distribuției, furnizării și utilizării energiei electrice și termice. Cod ANRE : 667.1.300.0.01.06/09/2002
- c) Normativ privind metodologia de calcul al curenților de scurtcircuit în rețelele electrice cu tensiunea peste 1 kV (PE 134/1995).
- d) SR EN 60909-0:2003, Curenții de scurtcircuit în rețelele trifazate de curent alternativ. Partea 0 : Calculul curenților.
- e) SR HD 472 S1:2002 + SR HD 472 S1:2002/A1:2002, Tensiuni nominale ale rețelelor electrice de distribuție publică de joasă tensiune.

Art.8. La elaborarea normativului s-au utilizat și următoarele materiale bibliografice :

- a) CEI 60909-2 :1992, Matériel électrique – Données pour le calcul des courants de court circuit conformément à la CEI 909 (1988).
- b) Berechnung von KurzschluBströmen in Drehstromnetzen, Anwendungsleitfaden für die Berechnung von KurzschluBströmen in Niederspannungsstrahlennetzen – Beiblatt 2 zu DIN VDE 0102.
- c) Switchgear Manual - ABB 10th edition – 1999 (in English 2001).
- d) Vagin G, Cecikov VA - Calculul curenților de scurtcircuit în rețelele de distribuție sub 1000 V (lb. rusă) Promâșlennaia energhetika, 12/1985.
- e) Gherhard Kiefer – VDE 0100 und die Praxis, Wegweiser für Anfänger und Profis 1999.

V. METODE GENERALE ȘI IPOTEZE DE CALCUL

Art.9. Calculul curenților de scurtcircuit conform prezentului normativ are în vedere următoarele condiții:

- a) scurtcircuitul este departe de generator și este alimentat într-un singur punct al rețelei de alimentare cu energie electrică;
- b) rețeaua de joasă tensiune considerată nu este buclată (chiar dacă constructiv este buclabilă, funcționarea ei este radială);
- c) valorile tensiunii de alimentare și impedanțele elementelor componente ale rețelei se consideră constante;
- d) nu sunt luate în considerare rezistențele de contact și impedanțele de defect;
- e) un scurtcircuit polifazat este simultan pe toate fazele;
- f) curenții de scurtcircuit nu sunt calculați pentru defectele interne ale unui cablu dintr-un ansamblu de cabluri în paralel;

- g) configurația rețelei nu se modifică pe durata scurtcircuitului. Numărul fazelor implicate în defect rămâne același (de ex. un scurtcircuit monofazat rămâne monofazat pe toată durata scurtcircuitului);
- h) capacitățile liniilor și admitanțele în paralel cu elementele pasive (sarcini) sunt neglijate;
- i) nu sunt luate în considerare duble puneri la pământ în puncte diferite;
- j) condițiile pentru neglijarea influenței motoarelor sunt date în art.14. Dacă nu sunt îndeplinite se va utiliza PE 134;
- k) comutatoarele de prize ale transformatoarelor se consideră pe poziția principală;
- l) se consideră impedanța pozitivă egală cu cea negativă.

$$\underline{Z}^+ = \underline{Z}^-$$

Art.10. În normativ sunt tratate următoarele tipuri de scurtcircuit reprezentate în figura 3:

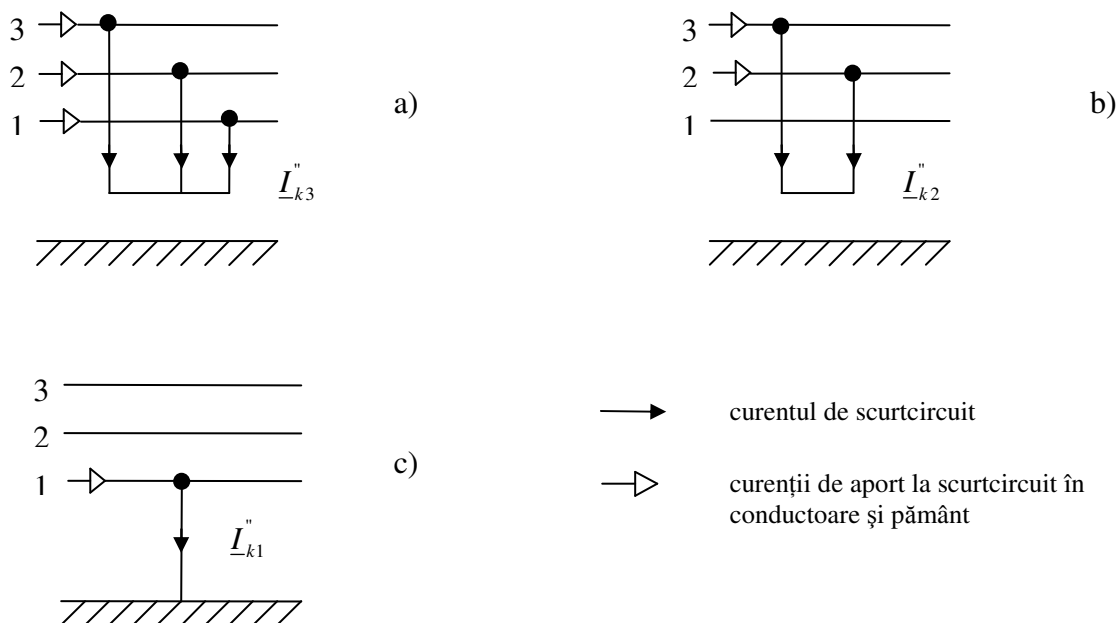


Fig. 3 Tipuri de curenți de scurtcircuit (sensul curenților este ales arbitrar):

- a) scurtcircuit trifazat simetric;
- b) scurtcircuit bifazat izolat;
- c) scurtcircuit fază - pământ (monofazat).

Art.11. Toate calculele se efectuează în S.I.

VI. METODE DE CALCUL

Art.12. Componente simetrice

Calculul *curenților de scurtcircuit* nesimetric este ușurat de utilizarea metodei componentelor simetrice [2, Anexa 2, tabel 2].

Pentru rețelele de joasă tensiune, depărtate de generator, analizate în prezentul normativ sunt considerate impedanțele de scurtcircuit pozitivă Z^+ și zero Z^0 (deoarece se admite $Z^+ = Z^-$).

Impedanța de scurtcircuit pozitivă Z^+ , la locul de scurtcircuit K se obține, cum rezultă din fig. 2 a, aplicând în K un sistem simetric direct de tensiuni. Toate mașinile rotative sunt considerate scurtcircuitate în amonte de impedanțele lor interne.

Impedanța de scurtcircuit zero Z^0 , la locul de scurtcircuit K se obține, cum rezultă din fig. 2 c, aplicând o tensiune alternativă între fazele scurtcircuitate și întoarcerea comună.

Art.13. Sursă de tensiune echivalentă în punctul de scurtcircuit

Curentul de scurtcircuit în punctul de scurtcircuit K este obținut cu ajutorul unei *surse de tensiune echivalentă* aplicată în rețeaua directă, în acest punct K .

Tensiunea acestei surse este $c \cdot U_N / \sqrt{3}$ și este singura tensiune activă din rețea. Toate celelalte tensiuni active (ale rețelelor de alimentare, mașinilor sincrone și asincrone) sunt anulate, adică sunt scurtcircuitate în amonte de impedanțele lor interne. Conform paragrafului 3, toate capacitățile liniilor și admitanțele paralele (sarcinile) sunt neglijate.

Factorul c depinde de tensiunea rețelei și diferă după cum se efectuează calculul pentru curentul de scurtcircuit minim sau maxim. Valorile factorului c se va lua conform tabelului 1.

Art.14. Considerente privind neglijarea influenței motoarelor asincrone la scurtcircuit

Motoarele asincrone racordate la MT și JT sunt elemente dinamice ale sistemului electroenergetic care contribuie la *curentul inițial de scurtcircuit simetric I_k''* , la *curentul de scurtcircuit de soc i_p* , la *curentul simetric de rupere I_b* și în cazul scurtcircuitelor nesimetrice contribuie și la valoarea *curentului de scurtcircuit I_k* .

În rețelele de joasă tensiune, motoarele asincrone au utilizări multiple în instalațiile industriale, în stațiile de pompare, la serviciile interne din centralele și stațiile electrice. ș.a

Contribuția motoarelor asincrone, la *curentul de scurtcircuit I_k''* în cadrul rețelelor de joasă tensiune, poate fi neglijată dacă nu este mai mare de 5% față de curentul de scurtcircuit inițial calculat fără influența motoarelor. Aceasta revine la o verificare că suma curenților motoarelor conectate direct la rețea, nu prin intermediul transformatoarelor, nu depășește 1% din curentul inițial de scurtcircuit simetric fără influența motoarelor.

$$\sum I_{NM} \leq 0,01 I_k'' \quad (1)$$

unde $\sum I_{NM}$ - suma curenților motoarelor

Impedanța $\underline{Z}_M = R_M + jX_M$ motoarelor asincrone de succesiune pozitivă și negativă poate fi determinată cu formula:

$$Z_M = \frac{1}{I_{RS} / I_{NM}} \cdot \frac{U_{NM}}{\sqrt{3} I_{NM}} \quad (2)$$

unde:

- U_{NM} tensiunea la care este alimentat motorul
- I_{RS} curentul motorului asincron cu rotorul în scurtcircuit (curentul de pornire)
- I_{NM} curentul nominal al motorului asincron conectat direct la rețea
- I_{RS} / I_{NM} raportul curentului de pornire a motorului asincron pe curentul nominal

Pentru calculul curentului inițial de scurtcircuit, motoarele asincrone pot fi înlocuite prin impedanțele lor de succesiune pozitivă și negativă.

Impedanța zero a motorului asincron ar trebui dată de producător.

Uzual motoarele asincrone de joasă tensiune sunt conectate la bara de alimentare prin cabluri de diferite lungimi și secțiuni.

Pentru simplificarea calculului acolo unde intervin mai multe motoare se poate considera un singur motor echivalent.

La bara la care sunt racordate (U_{NM} considerat $U = 0,4 \text{ kV}$)

$$\Sigma S_{NM} = \Sigma \frac{P_{NM}}{\eta_N \lambda_N} \quad (3)$$

$$\text{iar:} \quad \Sigma I_{NM} = \frac{\Sigma S_{NM}}{\sqrt{3} U_{NM}} \quad (4)$$

în care:

I_{NM} - curentul nominal al motorului;

S_{NM} - puterea aparentă a motorului;

P_{NM} - puterea activă nominală a motorului;

η_N - randamentul nominal;

λ_N - factorul de putere nominal.

I''_k - curentul de scurtcircuit simetric inițial în lipsa motoarelor

Evident, dacă aportul motoarelor asincrone poate fi neglijat la bara la care sunt racordate el va putea fi neglijat și la celelalte bare, mai departe de locul de conectare directă a motoarelor.

Dacă sunt motoare la mai multe niveluri de tensiune și în alte cazuri, se vor folosi prevederile din PE 134 pentru rețele electrice cu tensiuni peste 1 kV.

Art.15. Impedanțele de scurtcircuit**a) Rețeaua de alimentare cu $U_N > 1$ kV**

Rețeaua de alimentare cu $U_N > 1$ kV (de regulă de medie tensiune) se caracterizează prin curentul de scurtcircuit pe care l-ar genera în cazul unui scurtcircuit la bara de înaltă tensiune.

În figura 4 se reprezintă un scurtcircuit pe partea de joasă tensiune a unui transformator alimentat dintr-o rețea de medie tensiune.

Sursa rețelei o constituie chiar transformatorul care face legătura între înaltă și joasă tensiune.

În rețeaua de alimentare transformatoarele, cablurile, liniile aeriene, bobinele au impedanțele de succesiune pozitivă și negativă egale.

Pentru rețeaua de medie tensiune se cunoaște *curentul de scurtcircuit simetric inițial* I''_{ks} la nivelul barelor colectoare și implicit - $S''_k = \sqrt{3} U_{N.MT} I''_{ks}$. Cu aceste date se poate determina valoarea absolută a *impedanței de scurtcircuit*:

$$Z_S = \frac{c U_{NS}}{\sqrt{3} I''_{ks}} = \frac{c U_{NS}^2}{S''_k} \quad (5)$$

- unde c este factorul de tensiune relativ la bara sursei, conform tabelului 1 care a fost utilizat la determinarea lui I''_{ks} .

Pentru calculul *curenților maximi și minimi de scurtcircuit* se vor utiliza diferitele valori I''_{ksmax} și I''_{ksmin} .

Dacă nu se cunoaște I''_{ksmin} , se poate utiliza Z_S calculat pentru curentul maxim și la determinarea solicitărilor minime de scurtcircuit.

Curenții I''_{ks} minimi și maximi vor fi calculați conform PE 134 și ei pot include și aportul motoarelor la tensiunea respectivă.

Dacă nu se cunosc cu exactitate R și X ale sursei din înaltă tensiune se poate considera că

$$R_s = 0,1 X_s \quad (6a)$$

$$X_s = 0,995 Z_s \quad (6b)$$

Iar dacă se cunoaște raportul R_s/X_s , ținând seama de faptul că I''_{ks} (respectiv Z_S) cunoscut se poate determina impedanța și reactanța de scurtcircuit în punctul S.

$$X_s = \frac{Z_s}{\sqrt{1 + (R_s / X_s)^2}} \quad (7)$$

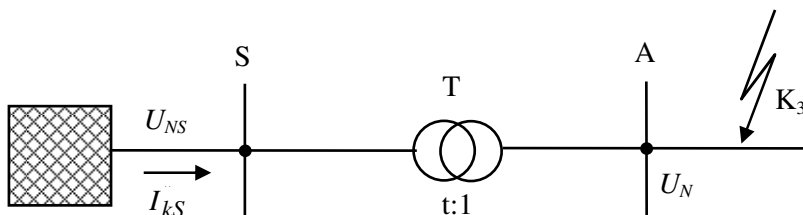
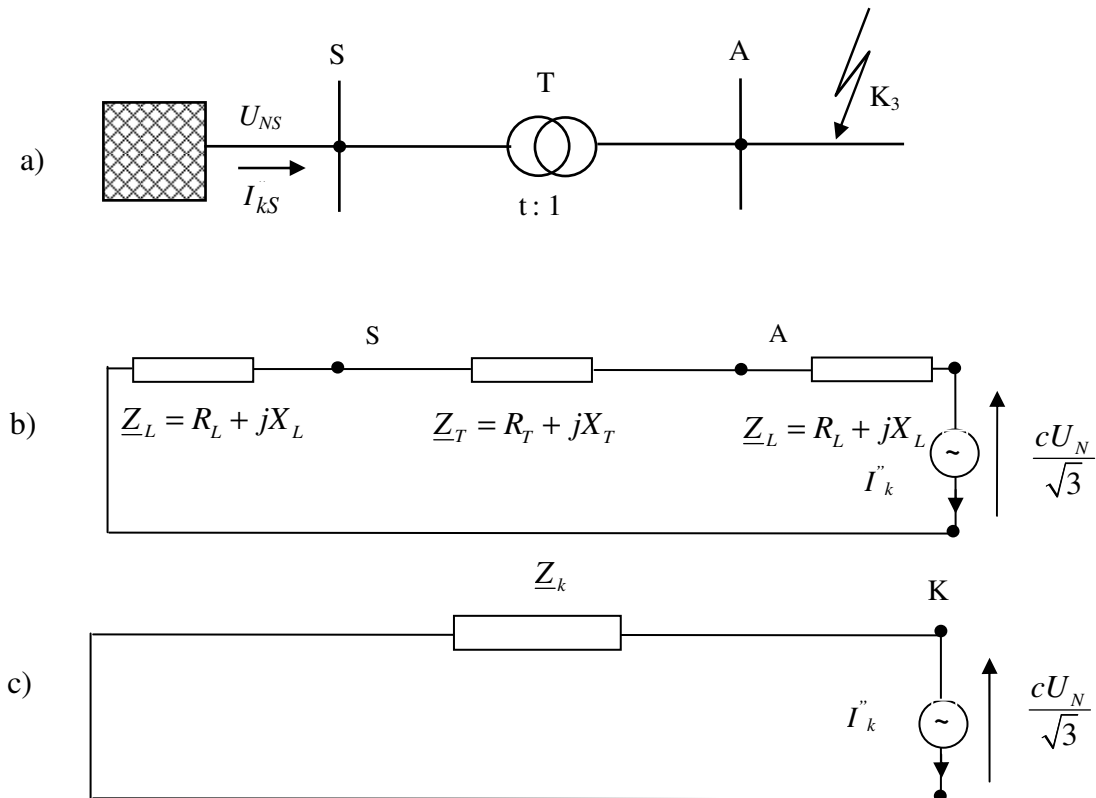


Fig. 4 – Scurtcircuit pe partea de joasă tensiune a unui transformator alimentat dintr-o rețea de MT.

În general nu este necesară cunoașterea impedanței zero a rețelei de alimentare deoarece cea mai mare parte a transformatoarelor (prin conexiunea lor) decuplează sistemele zero ale sursei de cele ale rețelei de joasă tensiune.

R_s , X_s , Z_s vor trebui raportate la tensiunea punctului K de scurtcircuit.



$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_d = (R_{sr} + j X_{sr}) + (R_T + j X_T) + (R_L + j X_L) = (R_{sr} + R_T + R_L) + j (X_{sr} + X_T + X_L) \quad (8)$$

Fig. 5 Exemplificarea calculului curentului de scurtcircuit simetric inițial I''_k utilizând metoda sursei echivalente de tensiune:

- schema rețelei;
- schema rețelei echivalente de succesiune directă;
- schema echivalentă de calcul, cu impedanța \underline{Z}_k de scurtcircuit.

În anexa 3 sunt prezentate relații de calcul pentru rezistențele și reactanțele elementelor de rețea.

b) Transformatoare

Impedanța de scurtcircuit pozitivă a transformatoarelor cu două înfășurări

$$\underline{Z}^+ = \underline{Z}_T = R_T + j X_T \quad \text{unde:} \quad (9a)$$

$$Z_{T,jt} = \frac{u_k(\%) \cdot U_{N,jt}^2}{100 \cdot S_{NT}} \quad (9b)$$

$$R_{T,jt} = P_{kT} \frac{U_{N,jt}^2}{S_{NT}^2} = \frac{P_{kT}}{3I_{N,jt}^2} = \frac{u_R(\%) \cdot U_{N,jt}^2}{100 \cdot S_{NT}} \quad (9c)$$

$$X_{T,jt} = \sqrt{Z_{T,jt}^2 - R_{T,jt}^2} \quad (9d)$$

unde:

U_N - tensiunea nominală;

S_{NT} - puterea nominală a transformatorului;

u_k - tensiunea de scurtcircuit;

P_{kT} - pierderile totale în înfășurare la curentul nominal;

$I_{N,jt}$ - curentul nominal de j.t. [A]

u_R - pierderea procentuală în înfășurare: $u_R = \frac{P_{kT}}{S_N} 100\%$

Dacă nu se cunosc valorile parametrilor transformatoarelor se pot folosi datele pentru transformatoare produse în România [Anexa 4].

Raportul de transformare R_T/X_T scade în funcție de mărimea transformatorului.

Impedanța de scurtcircuit de succesiune zero a transformatoarelor pe partea de joasă tensiune depinde de conexiunea acestuia și este obținută de la constructorul acestuia sau în lipsa acestor informații, utilizând rapoarte X_0/X_{TS} și R_{0T}/R_{Tjt} . (Anexa 5).

Pentru alte tipuri de transformatoare, în afara celor cu două înfășurări, se vor utiliza indicațiile din PE 134/1995 pentru rețele cu tensiune peste 1 kV.

c) Linii aeriene și cabluri

Impedanțele Z_L^+ și Z_L^0 , ale liniilor aeriene și ale cablurilor depind de tipul constructiv și sunt date de proiect.

Impedanța pozitivă de scurtcircuit:

$$Z^+ = \sqrt{R_L^2 + X_L^2} \quad \text{și} \quad \underline{Z}_L^+ = \underline{Z}_L^- = R_L + jX_L \quad (10)$$

Rezistența $R_L = l r_o$; l - lungimea liniei și r_o - rezistența lineică. r_o efectivă este funcție de temperatură. Pentru calculul curentului maxim temperatura conductorului se va considera egală cu 20° C.

$$r_0 = \frac{\rho}{q_n} \quad (11)$$

La 20° C rezistența unui conductor cu secțiunea q_n și rezistivitate ρ va fi:

$$\begin{aligned} \rho \text{ este:} & \quad - \text{ pentru cupru} & \quad \frac{1}{54} \frac{\Omega \text{mm}^2}{m} \\ & \quad - \text{ pentru aluminiu} & \quad \frac{1}{34} \frac{\Omega \text{mm}^2}{m} \\ & \quad - \text{ pentru aliaje de aluminiu} & \quad \frac{1}{31} \frac{\Omega \text{mm}^2}{m} \end{aligned}$$

Pentru calculul curentului minim, trebuie luată în considerare temperatura la sfârșitul scurtcircuitului (θ_e). Rezistența va fi:

$$R_L = [1 + 0,004 (\theta_e - 20^\circ)] R_{L20} \quad (12)$$

Reactanța $X_L = l x_0$, unde x_0 este reactanța specifică.

Impedanța zero de scurtcircuit Z_L^0 depinde de calea de întoarcere a curentului. Ea este determinată cu ajutorul rapoartelor R_L^0/R_L și X_L^0/X_L , prin măsurători sau calcul (Anexa 7,8).

d) Motoare asincrone

Reactanța unui motor asincron, conectat direct în rețeaua electrică, se determină cu relația:

$$X_M = \frac{I}{\frac{I_{RS}}{I_{NM}}} \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3} I_{NM}} \quad (13)$$

în care: I_{RS} - curentul de pornire

În lipsa altor date, raportul I_{RS}/I_{NM} se poate lua egal cu 6.

U_N, I_N - tensiunea nominală - respectiv curentul nominal al motorului.

Dacă sunt mai multe motoare identice (n) reactanța echivalentă va fi:

$$X_e = \frac{U_N}{\sqrt{3} n I_{RS}} \quad (14)$$

Se menționează că impedanțele de legătură a motoarelor la bara la care se produce scurtcircuitul, se neglijează.

e) Motoare sincrone

Motoarele sincrone se consideră în calculul curenților de scurtcircuit modelate prin reactanța supratranzitorie (x''_d) - pentru calculul curentului I''_k și respectiv prin reactanța tranzitorie (x'_d) pentru calculul curentului de rupere.

f) Impedanța altor elemente

Pentru calculul curentului minim de scurtcircuit, poate fi necesar să se țină seama de impedanțele altor elemente ca barele colectoare, transformatoarele de curent, ș.a (Anexa 10).

g) Raportarea impedanțelor

Pentru calculul curentului de scurtcircuit la joasă tensiune, toate impedanțele de pe partea de înaltă (medie) tensiune ale rețelei trebuie aduse la acest nivel de tensiune. Aceasta se face cu ajutorul raportului de transformare t , conform relației (10), raport care poate fi cel nominal sau cel uzual utilizat.

$$t = \frac{U_{NTMT}}{U_{NTJT}} \quad (15)$$

Impedanțele de pe partea de MT sunt raportate astfel:

$$Z_{Ntr} = \frac{Z_{MT}}{t^2} \quad (16)$$

Indicele r a fost introdus pentru a indica faptul că este valoare raportată la joasă tensiune.

Art.16. Calculul curenților de scurtcircuit (vezi tabel 2)

a) Calculul curenților de scurtcircuit trifazat simetric

În fig. 5 sunt prezentate etapele de calcul a unui *scurtcircuit trifazat simetric* într-o rețea radială alimentată printr-un transformator. Tensiunea *sursei echivalente* din punctul K de scurtcircuit este singura sursă activă a rețelei. Toate celelalte tensiuni sunt anulate. Toate impedanțele sunt luate în considerare în impedanța Z_S .

Un calcul complet de scurtcircuit trebuie să dea variația în timp a curenților la punctul de scurtcircuit, de la începutul acestuia până la eliminarea lui, în corelație cu valorile instantanee ale tensiunii la începutul scurtcircuitului.

Evoluția curentului de scurtcircuit este direct influențată de poziția locului de scurtcircuit față de sursa de alimentare.

În cazul studiat, în care scurtcircuitul este departe de generator acesta poate fi considerat ca fiind suma a două componente:

- componenta periodică cu o amplitudine constantă pe întreaga perioadă a scurtcircuitului

- componenta aperiodică care la început are o valoare inițială iar apoi tinde către zero

Pentru calculul curenților de scurtcircuit într-un sistem cu generatoare, posturi de transformare, motoare, etc., nu numai aflarea *curentului inițial de scurtcircuit simetric* I_k'' și *curentul de șoc*, este necesară dar și *curentul de scurtcircuit simetric de rupere* I_b cât și *curentul permanent* I_k .

În acest caz *curentul de scurtcircuit simetric de rupere* I_b este mult mai mic decât *curentul inițial de scurtcircuit simetric* I_k'' dar *curentul de scurtcircuit permanent* I_k este mai mic decât *curentul de scurtcircuit simetric de rupere* I_b .

Pentru calculul *curentului inițial de scurtcircuit simetric* este permis să considerăm impedanța pozitivă egală cu impedanța negativă.

Tipul de scurtcircuit care conduce la curentul maxim de scurtcircuit depinde de valoarea impedanței de succesiune pozitivă, negativă și respectiv zero.

Pentru a calcula *curentul inițial de scurtcircuit simetric* I_k'' , *curentul de scurtcircuit simetric de rupere* I_b cât și *curentul de scurtcircuit permanent* I_k , la locul unde apare scurtcircuitul, sistemul se reduce la o impedanță echivalentă de scurtcircuit Z_S la locul de scurtcircuit. Această procedură nu este însă valabilă pentru calculul *curentului de scurtcircuit de șoc* i_p . În acest caz, este necesar să facem o distincție între rețelele ramificate și neramificate.

În calculul curenților maximi de scurtcircuit de joasă tensiune nu se i-au în considerare impedanțele unor elemente ca: bare colectoare, transformatoare de curent, contacte, etc.

a.1) Curentul inițial de scurtcircuit - I_k''

Cu tensiunea sursei echivalente, $c U_N \sqrt{3}$ în K , punctul de scurtcircuit (art.13 și tabel 2) și impedanța Z_S ($Z_S = Z^+$) *curentul de scurtcircuit simetric inițial* se determină cu relația:

$$I_k'' = \frac{c U_N}{\sqrt{3} Z_k} \quad (17)$$

a.2) Curentul de scurtcircuit de șoc – i_p

Curentul de scurtcircuit de șoc este dat de relația:

$$i_p = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' \quad (18)$$

Factorul χ în funcție de raportul R/X sau X/R al impedanței echivalente de scurtcircuit se obține din figura 6. R respectiv X reprezintă valorile echivalente ale acestora, de la sursă la punctul de scurtcircuit (pentru exemplificare vezi figura 5).

Factorul poate fi și calculat cu ecuația aproximativă:

$$\chi \approx 1,02 + 0,98e^{-3R/X} \quad (19)$$

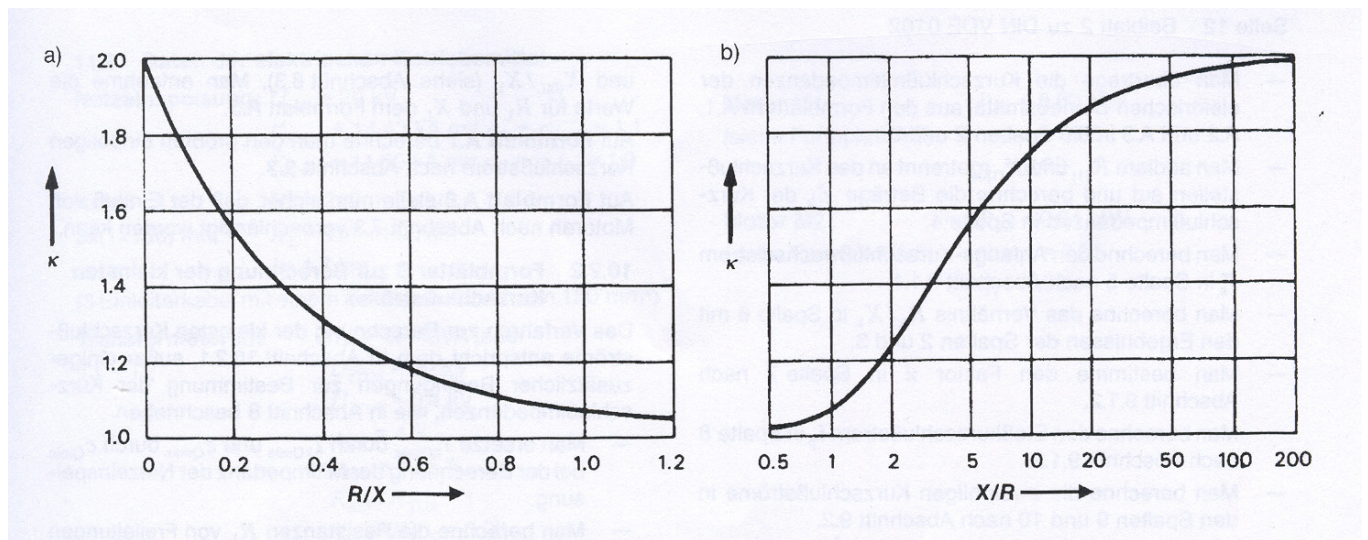


Fig.6 Factor de șoc χ pentru circuite serie ca o funcție de:
a – raportul R/X ; b – raportul X/R .

a.3) Curenții de scurtcircuit simetric de rupere I_r și permanent I_k

Pentru un scurtcircuit departe de generator, curentul de scurtcircuit simetric de rupere I_b și curentul de scurtcircuit permanent I_k sunt egali cu curentul de scurtcircuit inițial I''_k :

$$I_b = I_k = I''_k \quad (20)$$

b) Curentul de scurtcircuit bifazat

În timpul scurtcircuitului impedanța de succesiune negativă este aproximativ egală cu impedanța de succesiune pozitivă indiferent de locul unde apare scurtcircuitul, aproape sau departe de generator.

La tensiunea sursei echivalente $c \cdot U_N / \sqrt{3}$ aplicată în punctul de scurtcircuit K și cu impedanța de scurtcircuit pozitivă $Z^+ = Z_S = Z$, curentul inițial de scurtcircuit bifazat este dat de relația:

$$I''_{k2} = \frac{cU_N}{2Z^+} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_k \quad (21)$$

unde I_k este dat de relația (17)

Curentul de scurtcircuit de șoc i_{p2} :

$$i_{p2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_p \quad (22)$$

unde i_p este dat de relația (18)

Pentru un scurtcircuit bifazat (izolat de pământ) factorul χ este același ca pentru un scurtcircuit trifazat, cu ipotezele acceptate în acest normativ.

c) Curent de scurtcircuit monofazat (fază - pământ)

Cu tensiunea sursei echivalente $c \cdot U_N / \sqrt{3}$ aplicată în punctul de scurtcircuit K , impedanța pozitivă \underline{Z}^+ și impedanța zero \underline{Z}^0 , curentul de scurtcircuit inițial este dat de relația:

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3}cU_N}{2 \cdot \underline{Z}^+ + \underline{Z}^0} \quad (23)$$

sau curentul de șoc – i_{p1} :

$$i_{p1} = \chi \sqrt{2} I''_{k1} \quad (24)$$

Pentru simplificare, χ poate fi luat cu aceeași valoare ca în cazul scurtcircuitului trifazat.

În rețelele cu neutrul izolat nu există curent de scurtcircuit monofazat

Pentru calculul curenților de punere la pământ în rețelele de joasă tensiune care pot apare în acest caz se vor folosi indicațiile din PE 134/1995 pentru rețele cu tensiunea peste 1 kV.

d) Aportul motoarelor asincrone la curentul de scurtcircuit

Dacă condiția exprimată de relația (1) nu este realizată, se determină aportul motoarelor asincrone:

- la scurtcircuit trifazat

$$I''_{kM3} = U_N / X_M \quad (25)$$

$$I_{pM3} = \chi_M \sqrt{2} I''_{kM3} \quad (26)$$

$$I_{bM3} = I''_{kM3} \quad (27)$$

$$I_{kM3} = 0 \quad (28)$$

- la scurtcircuit bifazat

$$I''_{kM2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_{kM3} \quad (29)$$

$$i_{pM2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_{pM3} \quad (30)$$

$$I_{bM2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_{kM3} \quad (31)$$

$$I_{kM2} = \frac{1}{2} \cdot I''_{kM3} \quad (32)$$

- la scurtcircuit monofazat

$$I''_{kM1} = 0 \quad (33)$$

Notă:

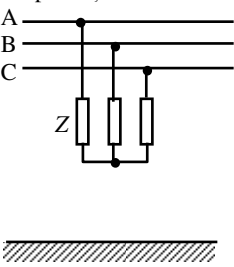
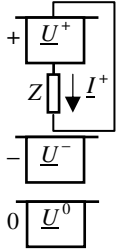
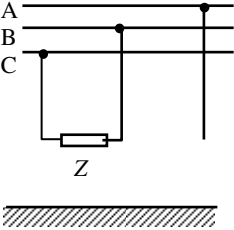
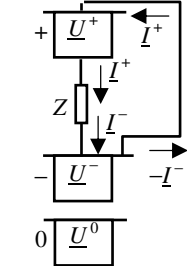
Pentru situația în care $X^+ = X$, în funcție de raportul $\frac{X^0}{X^+}$ raportul între curenții de scurtcircuit trifazat sau monofazat se modifică:

$$\text{dacă } \frac{X^0}{X^+} < 1 \Rightarrow I_{k1} > I_{k3} \quad (34)$$

$$\text{dacă } \frac{X^0}{X^+} > 1 \Rightarrow I_{k1} < I_{k3} \quad (35)$$

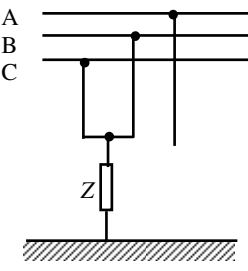
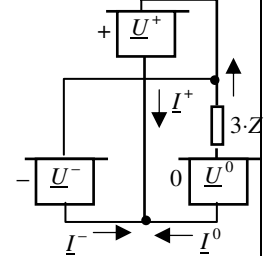
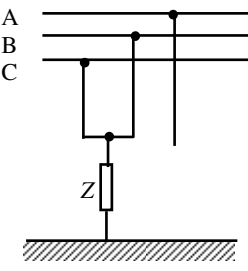
Calculul curenților de scurtcircuit cu componente simetrice

Tabel 2

Defectul	Relații între mărimi la locul defectului		Schema echivalentă	Relații de calcul ale mărimilor la locul de defect		
	Mărimi de fază	Componente simetrice	Impedanța echivalentă introdusă în rețeaua de succesiune pozitivă	Componente simetrice	Mărimie de fază	Tensiune între faze
<p>Scurtcircuit trifazat prin impedanța de defect Z</p> 	$U_A = U_B = U_C$	$U^- = U^0 = 0$		$U^+ = I^+ \cdot Z;$ $U^- = U^0 = 0$	$U_A = E \cdot \frac{Z}{Z^+ + Z};$ $U_B = -\frac{E}{2} \cdot \frac{Z + j\sqrt{3} \cdot Z}{Z^+ + Z};$ $U_C = -\frac{E}{2} \cdot \frac{Z - j\sqrt{3} \cdot Z}{Z^+ + Z}$	$U_{CB} = j\sqrt{3} \cdot E \cdot \frac{Z}{Z^+ + Z};$ $U_{AC} = -\frac{j\sqrt{3} \cdot E}{2} \cdot \frac{Z + j\sqrt{3} \cdot Z}{Z^+ + Z};$ $U_{BA} = -\frac{j\sqrt{3} \cdot E}{2} \cdot \frac{Z - j\sqrt{3} \cdot Z}{Z^+ + Z}$
	$I_A + I_B + I_C = 0$	$I^- = I^0 = 0$	$Z_s = Z$	$I^+ = \frac{E}{Z^+ + Z};$ $I^- = I^0 = 0$	$I_A = E \cdot \frac{1}{Z^+ + Z};$ $I_B = -\frac{E}{2} \cdot \frac{1 + j\sqrt{3}}{Z^+ + Z};$ $I_C = -\frac{E}{2} \cdot \frac{1 - j\sqrt{3}}{Z^+ + Z}$	
<p>Scurtcircuit bifazat între fazele B, C prin impedanța de defect Z</p> 	$U_B - U_C = Z \cdot I_B$	$U^+ = U^- + Z \cdot I^+ =$ $= I^+ \cdot (Z^- + Z);$ $U^0 = 0$		$U^+ = (Z + Z^-) \cdot I^+;$ $U^- = Z^- \cdot I^+;$ $U^0 = 0$	$U_A = E \cdot \frac{2 \cdot Z^- + Z}{Z^+ + Z^- + Z};$ $U_B = -\frac{E}{2} \cdot \frac{2 \cdot Z^- + Z + j\sqrt{3} \cdot Z}{Z^+ + Z^- + Z};$ $U_C = -\frac{E}{2} \cdot \frac{2 \cdot Z^- + Z - j\sqrt{3} \cdot Z}{Z^+ + Z^- + Z}$	$U_{CB} = j\sqrt{3} \cdot E \cdot \frac{Z}{Z^+ + Z^- + Z};$ $U_{AC} = -\frac{j\sqrt{3} \cdot E}{2} \cdot \frac{Z + j\sqrt{3} \cdot (2 \cdot Z^- + Z)}{Z^+ + Z^- + Z};$ $U_{BA} = -\frac{j\sqrt{3} \cdot E}{2} \cdot \frac{Z - j\sqrt{3} \cdot (2 \cdot Z^- + Z)}{Z^+ + Z^- + Z}$
	$I_A = 0;$ $I_B = -I_C$	$I^+ = I^-;$ $I^0 = 0$	$Z_s = Z^- + Z$	$I^+ = \frac{E}{Z^+ + Z^- + Z}$ $I^- = -I^+;$ $I^0 = 0$	$I_A = 0;$ $I_B = -j\sqrt{3} \cdot \frac{E}{Z^+ + Z^- + Z};$ $I_C = j\sqrt{3} \cdot \frac{E}{Z^+ + Z^- + Z}$	

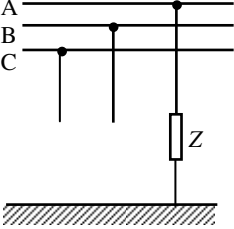
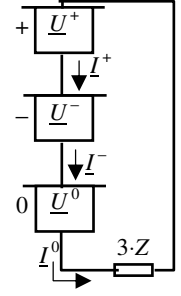
Tabelul 2 (continuare)

Calculul curenților de scurtcircuit cu componente simetrice

Defectul	Relații între mărimi la locul defectului		Schema echivalentă	Relații de calcul ale mărimilor la locul de defect		
	Mărimi de fază	Componente simetrice	Impedanța echivalentă introdusă în rețeaua de succesiune pozitivă	Componente simetrice	Mărime de fază	Tensiune între faze
<p>Scurtcircuit bifazat între fazele B, C cu legatură la pământ prin impedanța de defect Z</p> 	$U_B = U_C = Z \cdot (I_B + I_C)$	$U^- = U^+;$ $U^0 - U^- = 3 \cdot Z \cdot I^0$		$U^+ = U^- = I^+ \cdot \frac{Z^- \cdot (Z^0 + 3 \cdot Z)}{Z^- + Z^0 + 3 \cdot Z};$ $U^0 = I^+ \cdot \frac{Z^- \cdot Z^0}{Z^- + Z^0 + 3 \cdot Z}$	$U_A = \frac{E \cdot 3 \cdot Z^- \cdot (Z^0 + 3 \cdot Z)}{Z^+ \cdot Z^- + (Z^+ + Z^-) \cdot (Z^0 + 3 \cdot Z)};$ $U_B = U_C = \frac{-3 \cdot E \cdot Z^- \cdot Z}{Z^+ \cdot Z^- + (Z^+ + Z^-) \cdot (Z^0 + 3 \cdot Z)}$	$U_{AC} = \sqrt{3} \cdot E \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot Z^- \cdot (Z^0 + 3 \cdot Z)}{Z^+ \cdot Z^- + (Z^+ + Z^-) \cdot (Z^0 + 3 \cdot Z)};$ $U_{BA} = -\sqrt{3} \cdot E \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot Z^- \cdot (Z^0 + 3 \cdot Z)}{Z^+ \cdot Z^- + (Z^+ + Z^-) \cdot (Z^0 + 3 \cdot Z)}$
	$I_A = 0;$ $I_B + I_C = I_P$	$I^- + I^0 = -I^+$	$Z_s = \frac{Z^- \cdot (Z^0 + 3 \cdot Z)}{Z^- + Z^0 + 3 \cdot Z}$	$I^- = \frac{E \cdot (Z^0 + 3 \cdot Z)}{Z^+ \cdot Z^- + (Z^+ + Z^-) \cdot (Z^0 + 3 \cdot Z)};$ $I^+ = \frac{E \cdot (Z^- + Z^0 + 3 \cdot Z)}{Z^+ \cdot Z^- + (Z^+ + Z^-) \cdot (Z^0 + 3 \cdot Z)};$ $I^0 = \frac{E \cdot Z^-}{Z^+ \cdot Z^- + (Z^+ + Z^-) \cdot (Z^0 + 3 \cdot Z)}$	$I_A = 0;$ $I_B = \frac{-E \cdot \sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot Z^- + j(2 \cdot Z^0 + Z^- + 6 \cdot Z)}{Z^+ \cdot Z^- + (Z^+ + Z^-) \cdot (Z^0 + 3 \cdot Z)};$ $I_C = \frac{-E \cdot \sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot Z^- - j(2 \cdot Z^0 + Z^- + 6 \cdot Z)}{Z^+ \cdot Z^- + (Z^+ + Z^-) \cdot (Z^0 + 3 \cdot Z)}$	

Tabelul 2 (continuare)

Calculul curenților de scurtcircuit cu componente simetrice

Defectul	Relații între mărimi la locul defectului		Schema echivalentă	Relații de calcul ale mărimilor la locul de defect		
	Mărimi de fază	Componente simetrice		Componente simetrice	Mărimde de fază	Tensiune între faze
<p>Scurtcircuit monofazat. Faza A pusă la pământ prin impedanța de defect Z</p> 	$U_A = Z \cdot I_A$	$U^+ + U^- + U^0 = 3 \cdot Z \cdot I^+$		$U^+ = (Z^- + Z^0 + 3Z) \cdot I^+;$ $U^- = -Z^- \cdot I^+;$ $U^0 = -Z^0 \cdot I^+$	$U_A = E \cdot \frac{3 \cdot Z}{Z^+ + Z^- + Z^0 + 3 \cdot Z};$ $U_B = -\frac{\sqrt{3} \cdot E}{2} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot (Z^0 + Z) + j(2 \cdot Z^- + Z^0 + 3 \cdot Z)}{Z^+ + Z^- + Z^0 + 3 \cdot Z};$ $U_C = -\frac{\sqrt{3} \cdot E}{2} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot (Z^0 + Z) - j(2 \cdot Z^- + Z^0 + 3 \cdot Z)}{Z^+ + Z^- + Z^0 + 3 \cdot Z}$	$U_{CB} = j\sqrt{3} \cdot E \cdot \frac{2 \cdot Z^- + Z^0 + 3 \cdot Z}{Z^+ + Z^- + Z^0 + 3 \cdot Z};$ $U_{AC} = -j \frac{\sqrt{3} \cdot E}{2} \cdot \frac{(2 \cdot Z^- + Z^0 + 3 \cdot Z) + j\sqrt{3} \cdot (Z^0 + 3 \cdot Z)}{Z^+ + Z^- + Z^0 + 3 \cdot Z}$

EXEMPLE DE CALCUL **ANEXA 1**
Exemplu 1. Calculul curenților de scurcircuit într-o rețea de JT

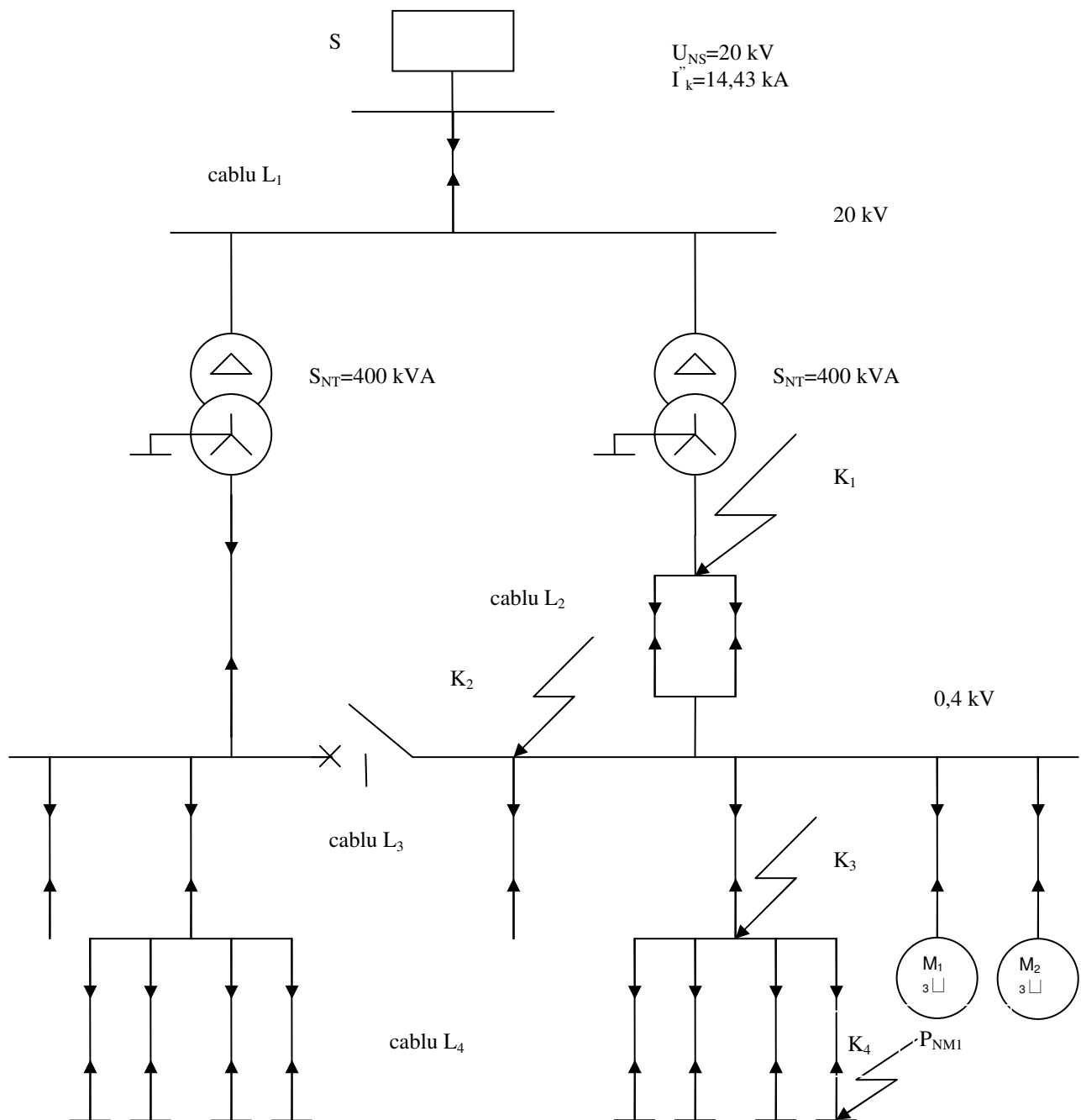


Fig. 7 Exemplu de calcul. Schema rețelei.

$$P_{NM1} = 0.02 \text{ MW};$$

$$P_{NM2} = 0.04 \text{ MW}.$$

- Parametrii rețelei:

- Rețeaua de alimentare $U_{NS} = 20$ kV

$$I''_{ksmax} = 14,43 \text{ kA} \quad C_s = C_{max} = 1,1$$

$$I''_{ksmin} = 11,55 \text{ kA} \quad C_s = C_{min} = 1,0$$

- Cablul L₁

$$3 \times (1 \times 150) \text{ mm}^2 \quad r_o = 212 \text{ m}\Omega/\text{km}$$

$$x_o = 197 \text{ m}\Omega/\text{km}$$

$$l = 1,7 \text{ km}$$

- Transformatoare $S_{NT} = 0,4$ MVA

$$T_1, T_2$$

$$U_{NMt} = 20 \text{ kV}$$

$$U_{Nst} = 0,4 \text{ kV}$$

$$u_k = 4\%$$

$$P_{kT} = 4,6 \text{ kW}$$

$$u_R = \frac{4,6 \text{ kW}}{400 \text{ kVA}} \cdot 100 = 1,15\%$$

$$R^0 / R_{Tst} = 1$$

$$X^0 / X_{Tst} = 0,96$$

- Cablul L 2 $r_o = 77,5$ mΩ/km

$$2 \times (4 \times 240) \text{ mm}^2$$

$$x_o = 79 \text{ m}\Omega/\text{km}$$

$$l = 5 \text{ m}$$

$$R^0 / R = 3,55$$

$$X^0 / X = 3,10$$

- Cablul L 3 $r_o = 268,6$ mΩ/km

$$4 \times 70 \text{ mm}^2$$

$$x_o = 82 \text{ m}\Omega/\text{km}$$

$$l = 20 \text{ m}$$

$$R^0 / R = 4,0$$

$$X^0 / X = 3,66$$

- Cablul L 4 $r_o = 3030$ mΩ/km

$$5 \times 6 \text{ mm}^2$$

$$x_o = 100 \text{ m}\Omega/\text{km}$$

$$l = 10 \text{ m}$$

$$R^0 / R = 40$$

$$X^0 / X = 4,03$$

ANEXA 1 (continuare)

- Motoare

M 1	$P_{NM} = 0,02 \text{ MW}$ $\lambda = 0,85$ $\eta_N = 0,93$
M 2	$P_{NM} = 0,04 \text{ MW}$ $\lambda = 0,85$ $\eta_N = 0,93$

Se precizează că neutrul transformatorului pe JT este direct legat la pământ iar întoarcerea comună se presupune că se face printr-un al patrulea conductor cu aceeași secțiune ca și a conductorului de fază. Schema de conexiune a transformatoarelor fiind Δ/Y , rețeaua de succesiune zero de joasă tensiune este decuplată de cea de înaltă tensiune.

În acest exemplu pentru calculul curenților minimi se consideră temperatura maximă $\theta_e = 145^\circ \text{ C}$, egală pentru toate cablurile conform relației (12): $R_L = 1,5 R_{L20}$.

Calculul impedanțelor pozitive (curenți de scurtcircuit maximi)

Tabelul A1

Elementul	Relația de calcul	Calcul	R [m Ω]	X [m Ω]	Z [m Ω]
Rețeaua de alimentare	$Z_s = \frac{c_{s \max} \cdot U_{NS}}{\sqrt{3} \cdot I_{ks \max}''}$	$Z_s = \frac{1,1 \cdot 20(kV)}{\sqrt{3} \cdot 14,43(kA)}$			880
	$X_s = 0,995 Z_s$	$X_s = 0,995 \cdot 880 \text{ m}\Omega$		875,6	
	$R_s = 0,1 X_s$	$R_s = 0,1 \cdot 875,6 \text{ m}\Omega$	87,56		
Cablul L 1	$R_L = l r_o$	$R_L = 1,7 \text{ km} \cdot 212 \frac{\text{m}\Omega}{\text{km}}$	360,4		
	$X_L = l x_o$	$X_L = 1,7 \text{ km} \cdot 197 \frac{\text{m}\Omega}{\text{km}}$		334,9	
$\sum Z_{MT}$ alimentare	$\sum R_{MT}$		447,96		
	$\sum X_{MT}$			1210,5	
Raport de transformare	$t = \frac{U_{NMT}}{U_{NTJT}}$	$t = \frac{20}{0,40} = 50$			

ANEXA 1 (continuare)
Tabelul A1 (continuare)

Elementul	Relație de calcul	Calcul	R [mΩ]	X [mΩ]	Z [mΩ]
$(\Sigma Z_{MT})_r$ alimentare	$(\Sigma R_{MT})_r = \frac{1}{l^2} \Sigma R_{MT}$	$1 / l^2 = 1 / 50^2 = 0,0004$	0,179		
	$(\Sigma X_{MT})_r = \frac{1}{l^2} \Sigma X_{MT}$			0,484	
Transformator T ₁	$Z_{TJT} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{NJT}^2}{S_{NT}}$	$Z_{TJT} = \frac{4}{100} \cdot \frac{(0,4)^2 \cdot (kV)^2}{0,4MVA}$			16
	$R_{TJT} = \frac{u_R}{100} \cdot \frac{U_{NJT}^2}{S_{NT}}$	$R_{TJT} = \frac{1,15}{100} \cdot \frac{(0,4)^2 \cdot (kV)^2}{0,4MVA}$	4,6		
	$X_{TJT} = \sqrt{Z_{TJT}^2 - R_{TJT}^2}$	$X_{TJT} = \sqrt{16^2 - 4,6^2}$		15,32	
Cablul L ₂	$R_L = \frac{1}{2} \cdot r_0 \cdot l$	$R_L = \frac{1}{2} \cdot 77,5 \cdot \frac{m\Omega}{km} \cdot 0,005km$	0,194		
	$X_L = \frac{1}{2} \cdot x_0 \cdot l$	$X_L = \frac{1}{2} \cdot 79 \cdot \frac{m\Omega}{km} \cdot 0,005km$		0,198	
Cablul L ₃	$R_L = r_0 \cdot l$	$R_L = 268,6 \cdot \frac{m\Omega}{km} \cdot 0,02km$	5,372		
	$X_L = x_0 \cdot l$	$X_L = 82 \cdot \frac{m\Omega}{km} \cdot 0,02km$		1,64	
Cablul L ₄	$R_L = r_0 \cdot l$	$R_L = 3030 \cdot \frac{m\Omega}{km} \cdot 0,01km$	30,3		
	$X_L = x_0 \cdot l$	$X_L = 100 \cdot \frac{m\Omega}{km} \cdot 0,01km$		1,00	

Anexa 1 (continuare)
Tabelul A 2

Calculul curenților maximi de scurtcircuit trifazat și bifazat

$U_N=400\text{ V}$ $c=c_{max}=1,0$

Nr crt	Element	Impedanțe de scurtcircuit			Curenții maximi de scurtcircuit trifazat				Elemente maximi de scc bifazat		Locul de scurtcircuit
		R_k	X_k	$Z_k=Z^+=\sqrt{R_k^2+X_k^2}$	$I_k''=I_b=I_k=\frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_k}$	R_k/X_k	X	$i_p = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot I_k''$	$I_{k2}'' = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_k''$	$i_{p2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_p$	
		[mΩ]	[mΩ]	[mΩ]	[kA]	-	-	[kA]	[kA]	[kA]	
1	Alimentare ($\sum Z_{MT}$) _r	0,179	0,484								
2	T ₁	4,6	15,32								
3	1+2	4,779	15,804	16,511	13,99	0,302	1,416	28,02	12,12	24,27	k ₁
4	L ₂	0,194	0,198								
5	3+4	4,973	16,002	16,757	13,78	0,311	1,406	27,40	11,93	23,73	k ₂
6	L ₃	5,372	1,640								
7	5+6	10,345	17,642	20,451	11,29	0,586	1,189	18,98	9,78	16,44	k ₃
8	L ₄	30,3	1,00								
9	7+8	40,645	18,642	44,716	5,16	2,180	1,021	7,45	4,47	6,45	k ₄

Calculul impedanțelor zero

Element	Relația de calcul	Calcul	R ⁰	X ⁰
			[mΩ]	[mΩ]
T ₁	$\frac{R^0}{R^+} = 1$	$R^0 = 1 \cdot 4,6m\Omega$	4,6	
	$\frac{X^0}{X_T} = 0,96$	$X^0 = 0,96 \cdot 15,32m\Omega$		14,71
Cablul L ₂	$\frac{R^0}{R^+} = 3,55$	$R^0 = 3,55 \cdot 0,194m\Omega$	0,689	
	$\frac{X^0}{X_T} = 3,10$	$X^0 = 3,1 \cdot 0,198m\Omega$		0,614
Cablul L ₃	$\frac{R^0}{R^+} = 4,00$	$R^0 = 4,00 \cdot 5,372m\Omega$	21,488	
	$\frac{X^0}{X_T} = 3,66$	$X^0 = 3,66 \cdot 1,640m\Omega$		6,002
Cablul L ₄	$\frac{R^0}{R^+} = 4,00$	$R^0 = 4,00 \cdot 30,300m\Omega$	121,200	
	$\frac{X^0}{X_T} = 4,03$	$X^0 = 4,03 \cdot 1,00m\Omega$		4,03

R^+ - este rezistența la 20⁰ C

Calculul curenților maximi de scurtcircuit monofazat

 $U_N=400V$ $C=C_{max}=1$

Nr. crt.	Elementul	Impedanțe pozitive		Impedanțe zero		Impedanța echivalentă la locul de scurtcircuit			Curenții monofazați maximi			Locul de scurtcircuit
		R^+	X^+	R^0	X^0	$R_1 =$ $2R^+ + R^0$	$X_1 =$ $2X^+ + X^0$	$Z_1 =$ $\sqrt{R_1^2 + X_1^2}$	$I_k'' = I_{b1} = I_{k1} =$ $\frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_N}{Z_1}$	χ	$i_{p1} =$ $\chi \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k1}''$	
		mΩ	mΩ	mΩ	mΩ	mΩ	mΩ	mΩ	kA		kA	
1	$(\sum Z_{MT})_r$	0,179	0,484	-	-							
2	T ₁	4,60	15,32	4,6	14,71							
3	1+2	4,779	15,804	4,6	14,71	14,158	46,318	48,434	14,30	1,416	28,64	k ₁
4	L ₂	0,194	0,198	0,689	0,614							
5	3+4	4,973	16,002	5,289	15,324	15,235	47,328	49,720	13,93	1,406	27,70	k ₂
6	L ₃	5,372	1,640	21,488	6,002							
7	5+6	10,345	17,642	26,777	21,326	47,467	56,610	73,877	9,38	1,189	15,77	k ₃
8	L ₄	30,300	1,00	121,20	4,030							
9	7+8	40,645	18,642	147,97	25,356	229,267	62,64	237,670	2,92	1,021	4,22	k ₄

Anexa 1 (continuare)
Tabelul A 5

Estimarea influenței motoarelor

Va trebui verificată condiția (1)

Motor	$S_{NM} = \frac{P_{NM}}{\eta_N \cdot \lambda_N}$	$\sum I_{NM}$	$0,01I_k''$ (din tabel A ₂)	Locul de scurtcircuit
	MVA	kA	kA	
M ₁	0,0253			
M ₂	0,0506			
$\sum M_i$	$\sum S_{NM} = 0,0759$	0,110	0,138	k ₂

Deoarece $\sum I_{NM} \leq 0,01 \cdot I_k''$, contribuția motoarelor atât pentru scurtcircuit în K_2 cât și în K_1, K_3 și K_4 nu trebuie considerată.

Anexa 1 (continuare)
Tabelul A 6

Calculul impedanțelor pozitive (curenți de scurtcircuit minim)
Se vor avea în vedere parametrii rețelei enumerați anterior

Elementul	Relația de calcul	Calculul	R	X	Z
			mΩ	mΩ	mΩ
Rețeaua de alimentare	$Z_{s\min} = \frac{c_{s\min} \cdot U_{NS}}{\sqrt{3} \cdot I''_{ks\min}}$	$Z_s = \frac{1,0 \cdot 20kV}{\sqrt{3} \cdot 11,55kA}$			1000
	$X_s = 0,995 Z_s$	$X_a = 0,995 \cdot 1000m\Omega$		995	
	$R_s = 0,1 X_s$	$R_s = 0,1 \cdot 995m\Omega$	99,5		
Cablul L ₁	R_L conform relației (12) $R_L = (1 + 0,004 \cdot 125) R_{L20}$	$R_L = 1,5 \cdot 360,4m\Omega$	540,6		
	$X_L = l \cdot x_0$	Tabel A 1		334,9	
ΣZ_{MT} alimentare	ΣR_{NT}		640,1		
	ΣX_{NT}			1329,9	
Raport de transformare	$t = \frac{U_{NTMT}}{U_{NTSt}}$	$t = \frac{20}{0,40} = 50$			
$(\Sigma Z_{MT})_r$ alimentare	$(\Sigma R_{MT}) = \frac{1}{t^2} \Sigma R_{MT}$	$\frac{1}{t^2} = \frac{1}{50^2} = 0,0004$	0,256		
	$(\Sigma X_{MT}) = \frac{1}{t^2} \Sigma X_{MT}$			0,532	
Transformator T ₁	Dacă nu există alte indicații rămân valabile valorile din A1				16
			4,6		
				15,32	
Cablul L ₂	R_L conf. (12) $R_L = 1,5 R_{L20}$	$R_L = 1,5 \cdot 0,194m\Omega$	0,291		
	$X_L = l \cdot x_0$	tabel A1		0,198	
Cablul L ₃	R_L conf. (12) $R_L = 1,5 R_{L20}$	$R_L = 1,5 \cdot 5,372m\Omega$	8,058		
	$X_L = l \cdot x_0$	tabel A1		1,640	
Cablul L ₄	R_L conf. (12) $R_L = 1,5 R_{L20}$	$R_L = 1,5 \cdot 30,300m\Omega$	45,45		
	$X_L = l \cdot x_0$	tabel A1		1,00	

Anexa 1 (continuare)
Tabelul A 7

Calculul curenților minimi de scurtcircuit trifazat și bifazat

$U_N=400\text{ V}$ $c=c_{min}=0,95$

Nr. crt.	Element	Impedanțe de scurtcircuit			Curenții maximi de scurtcircuit trifazat				Elemente maximi de scc bifazat		Locul de scurtcircuit
		R_k	X_k	$Z_k=Z^+ = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$	$I_k'' = I_b = I_k = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_k}$	R_k/X_k	χ	$i_p = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot I_k''$	$I_{k2}'' = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_k''$	$i_{p2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_p$	
		[mΩ]	[mΩ]	[mΩ]	[kA]	-	-	[kA]	[kA]	[kA]	
1	Alimentare ($\sum Z_{MT}$) _r	0,256	0,532								
2	T ₁	4,6	15,32								
3	1+2	4,856	15,852	16,579	13,23	0,306	1,411	26,40	11,46	22,86	k ₁
4	L ₂	0,291	0,198								
5	3+4	5,147	16,050	16,855	13,02	0,321	1,394	25,67	11,28	22,23	k ₂
6	L ₃	8,058	1,640								
7	5+6	13,205	17,690	22,075	9,94	0,746	1,125	15,81	8,61	13,69	k ₃
8	L ₄	45,45	1,000								
9	7+8	58,655	18,690	61,561	3,56	3,138	1,020	5,14	3,08	4,45	k ₄

Anexa 1 (continuare)
Tabelul A 8

Calculul impedanțelor zero (curenți minimi de scurtcircuit)

Valorile pentru impedanțele pozitive din tabel A 6

Element	Relația de calcul	Calcul	R^0	X^0
			[mΩ]	[mΩ]
Transformator T_1	$\frac{R^0}{R^+} = 1$	$R^0 = 1 \cdot 4,6m\Omega$	4,6	
	$\frac{X^0}{X_T} = 0,96$	$X^0 = 0,96 \cdot 15,32m\Omega$		14,71
Cablul L_2	$\frac{R^0}{R^+} = 3,55$	$R^0 = 3,55 \cdot 0,291m\Omega$	1,033	
	$\frac{X^0}{X_T} = 3,10$	$X^0 = 3,1 \cdot 0,198m\Omega$		0,614
Cablul L_3	$\frac{R^0}{R^+} = 4,00$	$R^0 = 4,00 \cdot 8,058m\Omega$	32,232	
	$\frac{X^0}{X_T} = 3,66$	$X^0 = 3,66 \cdot 1,640m\Omega$		6,002
Cablul L_4	$\frac{R^0}{R^+} = 4,00$	$R^0 = 4,00 \cdot 45,45m\Omega$	181,8	
	$\frac{X^0}{X_T} = 4,03$	$X^0 = 4,03 \cdot 1,00m\Omega$		4,03

R^+ - este rezistența la 20⁰ C

Anexa 1 (continuare)
Tabelul A 9

Calculul curenților minimi la scurtcircuit monofazat

$$U_N=400V$$

$$c=c_{min}=0,95$$

Nr. crt.	Elementul	Impedanțe pozitive		Impedanțe zero		Impedanța echivalentă la locul de scurtcircuit			Curenții monofazați maximi			Locul de scutecircuit
		R^+	X^+	R^0	X^0	$R_1 =$ $2R^+ + R^0$	$X_1 =$ $2X^+ + X^0$	$Z_1 =$ $\sqrt{R_1^2 + X_1^2}$	$I_k'' = I_{b1} = I_{k1} =$ $\frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_N}{Z_1}$	χ	$i_{p1} =$ $\chi \cdot \sqrt{2} \cdot I_k''$	
		mΩ	mΩ	mΩ	mΩ	mΩ	mΩ	mΩ	kA		kA	
1	$(\sum Z_{MT})_r$	0,256	0,532									
2	T ₁	4,60	15,32	4,6	14,71							
3	1+2	4,856	15,852	4,6	14,71	14,312	46,414	48,570	13,55	1,411	27,04	k ₁
4	L ₂	0,291	0,198	1,033	0,614							
5	3+4	5,147	16,050	5,633	15,324	15,927	47,424	50,027	13,16	1,394	25,94	k ₂
6	L ₃	8,058	1,64	32,232	6,502							
7	5+6	13,205	17,69	37,865	21,326	64,275	56,706	85,714	7,68	1,125	12,22	k ₃
8	L ₄	45,450	1,000	181,8	4,03							
9	7+8	58,655	18,690	219,66	25,356	336,975	62,736	342,765	1,920	1,020	2,77	k ₄

Estimarea influenței motoarelor

La calculul curenților minimi de scurtcircuit nu se i-a în considerare influența motoarelor asincrone

Anexa 1 (continuare)

Exemplul 2.

Determinarea influenței puterii de scurtcircuit a rețelei de alimentare pe partea de MT și a puterii transformatorului MT/JT asupra curentului de scurtcircuit I_k'' în rețeaua de joasă tensiune.

Se determină variația funcției $\frac{I_k''}{I_{k\infty}''} = f(S_k'', S_{NT})$, în care :

I_k'' - curentul real de scurtcircuit;

$I_{k\infty}''$ - curentul de scurtcircuit în cazul neglijării impedanței rețelei de MT (puterea infinită a sursei de MT);

S_k'' - puterea de scurtcircuit a sursei de MT;

$$S_k'' = (100 \dots 750) MVA$$

S_{NT} - puterea nominală a transformatorului:

$$S_{NT} = (160 \dots 2500) kVA$$

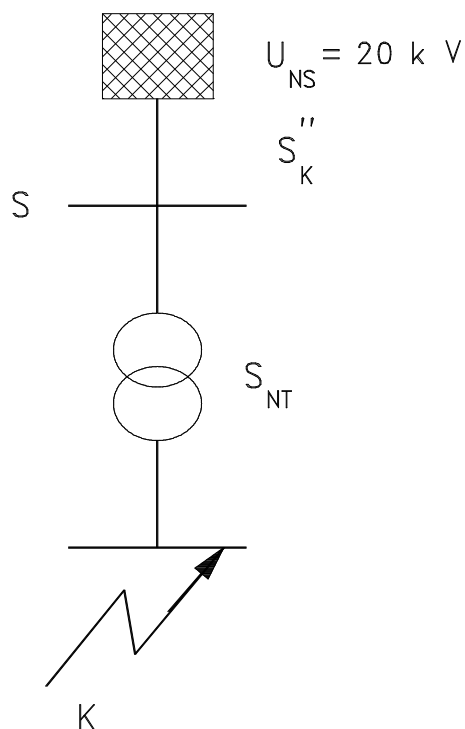


Fig. 8

Anexa 1 (continuare)Mod de calcul (exemplu pentru $S_k'' = 250MVA$, $S_{NT} = 400kVA$)

Elementul	Relația de calcul	Calcul	R mΩ	X mΩ	Z mΩ
1. Rețeaua de alimentare	$Z_S = \frac{c_{\max} \cdot U_{NS}}{\sqrt{3} \cdot I_{NS}''}$ $= \frac{c_{\max} \cdot U_{NS}^2}{S_k''}$	$Z_S = \frac{1,1 \cdot 20^2 \cdot (kV)^2}{250(MVA)}$			1760
	$X_S = 0,995 Z_S$	$X_S = 0,995 \cdot 1760$		1751	
	$R_S = 0,1 X_S$	$R_S = 0,1 \cdot 1760$	176		
2. Raport de transformare	$t = \frac{U_{NTMT}}{U_{NTJT}}$	$t = \frac{20}{0,40} = 50$			
3. Rețeaua de alimentare (raportare la jt)	$(R_{SNT})_2 = \frac{1}{t^2} \cdot R_S$	$\frac{1}{t^2} = \frac{1}{50^2} = 0,0004$	0,070		
	$(X_{SNT})_2 = \frac{1}{t^2} \cdot X_S$			0,7	
4. Transformator	$Z_{TJT} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{NJT}^2}{S_{NT}}$	$Z_{TJT} = \frac{6}{100} \cdot \frac{(0,4)^2}{0,4} \cdot \frac{(kV)^2}{MVA}$			24
	$R_{TJT} = \frac{u_R}{100} \cdot \frac{U_{NJT}^2}{S_{NT}}$	$R_{TJT} = \frac{0,95}{100} \cdot \frac{(0,4)^2}{0,4} \cdot \frac{(kV)^2}{MVA}$	3,8		
	$X_{TJT} = \sqrt{Z_{TJT}^2 - R_{TJT}^2}$	$X_{TJT} = \sqrt{24^2 - 3,8^2}$		24,3	
5. 3 + 4			3,87	25	

Anexa 1 (continuare)

Cu aceste date:

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} = \sqrt{3,87^2 + 25^2} = 25,3m\Omega$$

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{1,0 \cdot 0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,0253} = 9,14kA$$

În figura 9 este prezentată variația raportului dintre I_k'' , luându-se în considerare puterea de scurtcircuit reală a rețelelor de MT, și $I_{k\infty}''$ pentru cazul unei surse MT de putere infinite ($Z_S=0$). În acest din urmă caz:

$$I_S'' = \frac{c \cdot U_{NJT}}{\sqrt{3} \cdot Z_{TJT}}$$

De exemplu, în cazul precedent:

$$I_{k\infty}'' = \frac{1,0 \cdot 0,4}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{3,8^2 + 24,3^2} \cdot 10^{-3}} = 9,4kA$$

și raportul:

$$\frac{I_k''}{I_{k\infty}''} = \frac{9,14}{9,4} = 0,97$$

ANEXA 1 (continuare)

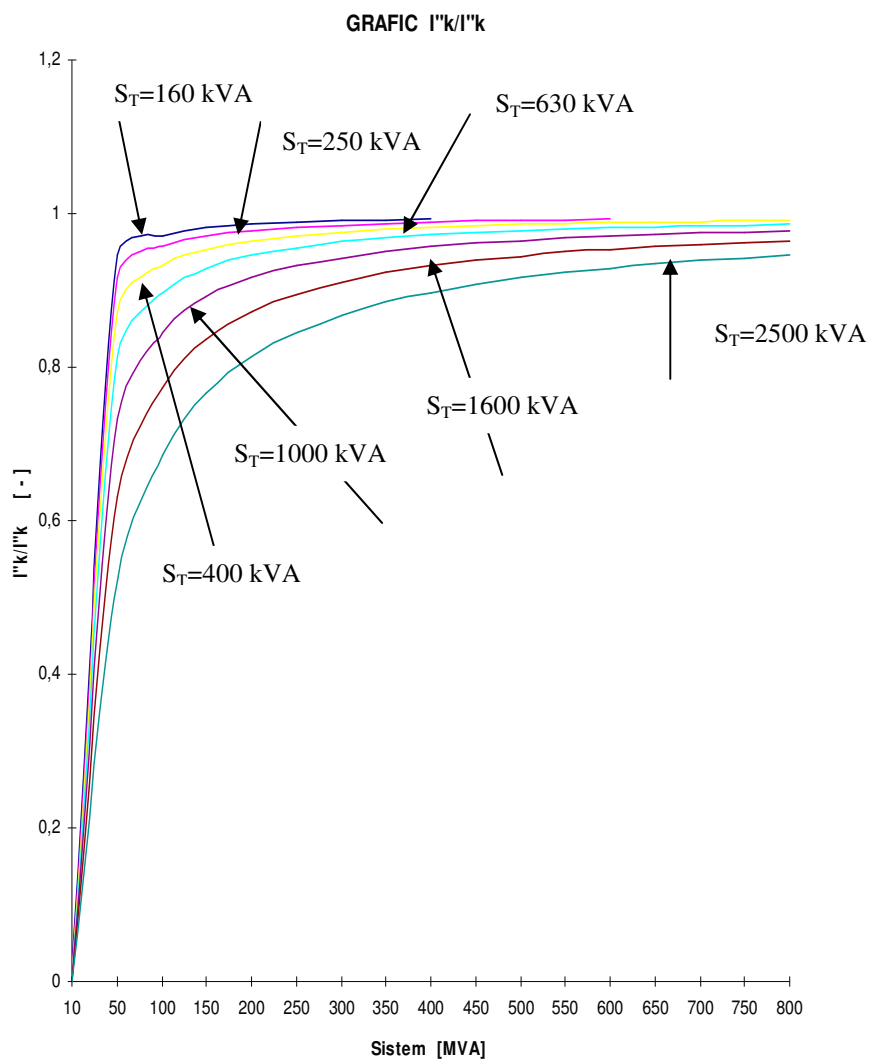


Fig. 9 Variația raportului $\frac{I''_k}{I''_{k\infty}}$

Noțiuni privind metoda componentelor simetrice

Efectuarea calculelor de regimuri de funcționare în rețelele trifazate echilibrate funcționând în regim simetric se poate face prin reprezentarea pe fază, după o prealabilă echivalare a transformatoarelor cu conexiune triunghi în conexiune stea. Valorile obținute pentru calculul pe fază rămân în modul aceleași pe celelalte două faze și sunt defazate cu $2\pi/3$.

Metoda componentelor simetrice permite extinderea analizei pe fază în cazul sistemelor cu sarcini dezechilibrate dar lineare.

În conformitate cu proprietatea descoperită de Fortescue (Charles L. Fortescue "Method of symmetrical coordinates. Applied to the solution of Polyphase Networks" - 1918), un sistem de trei fazori nesimetrice poate fi descompus în două sisteme de fazori simetrici (unul de succesiune pozitivă și altul de succesiune negativă) și un sistem de fazori în fază (de succesiune zero). În cazul în care curenții și tensiunile sunt astfel reprezentați, pentru fiecare componentă se poate face analiza pe fază, obținându-se astfel simplificarea dorită. Condițiile necesare în alegerea sistemelor de componente care să înlocuiască fazorii tensiune și curent ai unui sistem trifazat sunt:

- Să permită simplificarea calculelor. Aceasta este posibilă numai dacă impedanțele (sau admitanțele) asociate componentelor de curenți (sau tensiuni), se pot obține ușor prin calcule sau măsurători.
- Sistemele de componente alese să aibă semnificație fizică și să fie utile la determinarea performanțelor sistemelor electroenergetice.

Se menționează că în afara sistemului componentelor simetrice propuse de Fortescue (zero, pozitivă, negativă), cu coordonate de transformare în valori complexe, există și alte componente simetrice dintre care, mai larg utilizat, este sistemul $\alpha, \beta, 0$ propus de E. Clarke cu coordonate de transformare în valori reale. Acest din urmă sistem se pretează mult mai bine în studiul fenomenelor tranzitorii ale mașinilor electrice și are o largă răspândire în acest domeniu.

ANEXA 2 (continuare)

Având în vedere caracterul prezentei lucrări cu aplicație în principal în rețelele electrice se va utiliza exclusiv metoda componentelor simetrice cu coordonate de transformare în valori complexe.

În cele ce urmează se dau succint elementele necesare pentru abordarea problemei calculelor de scurtcircuit.

Un sistem trifazat de tensiuni sau de curenți, reprezentat de cei trei fazori \underline{V}_A , \underline{V}_B , \underline{V}_C respectiv \underline{I}_A , \underline{I}_B , \underline{I}_C poate fi înlocuit prin trei sisteme oarecare simetrice de vectori. Legătura dintre aceste două grupe de mărimi se exprimă printr-un sistem de ecuații liniare:

$$\begin{aligned}\underline{V}_A &= a_{11}\underline{V}^+ + a_{12}\underline{V}^- + a_{13}\underline{V}^0 \\ \underline{V}_B &= a_{21}\underline{V}^+ + a_{22}\underline{V}^- + a_{23}\underline{V}^0 \\ \underline{V}_C &= a_{31}\underline{V}^+ + a_{32}\underline{V}^- + a_{33}\underline{V}^0\end{aligned}\quad (1)$$

Singura restricție a sistemului este ca determinantul coeficienților să fie diferit de zero.

Prin aceasta sistemul trifazat inițial, de trei fazori, a fost înlocuit cu unul nou cu alți trei fazori ai unor sisteme monofazate de succesiune pozitivă, negativă și zero.

Pentru studiul sistemelor trifazate folosind componentele simetrice: pozitivă, negativă și zero este convenabil să se introducă un fazor operator care să defazeze cu $2\pi/3$ unghiul unui fazor dat, fără a-i schimba mărimea (fig. 10).

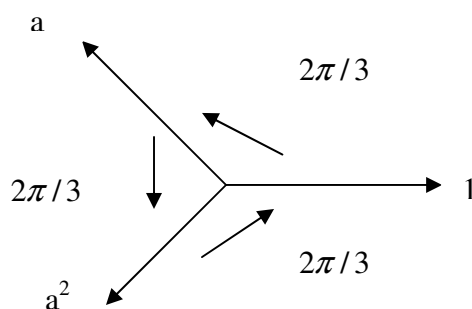


Fig.10 Diagrama fazorială a operatorului a

ANEXA 2 (continuare)

$$\underline{a} = e^{j2\pi/3} = -1/2 + j\sqrt{3}/2$$

Este deci clar că \underline{a} rotește un fazor cu $+2\pi/3$, iar \underline{a}^2 cu $-2\pi/3$.

Funcțiile operatorului \underline{a} sunt prezentate în tabelul 1 (operatorii $1, a, a^2$, formează un sistem de fazori simetric, echilibrat de succesiune negativă; operatorii $1, a^2, a$ formează un sistem de fazori simetric, echilibrat de succesiune pozitivă).

Tabel 1

Proprietăți ale operatorului \underline{a}

Funcția	În coordonate polare	În coordonate carteziene
a	$e^{2/3\pi}$	$-0,5 + j 0,866$
a^2	$e^{4\pi/3}$	$-0,5 - j 0,866$
a^3	e^0	$1,0 + j 0$
$1 + a + a^2$	0	0
$1 + a = -a^2$	$e^{\pi/3}$	$0,5 + j 0,866$
$1 + a^2 = -a$	$e^{-\pi/3}$	$0,5 - j 0,866$
$1 - a$	$\sqrt{3} e^{-\pi/6}$	$1,5 - j 0,866$
$1 - a^2$	$\sqrt{3} e^{\pi/6}$	$1,5 + j 0,866$
$a - 1$	$\sqrt{3} e^{5\pi/6}$	$-1,5 + j 0,866$
$a^2 - 1$	$\sqrt{3} e^{-5\pi/6}$	$-1,5 - j 0,866$
$a - a^2$	$\sqrt{3} e^{\pi/2}$	$0 + j 1,732$
$a^2 - a$	$\sqrt{3} e^{-\pi/2}$	$0 - j 1,732$
$a + a^2$	e^{π}	$-1 + j 0$

ANEXA 2 (continuare)

Cu ajutorul acestui fazor se pot alege coeficienții a_{ij} astfel încât sistemele nou obținute să aibă și un sens fizic.

În scrierea ecuațiilor este necesar să se aleagă arbitrar o fază de referință. De regulă aceasta este faza A. Folosind fazorul operator \underline{a} vom obține (fig. 11).

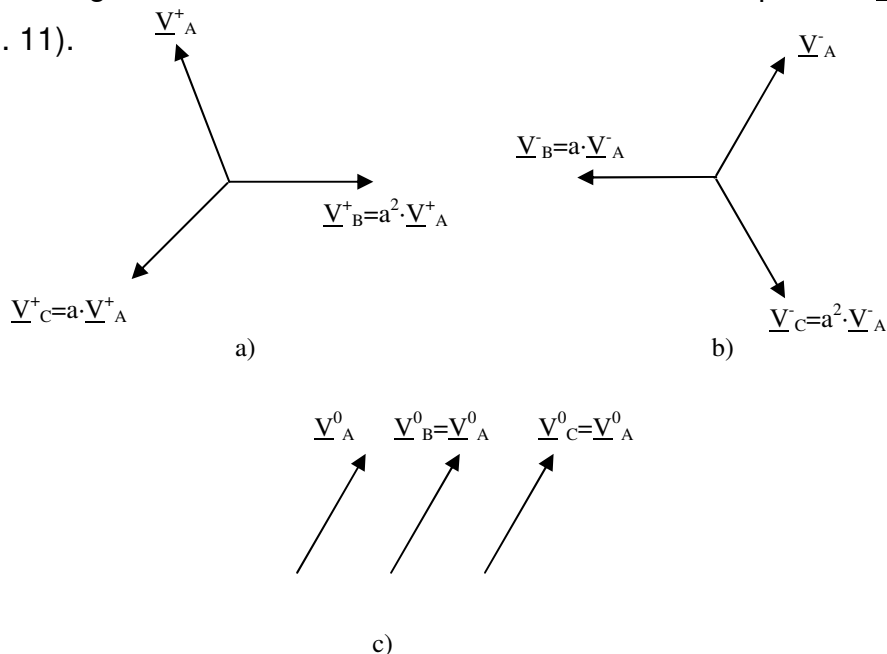


Fig. 11 Componente simetrice de tensiune

- a) Sistem de succesiune pozitivă
- b) Sistem de succesiune negativă
- c) Sistem de succesiune zero

Sistemul 1 (de succesiune pozitivă): $\underline{V}_A^+; \underline{V}_B^+ = a^2 \underline{V}_A^+; \underline{V}_C^+ = a \underline{V}_A^+$

Sistemul 2 (de succesiune negativă): $\underline{V}_A^-; \underline{V}_B^- = a \underline{V}_A^-; \underline{V}_C^- = a^2 \underline{V}_A^-$

Sistemul 3 (zero): $\underline{V}_A^0; \underline{V}_B^0 = \underline{V}_A^0; \underline{V}_C^0 = \underline{V}_A^0$

Deci ecuațiile (1) devin :

$$\begin{aligned} \underline{V}_A &= \underline{V}_A^0 + \underline{V}_A^+ + \underline{V}_A^- \\ \underline{V}_B &= \underline{V}_A^0 + a^2 \underline{V}_A^+ + a \underline{V}_A^- \\ \underline{V}_C &= \underline{V}_A^0 + a \underline{V}_A^+ + a^2 \underline{V}_A^- \end{aligned} \quad (2)$$

Rezolvarea acestui sistem de ecuații dă:

$$\begin{aligned} \underline{V}_A^0 &= 1/3 (\underline{V}_A + \underline{V}_B + \underline{V}_C) \\ \underline{V}_A^+ &= 1/3 (\underline{V}_A + a \underline{V}_B + a^2 \underline{V}_C) \\ \underline{V}_A^- &= 1/3 (\underline{V}_A + a^2 \underline{V}_B + a \underline{V}_C) \end{aligned}$$

ANEXA 2 (continuare)

În scrierea curentă se renunță la menționarea fazei de referință. Fără altă mențiune specială se consideră că aceasta este faza A.

Matricial ecuațiile de definiție sunt:

$$\begin{pmatrix} \underline{V}_A \\ \underline{V}_B \\ \underline{V}_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{V}^0 \\ \underline{V}^+ \\ \underline{V}^- \end{pmatrix} \quad \text{sau} \quad \begin{pmatrix} \underline{V}_A \\ \underline{V}_B \\ \underline{V}_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{V}^0 \\ \underline{V}^+ \\ \underline{V}^- \end{pmatrix} \quad (3)$$

și

$$\begin{pmatrix} \underline{V}^0 \\ \underline{V}^+ \\ \underline{V}^- \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{V}_A \\ \underline{V}_B \\ \underline{V}_C \end{pmatrix} \quad \text{sau} \quad \begin{pmatrix} \underline{V}^0 \\ \underline{V}^+ \\ \underline{V}^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{V}_A \\ \underline{V}_B \\ \underline{V}_C \end{pmatrix} \quad (4)$$

$\| S \|$ fiind matricea pentru transformarea propusă de Fortescue, astăzi general adoptată.

Relațiile sunt analoage pentru curenți.

Aplicarea metodei componentelor simetrice necesită introducerea conceptului de rețea de diferite succesiuni, care este o rețea echivalentă pentru un sistem echilibrat funcționând în condiții imaginate ca acelea în care în sistem sunt prezente numai tensiuni și curenți de succesiunea respectivă. Ca în rețelele echilibrate curenții de o anumită succesiune, determină căderi de tensiune numai de succesiunea respectivă dacă rețeaua este echilibrată. Nu vor exista interacțiuni între rețelele de diferite succesiuni care sunt independente.

Sistemele energetice pot fi considerate ca fiind echilibrate în afara unor cazuri excepționale ca defecte, sarcini dezechilibrate ș.a.

Chiar în asemenea condiții de dezechilibru, care de regulă apar numai într-un punct al sistemului, restul sistemului rămânând echilibrat, se poate

ANEXA 2 (continuare)

obține o rețea echivalentă pentru calculul cu componente simetrice. Avantajul rețelei de diferite succesiuni este acela că, deoarece curenții și tensiunile sunt de o singură succesiune, sistemele trifazate pot fi reprezentate prin scheme echivalente pe fază. Întreaga rețea de o anumită succesiune poate fi adesea redusă la utilizarea unei singure tensiuni și a unei singure impedanțe.

Tipul de nesimetrie sau dezechilibru din rețea poate fi reprezentat printr-o interconectare între rețele echivalente de diferite succesiuni.

Rețeaua de succesiune pozitivă este singura din cele trei care va conține tensiuni electromotoare (generatoare), întrucât generatoarele produc practic numai tensiuni de succesiune pozitivă. Tensiunile care apar în rețelele de succesiune negativă și zero vor fi generate de dezechilibru și vor fi ca tensiuni aplicate rețelelor în punctul de defect. În plus rețeaua de succesiune pozitivă reprezintă sistemul de operare în condiții normal echilibrate. Pentru studiile de scurtcircuit tensiunile interne sunt scurtcircuitate și rețeaua de succesiune pozitivă se consideră alimentată în concordanță cu teorema superpoziției, prin tensiunea existentă la punctul de defect înainte ca defectul să apară.

Această reprezentare dă exact valorile și variațiile mărimilor caracteristice din rețea. Deoarece curenții de defect - înainte de producerea acestuia - sunt zero, creșterea de curent produsă este chiar egală cu curentul de defect. Totuși, curenții din regim normal din toate laturile rețelei trebuiesc adunați la curentul de defect, calculat pentru ramura respectivă, pentru a determina curentul total din latură.

Schema echivalentă pentru fiecare succesiune se formează ca "văzută dinspre defect", imaginând că în rețeaua respectivă curentul circulă de la punctul de defect, analizând impedanțele și circulațiile de curenți pentru fiecare secțiune de rețea, aferente succesiunii respective.

Apoi trebuie să se considere că în fiecare rețea se aplică o tensiune între extremitățile rețelei și să se analizeze circulația de curenți prin fiecare succesiune în parte.

Este în mod deosebit necesar la alcătuirea rețelei de succesiune zero să se înceapă din punctul unde este dezechilibrul sau a apărut nesimetria, considerând că în acest punct fazele sunt scurtcircuitate între ele și că aici

ANEXA 2 (continuare)

este aplicată tensiunea de succesiune zero. Aceasta este necesar deoarece calea de circulație a curenților de succesiune zero diferă radical de căile prin care circulă curenții de succesiune directă sau inversă. Curenții de succesiune zero pot să nu circule în întreaga rețea.

Schema rețelei de succesiune zero și circulația curenților este determinată în mare măsură de grupa de conexiuni a înfășurărilor unităților de transformare care sunt în rețeaua considerată.

Cele două borne ale fiecărei rețele corespund la două puncte din sistemul trifazat de o parte și de alta a dezechilibrului. În cazul defectelor transversale între conductoare și pământ, o bornă a fiecărei rețele va fi punctul de defect în rețeaua trifazată, cealaltă va fi pământul sau neutrul în acel punct.

În cazul unui dezechilibru longitudinal, ca de exemplu deconectarea unui circuit, cele două borne vor corespunde celor două puncte din rețeaua trifazată care alimentează dezechilibrul.

Aceste impedanțe sunt definite în regim de tensiuni și curenți sinusoidali, la frecvența fundamentală, astfel:

- **impedanțele de succesiune pozitivă** ale curențului trifazat, ca fiind egale cu raportul căderilor de tensiuni, la curenții fazelor corespunzătoare, atunci când circuitul este parcurs numai de curenți de succesiune directă;

- **impedanțele de succesiune negativă** ca fiind egale cu raportul căderilor de tensiune din cele trei faze, la curenții fazelor corespunzătoare, atunci când circuitul este parcurs numai de curenți de succesiune inversă;

- **impedanța zero** pe fază, a unui circuit trifazat simetric parcurs numai de curenți de succesiune zero, este impedanța (sau impedanța echivalentă) opusă fiecăruia din cei trei curenți care parcurg fazele și sumei celor trei curenți care să intre prin pământ sau prin conductorul neutru.

În fig. 12 se prezintă modul de determinare a acestor impedanțe.

ANEXA 2 (continuare)

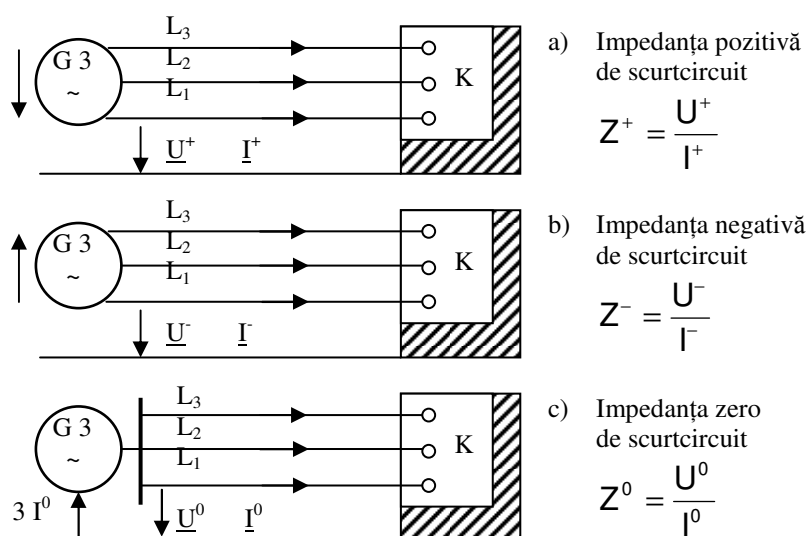


Fig. 12 Impedanțe de scurtcircuit ale sistemelor trifazate de c.a. la locul de defect K.

Impedanțele pe neutru nu apar în schemele echivalente de succesiune pozitivă sau negativă, întrucât suma curenților pe cele trei faze conduce la un curent total nul. În schema echivalentă de succesiune zero va apărea o impedanță pe circuitul de întoarcere egală cu de trei ori impedanța pe neutru, deoarece curenți de succesiune zero care circulă în cele trei faze dau un curent total pe circuitul de întoarcere de $3 I^0$.

Pentru efectuarea calculelor cu componente simetrice este necesară stabilirea unei convenții de succesiune pentru tensiuni și curenți.

Prin convenție se stabilește că sensul pozitiv al curentului în fiecare rețea de diferite succesiuni este ieșind din punctul de nesimetrie (defect) sau de dezechilibru; rezultă că în toate cele trei rețele sensul pozitiv al curenților respectivi va fi același. Această convenție pentru sensul curenților trebuie atent urmărită pentru a se evita erorile. Deoarece componentele simetrice de curenți sunt legate prin legea lui Ohm numai cu componentele de tensiune de aceeași succesiune, determinarea circulației de curenți este simplă.

ANEXA 2 (continuare)

Cu alte cuvinte dacă un element oarecare al unui circuit este echilibrat și prezintă în raport cu curenții I^+ , I , I^0 impedanțele proprii Z^+ , Z , Z^0 , componentele simetrice ale căderilor de tensiune pe acest element vor fi:

$$\begin{aligned} \Delta U^+ &= Z^+ \cdot I^+ \\ \Delta U &= Z \cdot I \\ \Delta U^0 &= Z^0 \cdot I^0 \end{aligned} \tag{5}$$

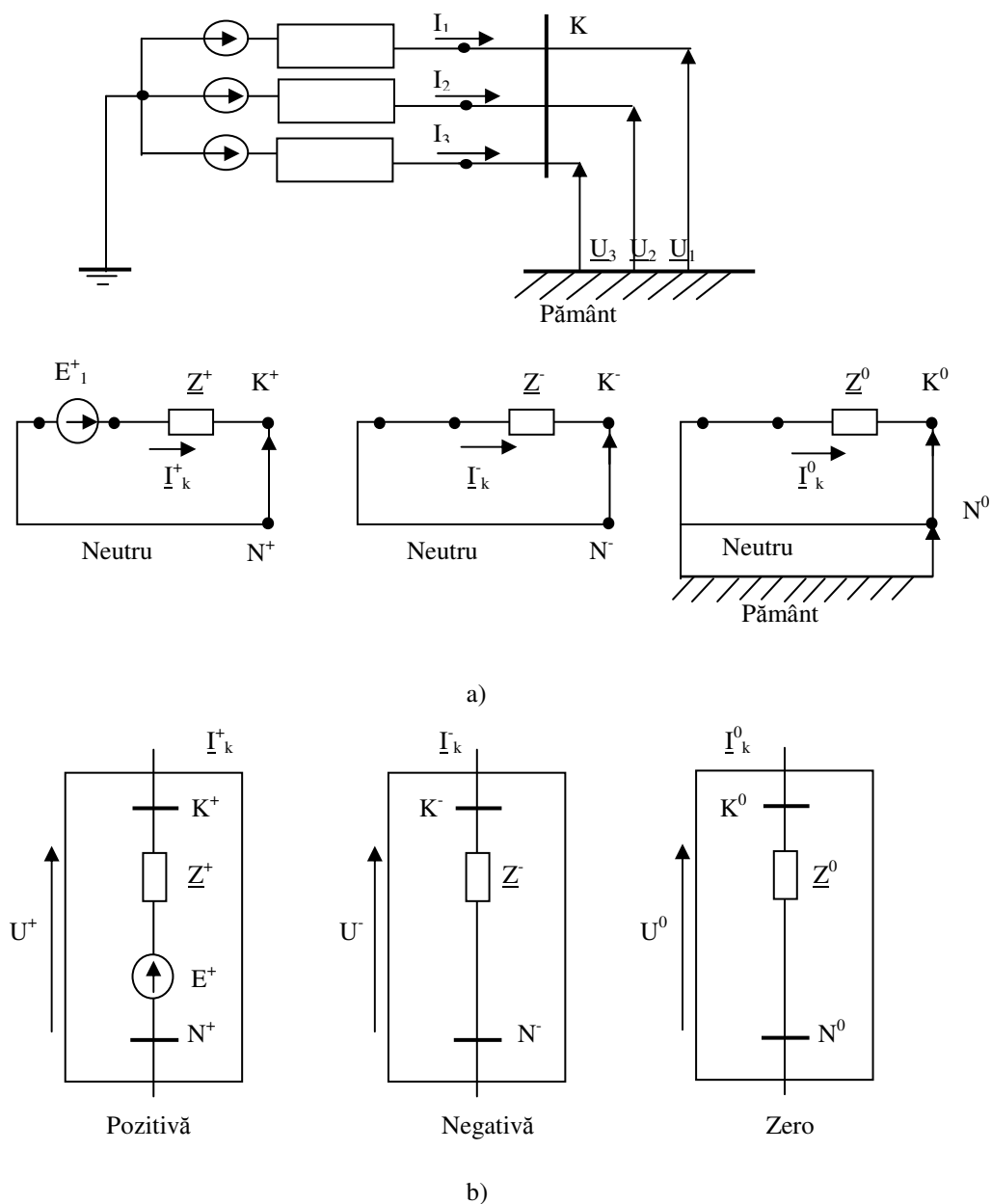


Fig. 13. Reprezentarea schemelor echivalente pentru rețele de diferite succesiuni

- a) prin impedanțe respective;
- b) ca dipoli de diferite succesiuni.

ANEXA 2 (continuare)

După determinarea circulației de curenți în fiecare rețea, se poate determina tensiunea în orice punct al unei rețele de o anumită succesiune prin scăderea căderii de tensiune prin impedanțele de succesiunea respectivă din tensiunea generatorului, considerând punctul neutru al rețelei ca punct de potențial nul. De exemplu, dacă impedanțele între neutru și punctul considerat sunt : \underline{Z}^+ , \underline{Z} , \underline{Z}^0 , componentele simetrice ale tensiunii vor fi:

$$\begin{aligned}\underline{U}^+ &= E_1^+ - \underline{I}^+ \cdot \underline{Z}^+ \\ \underline{U} &= 0 - \underline{I} \cdot \underline{Z} \\ \underline{U}^0 &= 0 - \underline{I}^0 \cdot \underline{Z}^0\end{aligned}\quad (6)$$

unde E_1 este tensiunea pe fază de succesiune pozitivă a generatorului.

Circulația curenților de defect în întreaga rețea se determină prin compunerea curenților de diferite succesiuni în fiecare latură în parte, curenți obținuți prin repartiția curentului de defect de o anumită succesiune în rețeaua de succesiune respectivă. Această metodă se poate aplica deoarece, așa cum s-a mai arătat, în fiecare din cele trei rețele curenții și tensiunile succesiunii respective sunt complet independenți de celelalte două succesiuni.

Pentru puterea complexă în regim nesimetric și (sau) dezechilibrat se obține:

$$\begin{aligned}S &= P + jQ = \underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* + \underline{U}_2 \cdot \underline{I}_2^* + \underline{U}_3 \cdot \underline{I}_3^* \\ S &= 3 (\underline{U}^0 \cdot \underline{I}^{0*} + \underline{U}^+ \cdot \underline{I}^{+*} + \underline{U} \cdot \underline{I}^*)\end{aligned}$$

**RELAȚII DE CALCUL PENTRU REZISTENȚELE ȘI REACTANȚELE
ELEMENTELOR DE REȚEA**
(Rapoartele R^0/R^+ și X^0/X^+ orientative)

Elementul	R^+ (Ω)	X^+ (Ω)	R^0 (Ω) ^(x)	X^0 (Ω) ^(x)	Observații
Rețea	$R = 0,1 X$	$X_d = \frac{c \cdot U^2}{S_k''} \cdot 0,995$	$R^0 = R^+$	$X^0 = 1 \div 1,5 X^+$	
Transformator	$R = \frac{P_{kT} U_N^2}{S_N^2}$	$Z = \frac{u_k \% \cdot U_N^2}{100 S_N}$ $X = \sqrt{Z^2 - R^2}$	$R^0 = R^+ \text{)}$	$X^0 = 0,96 X_T$	Conexiune transformator ΔY
			$R^0 = 0,5 R^+ \text{ xx)}$	$X^0 = 0,1 X^+$	Conexiune transformator Yz sau Δz
Bobină	$R = 0$	$X^+ = \frac{\varepsilon}{100} \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3} I_N}$	$R^0 = 0$	$X^0 = X^+$	
Cablu	$R = r_0 l$	$X = X_0 l$	$R^0 = 4 R^+$	$X^0 \approx 3,8 X^+$	
Linie aeriană	$R = r_0 l$	$X = X_0 l$	$R^0 = 2 X^+$	$X^0 = 3 X^+$	
Bare	$R = r_0 l$	$X = X_0 l$	$R^0 = 2 X^+$	$X^0 = 4 X^+$	
Motor asincron	$\frac{R_M}{X_M} \approx 0,12$	$X_M = \frac{1}{\frac{I_{RS}}{I_N}} \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3} I_N}$			

Notații:

P_{kT} - pierderile în scurtcircuit ale transformatoarelor;

ε - căderea de tensiune pe bobină;

r_0 - rezistența lineică indicată de fabrica constructoare;

x_0 - reactanța lineică indicată de fabrica constructoare;

x xx - aceste relații se vor utiliza dacă nu se dispune de alte informații de la furnizor.

l - lungimea liniei, a cablului, și a barei;

I_P - curentul de pornire al motorului;

U_N - tensiunea nominală;

I_N - curent nominal;

S_N - puterea nominală;

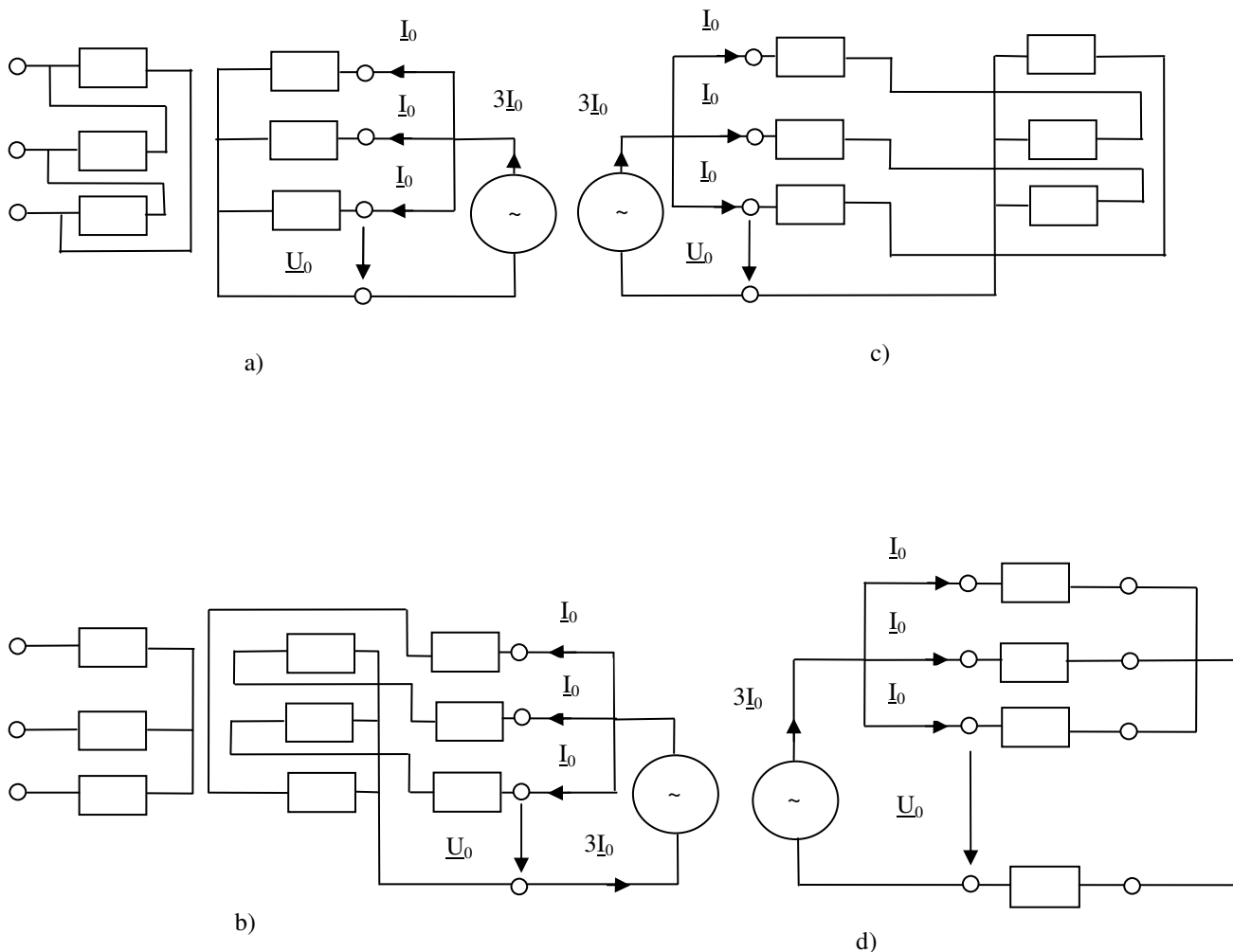
Denumirea transformatorului	S_N [kVA]	Tipul constructiv	Tensiunea nominală [kV]		Reglaj [%]	Grupa de conexiuni	Pierderi nominale [kW]		u_k [%]	I_o [%]
			IT	JT			ΔP_0 (Fe)	P_{kT} (Cu)		
TTU NL	100	110/10	6	4	± 5	$Y_{zn} 5$	35	2,3	4	3
			10							
		110/20	20	4						
TTU NL	160	160/20	6	0,4	± 5	$Y_{zn} 5$	0,5	3,1	4	2,9
			10							
		160/20	20							
TTU NL	250	250/10	6	4	± 5	Dyn 5	0,66	4,4	6	2,9
			6	525		Yyn 0				
			10	0,4		Dyn 5				
			10 (5)							
		250/20	20	525		Yyn 0				
			20(15)	4		Dyn 5				
			20(15)	525		Yyn 0				
TTU NL	400	400/10	6	0,4	± 5	Dyn 5	0,94	6	6	2,8
			6	525		Yyn 0				
			10	0,4		Dyn 5				
			10 (5)							

TTU NL	400	400/20	20	525	± 5	Yyn 0	0,98	6	6	2,8	
			20 (15)	0,4		Dyn 5					
			20 (15)	525		Yyn 0					
TTU NL	630	630/10	6	0,4	± 5	Dyn 5	1,2	8,2	6	2,4	
			6	525		Yyn 0					
			10	0,4		Dyn 5					
			10 (5)			Yyn 0					
		630/20	15	0,525		Dyn 5	1,25				
			20			Yyn 0					
			20 (15)			Dyn 5					
TTU NL	1000	1000/10	6	4	± 5	Dyn 5	1,85	12	6	2	
			6	525		Yyn 0					
			10	0,4		Dyn 5					
			10 (5)			Yyn 0					
		1000/20	15	0,525		Dyn 5	1,95				
			20			Yyn 0					
			20(15)			Dyn 5					
			20			Yyn 0					
TTU NL	1600	1600/10	6	0,4	± 5	Dyn 5	2,6	18	6	1,7	
			6	525		Yyn 0					
			10	0,4		Dyn 5					
			10 (5)			Yyn 0					
		1630/20	15	0,525		Dyn 5	2,7				
			20			Yyn 0					
			20 (15)			4					Dyn 5
			20			6,3					Yyn 0
			20(15)								Dyn 5
			20(15)								Yyn 0

Anexa 4 (continuare)

Denumirea Transformatorului	S _N [kVA]	Tipul constructiv	Tensiunea nominala [kV]		Reglaj [%]	Grupa de conexiuni	Pierderi nominale		u _k [%]	I ₀ [%]
			IT	JT			ΔP ₀ (Fe)	ΔP _k (Cu)		
TTU-CU	3	1/0,4	1	0,4	±2,5	Dyn-5	20	150	4	4
	5	1/0,4	1	0,4	±2,5	Dyn-5	25	200	4	3,8
	10	1/0,4	1	0,4	±2,5	Dyn-5	60	360	4	3,6
TTU-CU etanșe	16	1/0,4	1	0,4	±2,5	Dyn-5	75	380	4	3,5
	25	1/0,4	1	0,4	±2,5	Dyn-5	100	600	4	3,2
	40	1/0,4	1	0,4	±2,5	Dyn-5	150	950	4	3,0
TTU-CU Treceri izolante JT pe capac	16	20/0,4	20	0,4	±2x2,5	Yzn-5	85	465	4	3,5
	25	20/0,4	20	0,4	±2x2,5	Yzn-5	110	700	4	3,2
	40	20/0,4	20	0,4	±2x2,5	Yzn-5	185	985	4	3
	63	20/0,4	20	0,4	±2x2,5	Yzn-5	250	1350	4	2,8
TTU-CU Treceri izolante JT pe capac	100	20/0,4	20	0,4	±2x2,5	Yzn-5	320	1750	4	2,5
	160	20/0,4	20	0,4	±2x2,5	Yzn-5	460	2350	4	2,5
	250	20/0,4	20	0,4	±2x2,5	Dyn-5	650	3250	6	2,1
TTU-AI Transformatoare cu conservator	250	20/0,4	20	0,4	±2x2,5	Dyn-5	650	3250	6	2,1
	400	20/0,4	20	0,4	±2x2,5	Dyn-5	930	4600	6	1,9
	630	20/0,4	20	0,4	±5	Dyn-5	1300	6500	6	1,8
	1000	20/0,4	20	0,4	±5	Dyn-5	1700	10500	6	1,4
	1600	20/0,4	20	0,4	±5	Dyn-5	2200	14960	6	1,3
TTU-AL Transformatoare cu conservator	1000	20/6,3	20	6,3	±5	Yyn-5	1700	10500	6	1,4
	1600	20/6,3	20	6,3	±5	Yyn-5	2200	14960	6	1,3
TTU-Cu Transformatoare cu conservator	250	20/0,4	20	0,4	±2x2,5	Dyn-5	650	3250	6	2,1
	400	20/0,4	20	0,4	±2x2,5	Dyn-5	930	4600	6	1,9
	630	20/0,4	20	0,4	±2x2,5	Dyn-5	1300	6500	6	1,8
	1000	20/0,4	20	0,4	±2x2,5	Dyn-5	1700	10500	6	1,4
	1600	20/0,4	20	0,4	±2x2,5	Dyn-5	2200	14960	6	1,3
TMU-Cu Transformatoare etanșe	10	25/0,22	20	0,22	±5	li-0	100	350	4	2,9
	25	25/0,22	20	0,22	±5	li-0	150	650	4	2,1
TTU-Cu Transformatoare etanșe Petrom	63	6;10;15;20	6;10;15;20	0,525	±2x2,5	Yyn-5	250	1350	4	2,8
	100	6;10;15;20	6;10;15;20	0,525	±2x2,5	Yyn-5	320	1750	4	2,5
	160	6;10;15;20	6;10;15;20	0,525	±2x2,5	Yyn-5	460	2360	4	2,5
	180	6;10;15;20	6;10;15;20	0,525	±2x2,5	Yyn-5	520	2600	4	2,5
	250	6;10;15;20	6;10;15;20	0,525	±2x2,5	Yyn-5	650	3250	6	2,1

Determinarea impedanței zero la transformatoarele MT/JT și rețea



$Dy : R_{T0} \approx R_T$

$Dy : X_{T0} \approx 0,96 \cdot X_T$

$Yz : R_{T0} \approx 0,5 \cdot R_T$

$Yz : X_{T0} \approx 0,1 \cdot X_T$

$Yy : R_{T0} \approx R_T$

$Yy : X_{T0} \approx (7 \dots 100^*) \cdot X_T$;

* - dacă neutrul pe MT este izolat

- a) transformatoare cu conexiunea Dy (triunghi – stea);
- b) transformatoare cu conexiunea Yy (stea – stea);
- c) transformatoare cu neutrul izolat artificial, cu conexiune zig-zag;
- d) linie.

**Valoarea rezistenței R și a reactanței pozitive X_L , pentru
conductoare de Al neizolate la $f=50$ Hz**

Secțiunea nominală mm ²	Rezistența Ω/km	Reactanța inductivă X'_L , în Ω/km					
		Distanța medie între conductoare d [cm]					
		50	60	70	80	90	100
16	1,802	0,36	0,37	0,38	0,39	0,4	0,4
25	1,181	0,34	0,35	0,37	0,37	0,38	0,39
35	0,833	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38
50	0,595	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37
70	0,437	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36
95	0,303	0,23	0,31	0,32	0,33	0,34	0,34
120	0,246	0,29	0,3	0,31	0,32	0,33	0,34

Caracteristicile cablurilor de JT și ale cablurilor cu conductoare izolate
a) Caracteristicile cablurilor de joasă tensiune
- date informative pentru instalații existente-

Rezistența în curent continuu a conductoarelor de cupru și aluminiu, în Ω/km în funcție de temperatura conductorului			Reactanța inductivă a cablurilor cu izolație de hârtie ($f = 50 \text{ Hz}$) în manta cu 3 1/2 conductoare		Reactanța inductivă a cablurilor cu izolație de hârtie ($f = 50 \text{ Hz}$) în manta cu 4 conductoare		Reactanța inductivă a cablurilor în manta cu 3 conductoare	
Secț. mm^2	Temp. conduct. 20°C		Numărul și secț. cond mm^2	X_L Ω/km	Numărul și secț. cond mm^2	X_L Ω/km	Numărul și secț. cond mm^2	X_L Ω/km
	Cu Rcc Ω/km	Al Rcc Ω/km						
16	1,12	1,89	-	-	4 x 16	0,099	3 x 16	0,099
25	0,71	1,21	3x25/16	0,092	4 x 25	0,094	3 x 25	0,086
35	0,51	0,866	3x35/16	0,09	4 x 35	0,092	3 x 35	0,083
50	0,36	0,606	3x50/25	0,087	4 x 50	0,09	3 x 50	0,081
70	0,25	0,433	3x70/35	0,085	4 x 70	0,087	3 x 70	0,079
95	0,19	0,313	3x35/50	0,084	4 x 35	0,086	3 x 95	0,077
120	0,14	0,253	3x120/70	0,083	4 x 120	0,086	3 x 120	0,077
155	0,12	0,202	3x150/70	0,084	4 x 150	0,086	3 x 150	0,077
185	0,1	0,164	3x185/35	0,083	4 x 185	0,085	3 x 185	0,076
240	0,07	0,126	3x240/120	0,082	4 x 240	0,084	3 x 240	0,076

b) Caracteristicile conductoarelor izolate torsadate

Secțiunea mm^2	Rezistența Ω/km	Reactanța Ω/km
16	1,802	0,098
25	1,181	0,097
35	0,833	0,089
50	0,579	0,086
70	0,437	0,084

**Raportul dintre componenta zero și cea pozitivă ale rezistenței inductive pentru cablurile
CYY și ACYY, în funcție de calea de întoarcere, la f=50Hz**

Număr de conductoare și secțiunea nominală	$\frac{R_L^0}{R_L}$				$\frac{X_L^0}{X_L}$			
	Cupru		Aluminiu		Cupru		Aluminiu	
	a	b	a	b	a	b	a	b
4 x 1,5	4	1,03	-	-	3,99	21,28	-	-
4 x 2,5	4	1,05	-	-	4,01	21,62	-	-
4 x 4	4	1,11	-	-	3,98	21,36	-	-
4 x 6	4	1,21	-	-	4,03	21,62	-	-
4 x 10	4	1,47	-	-	4,02	20,22	-	-
4 x 16	4	1,86	-	-	3,98	17,09	-	-
4 x 25	4	2,35	-	-	4,13	12,97	-	-
4 x 35	4	2,71	4	2,12	3,78	10,02	4,13	15,47
4 x 50	4	2,95	4	2,48	3,76	7,61	3,76	11,99
4 x 70	4	3,18	4	2,84	3,66	5,68	3,66	8,63
4 x 95	4	3,29	4	3,07	3,65	4,63	3,65	6,51
4 x 120	4	3,35	4	3,19	3,65	4,21	3,65	5,53
4 x 150	4	3,38	4	3,26	3,65	3,94	3,65	4,86
4 x 185	4	3,41	4	3,32	3,65	3,74	3,65	4,35
4 x 240	4	3,42	-	-	3,67	3,62	-	-
4 x 300	4	3,44	-	-	3,66	3,52	-	-

a. Întoarcerea prin conductorul de nul.

b. Întoarcerea prin conductorul de nul și pământ.

Parametrii cablurilor de joasă tensiune

Impedanța cablurilor de joasă tensiune depinde de anumite norme tehnice sau standarde și în mare parte pot fi extrase de la producător.

Valoarea rezistenței de succesiune pozitivă pentru cablurile de înaltă și joasă tensiune, ca o aproximare, poate fi calculată cu formula:

$$R'_L = \frac{\rho}{q_n}$$

Formula este valabilă pentru cabluri de Cu cu secțiunea între 4-240 mm² și cabluri de Al între 16-300 mm² la joasă tensiune.

La 20° C rezistența unui conductor cu secțiunea q_n și rezistivitate ρ va fi:

ρ este:	- pentru cupru	$\frac{1}{54} \frac{\Omega \text{mm}^2}{m}$
	- pentru aluminium	$\frac{1}{34} \frac{\Omega \text{mm}^2}{m}$
	- pentru aliaje de aluminium	$\frac{1}{31} \frac{\Omega \text{mm}^2}{m}$

Reactanța pozitivă poate fi dată de producător, determinată prin măsurători și prin calcule informative actuale, în cele ce urmează se prezintă reglementarea din CEI 60909/92 în care sunt luate în considerare următoarele tipuri de cabluri:

Tip. A Cabluri cu conductoare din cupru (aluminium), cu izolație din material termoplast de tip PVC și cu un înveliș de protecție sub formă de manta din material termoplast de tip PVC [N(A)YY].

Tip. B Cabluri cu conductoare din cupru (aluminium) cu izolație din material termoplast de tip PVC, conductor concentric din cupru, realizat torsadat și cu înveliș de protecție în formă de manta din material termoplast de tip PVC [N(A)YCWY].

Tip. C Cablu izolat cu conductoare de cupru (aluminium) cu o izolație impregnată pentru conductor (și izolație proprie), manta netedă extrudată din aluminium, înfășurare de protecție din bandă elastomer sau din plastic și o manta din material termoplast de tip PVC [N(A)KLEY].

Tip. D Cablu cu conductoare din cupru (aluminium) cu izolație din hârtie impregnată pentru conductoare, manta din plumb cu armătura din bandă de oțel și un înveliș exterior din material fibros [N(A)KBA].

Reactanța de succesiune pozitivă a cablurilor de joasă tensiune în concordanță cu standardele Germane este aratăată în figura 14 pentru cabluri cu patru, trei și jumătate și trei conductoare.

ANEXA 9 (continuare)

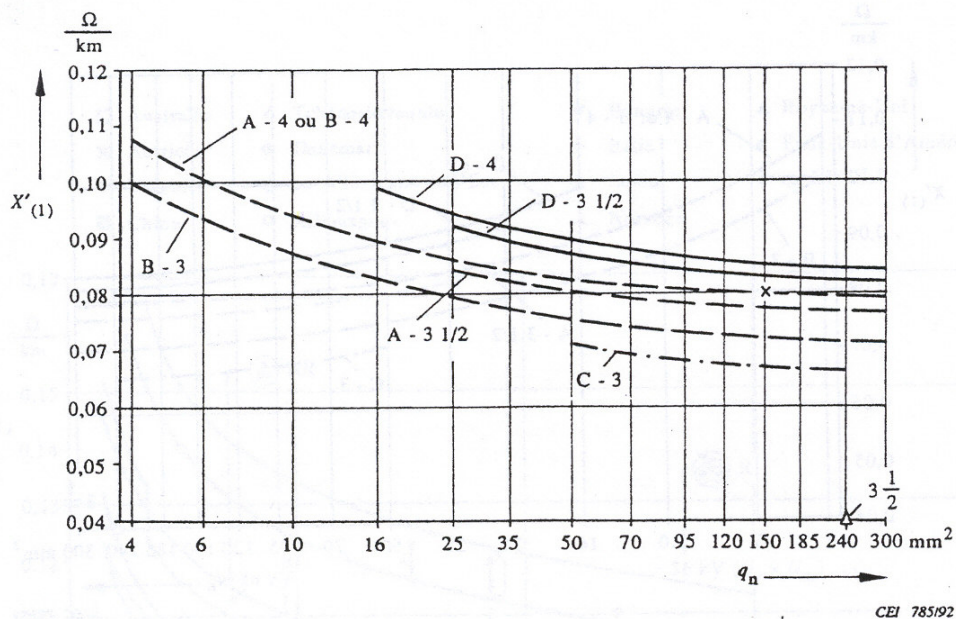


Fig. 14 Reactanțe de succesiune pozitivă a cablurilor de joasă tensiune din Cu sau Al, 50 Hz (Germania)

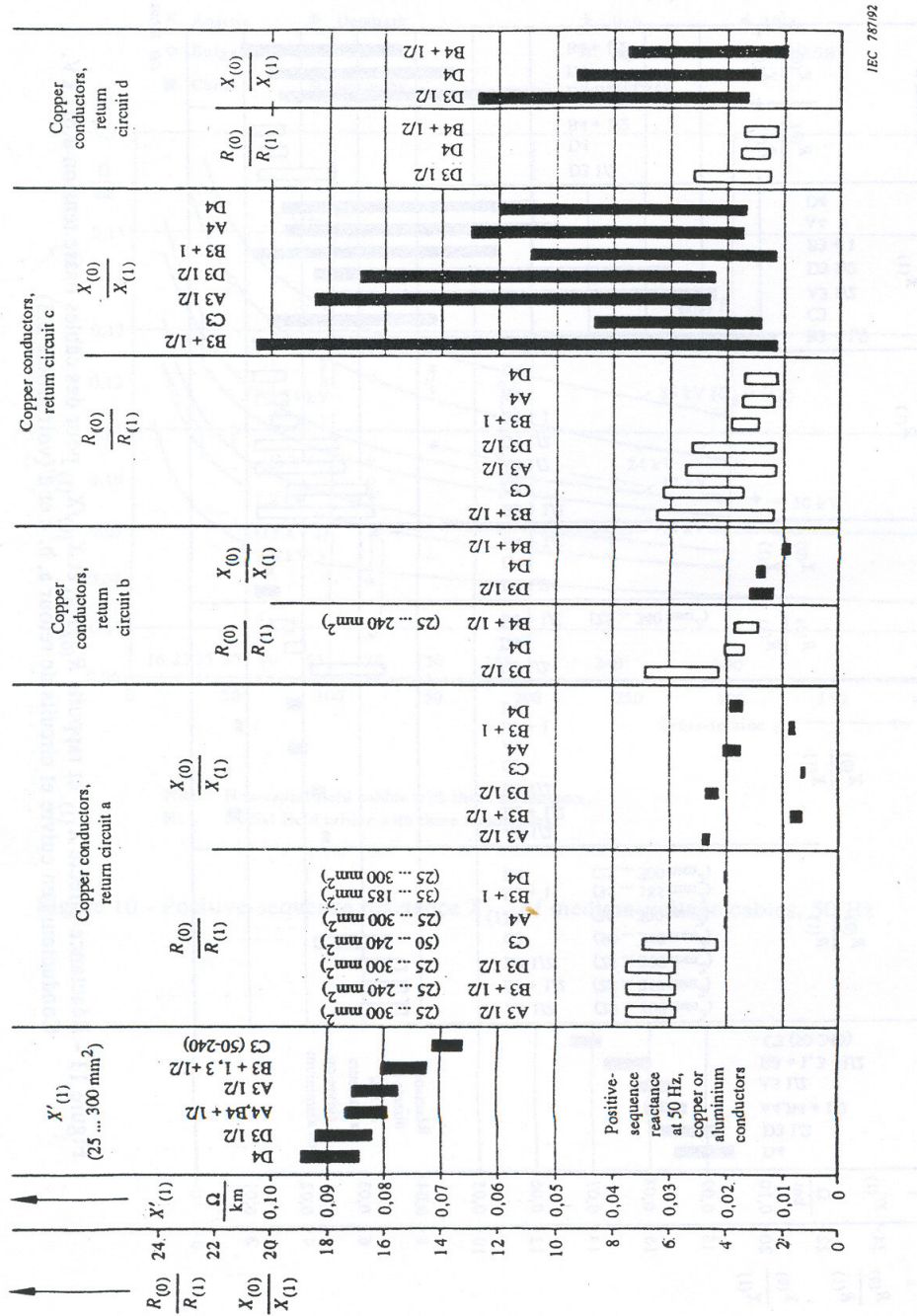
Reactanța de succesiune zero depinde de tipul realizării circuitului de întoarcere care poate fi:

- întoarcerea prin conductorul de nul;
- întoarcerea prin conductorul de nul și manta;
- întoarcerea prin conductorul de nul și pământ (100 Ω);
- întoarcerea prin conductorul de nul, manta și pământ (100 Ω).

În figurile 15 și 16 sunt date pentru cabluri de joasă tensiune 0,6/1 kV, reactanța de succesiune pozitivă cât și rapoartele $R_{(0)}/R_{(1)}$ și $X_{(0)}/X_{(1)}$ în funcție de tipul căi de întoarcere precum și de secțiunea conductorului de nul în raport cu conductorul de fază.

ANEXA 9 (continuare)

Fig. 15 – conductoare de Cu de joasă tensiune 0,6/1 kV, reactanța de succesiune pozitivă, și rapoartele $R_{(0)}/R_{(1)}$ și $X_{(0)}/X_{(1)}$ în funcție de calea de întoarcere.



IEC 787/92

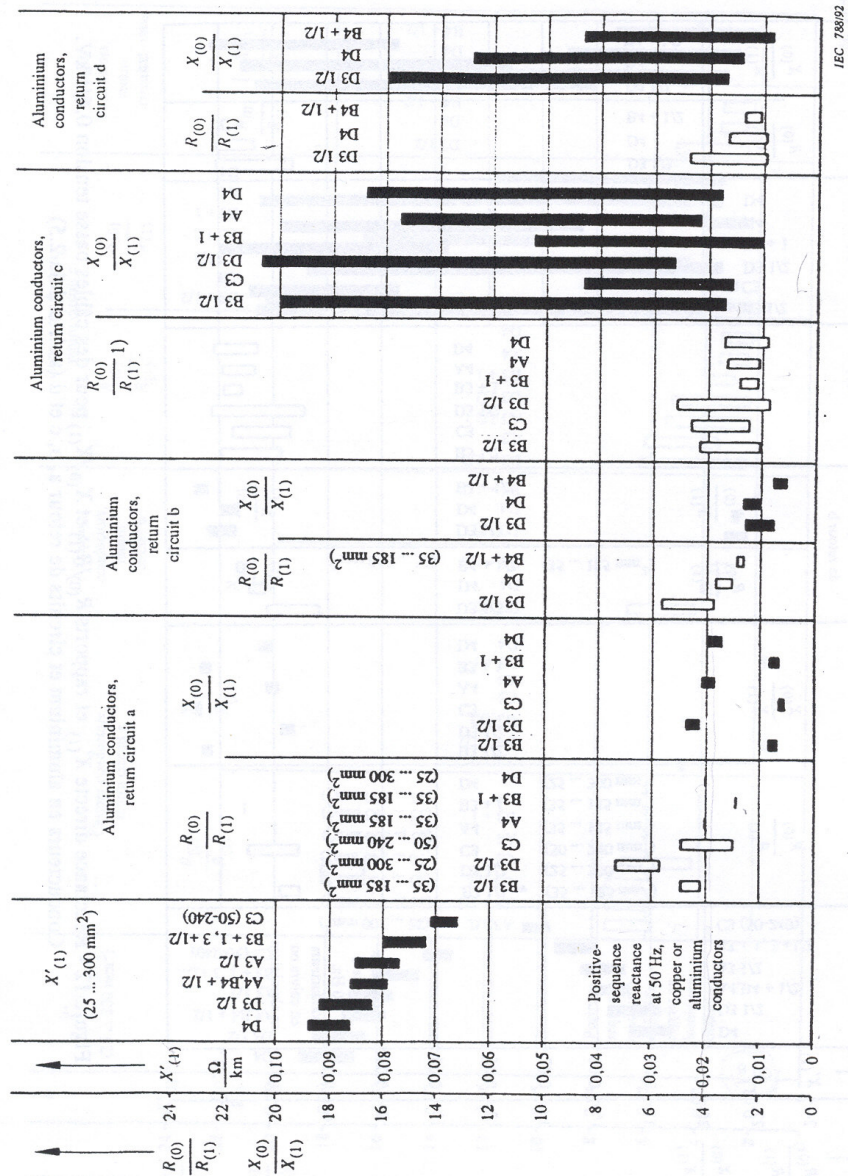


Fig. 16 – conductoare de Al de joasă tensiune 0,6/1 kV, reactanța de succesiune pozitivă, și rapoartele $R_{(0)}/R_{(1)}$ și $X_{(0)}/X_{(1)}$ în funcție de calea de întoarcere.

Impedanța unor elemente din circuitele electrice de joasă tensiune

În publicațiile recente ale CEI și VDE, în calculul curenților de scurtcircuit de joasă tensiune, nu sunt luate în considerare impedanțele unor elemente ca: bare colectoare, transformatoare de curent, contacte etc.

De altfel și în literatura sovietică se arată că scăderea “curenților de scurtcircuit poate conduce la erori în alegerea elementelor din sistemul de electroalimentare și a aparatului de protecție”, cu toate că în articol se dau valori pentru impedanțele suplimentare de introdus în circuit.

Deși în normele actuale nu este indicată considerarea unor impedanțe suplimentare, în cele ce urmează vor fi date indicații pentru determinarea acestora. Rămâne ca utilizarea lor să se facă în anumite situații, pentru verificarea și reglarea de precizie a aparatelor speciale de protecție.

• **Rezistențele de contact**, în cazul în care nu se cunosc alte valori, pot fi considerate (ca valori limită maxime, după relația lui Holm) egale cu:

$$R_c = \frac{10[mV]}{I_N[A]} \quad [m\Omega] \quad (1)$$

• **Aparatele de comutație și protecție.** Valoarea reactanței este neglijabilă. Valoarea rezistențelor interne proprii se poate deduce din valoarea pierderilor active de putere pe fază, care sunt precizate în cataloagele produselor:

$$R_{faza} = \frac{P_{faza}[W]}{I_N^2[A^2]} \quad [\Omega] \quad (2)$$

în care : P_{faza} - puterea disipată pe fază
 I_N - curentul nominal al aparatului.

Se menționează ca valoarea pentru puterea disipată este dată în general între borna de intrare și ieșire a aparatului, excluzând pierderile de putere în rezistențele de contact la bornele de record. La aparatele debroșabile însă sunt incluse și disipările în rezistențele de contact ale bornelor de intrare și ieșire (fără rezistențele în punctele de racord exterioare). Spre exemplu, pentru:

Înteruptoare Siemens 3 WN 6

I_N [A]	Pierderi [W]	
	montaj fix	debroșabile
630	40	80
800	60	130
1000	90	205

Înteruptoare ABB Isomax S 6 și S 7

I_N [A]	Pierderi [W]	
	montaj fix	debroșabile
630	90	115
800	96	125
1000	102	140

Anexa 10 (continuare)

Este interesant de observat că pentru transformatoarele de current cu $I_N > 500$ A, impedanța este neglijabilă.

- **Siguranțe fuzibile.** În cataloagele de produs este indicată puterea activă disipată pe fază, care permite determinarea $R_{fază}$. Pentru calculul total al rezistenței $R_{tfază}$ trebuie adăugate și cele două rezistențe de contact în broșele de legătură ale patronului calculate ca mai sus.

Deci:

$$R_{tfaza} = R_{faza} + 2R_c$$

- **Impedanța barelor colectoare.**

$$R_b = \rho \cdot \frac{l}{s} \quad [\Omega] \quad (3)$$

$$X_b = 0,0628 \cdot l \cdot \ln \frac{\delta}{\sigma} \quad [\Omega / km]$$

în care: ρ – rezistivitatea barei;

l – lungimea barei

s – secțiunea barei;

δ - media geometrică a distanțelor între bare (pentru dispoziție orizontală la distanța d între axele barelor):

$$\sigma = \sqrt[3]{2} \cdot d$$

σ - raza medie echivalentă a secțiunii dreptunghiulare de dimensiuni $a \times b$

$$\sigma = 0,224 \cdot (a + b)$$

- **Rezistența arcului la locul de producere a scurtcircuitului .**

$$R_{arc} = \frac{E_a \cdot l_a}{I_k} \quad (4)$$

în care: E_a – intensitatea câmpului electric. Se poate considera $E_a = 1,5$ V/mm;

l_a – lungimea arcului, mm (egală cu dublul distanței dintre fazele rețelei în punctual de scurtcircuit).

Se menționează că rezistența arcului este cu mult mai mare decât suma celorlalte rezistențe de pe circuit pentru un scurtcircuit la bornele transformatoarelor MT/JT (96% din valoarea totală: 8,84 m Ω față de 9,21 m Ω total). Pentru transformatoarele de 400,630 kVA importanța impedanței arcului se reduce la barele 2,3 (fig.17) etc, dar pentru transformatoarele de 1600,2500 kVA rezistența arcului rămâne predominantă până la bara 3 (de exemplu pentru transformatorul 1600 kVA: $R_{arc} = 10,3$ m Ω față de 12,01 m Ω total).

Se propune o formulă aproximativă:

$$R_{total} = \frac{2,5 \cdot \sqrt{S_t} \cdot k^3 + 320 \cdot a}{S_t} \quad (5)$$

în care: S_t – puterea nominală a transformatorului [kVA];

a – distanța dintre fazele rețelei în punctual de scurtcircuit [mm];

k – factor dependent de locul de scurtcircuit:

$k=2$ – pentru primul nivel al rețelei de distribuție (tablou de distribuție, aparate alimentate radial din tabloul principal de distribuție sau magistrale principale);

Anexa 10 (continuare)

$k=3$ – pentru nivel doi al rețelei (puncte de distribuție și aparate alimentate din primul nivel);

$k=4$ – pentru aparate și receptoare alimentate din nivelul 2.

Pentru schemele magistrale se determină rezistența de trecere cu (5), iar pentru schemele radiale:

$$R_{trecere_{rad}} \approx 1,5R_{trecere} \quad (5a)$$

Fig. 17 Rețea de joasă tensiune

