

CALCULUL CURENȚILOR DE SCURT-CIRCUIT ÎN REȚELELE ELECTRICE
NORMATIV PRIVIND METODOLOGIA DE CALCUL AL CURENȚILOR DE
SCURT-CIRCUIT ÎN REȚELELE ELECTRICE CU TENSIUNEA PESTE 1 kV (doc. CN
Transelectrica SA, 2001)

I. SCOP

Calculul curenților de scurtcircuit este necesar pentru luarea deciziilor în legătură cu dezvoltarea și exploatarea instalațiilor energetice.

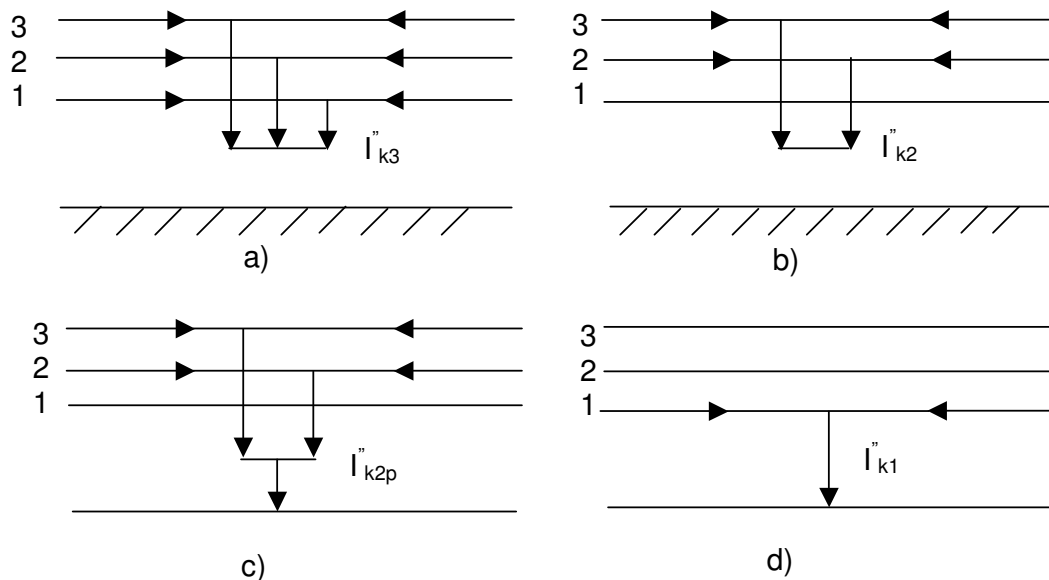


Fig.1. Tipuri de curenți de scurtcircuit (sensul curenților este ales arbitrar):
a - scurtcircuit trifazat simetric; b - scurtcircuit bifazat; c - scurtcircuit bifazat cu pământ; d - scurtcircuit monofazat.

Calculul curentului de scurtcircuit trifazat metalic (prin impedanță nulă), deși foarte rar în exploatare, constituie un element de bază pentru studiul rețelelor electrice; se efectuează întotdeauna în proiectare și în exploatare.

În rețelele cu neutrul legat direct la pământ (110 kV, 220 kV și 400 kV) un loc deosebit îl ocupă calculul curentului de scurtcircuit monofazat, ca defectul cel mai probabil.

II. DOMENIU DE APLICARE

Calculul curenților de scurtcircuit este necesar să se efectueze la:

- a) dimensionarea instalațiilor noi la solicitări dinamice și termice;
- b) verificarea instalațiilor existente la solicitări de scurtcircuit, în condiții de dezvoltare a instalațiilor sistemului energetic național;
- c) stabilirea protecției prin relee din instalațiile electrice, a automatizărilor de sistem - ca tipuri și reglaje;
- d) determinarea influenței liniilor electrice de înaltă tensiune asupra liniilor de telecomunicații, în vederea stabilirii măsurilor de protecție a acestora din urmă;
- e) determinarea nivelului supratensiunilor de comutație;
- f) caracterizarea sistemului energetic în raport cu o anumită bară a sistemului, atunci când se fac studii privind posibilitățile de racordare a unui consumator cu anumite caracteristici deosebite (regim deformant, șocuri de putere reactivă, etc.);
- g) analiza funcționării unor consumatori nesimetrice (de exemplu cupatoare electrice cu arc, cale ferată cu alimentare monofazată ș.a.);

h) întocmirea de scheme echivalente necesare în studii de stabilitate statică sau dinamică, optimizări de regim (spre exemplu scheme echivalente REI - DIMO).

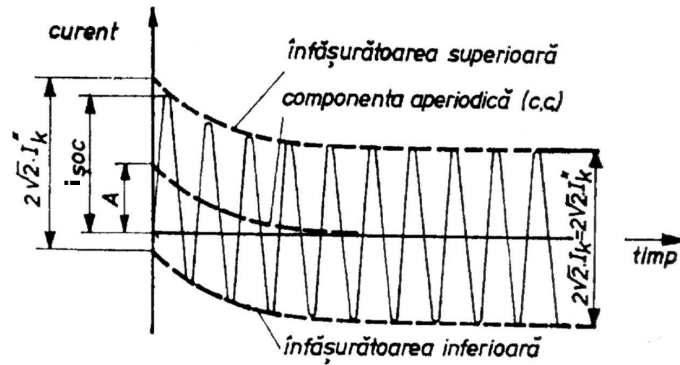
Calculule curenților de scurtcircuit se întocmesc cu o perspectivă diferită, în funcție de scopul lor și anume:

- a) 5 - 10 ani pentru dimensionarea instalațiilor noi;
- b) 1 - 3 ani pentru verificarea instalațiilor existente;
- c) 5 ani pentru determinarea influenței liniilor de înaltă tensiune asupra liniilor de telecomunicații;

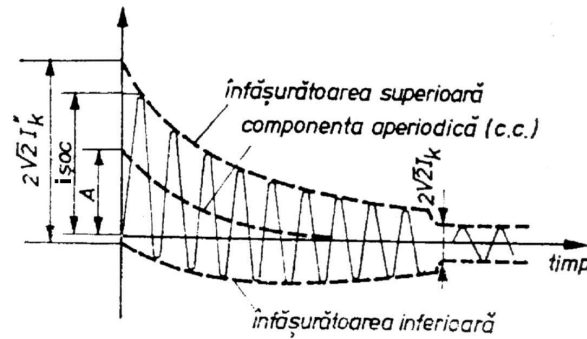
d) în mod curent, chiar și în timp real, la schimbări de configurație și regim de funcționare, pentru verificarea nivelului de solicitare la scurtcircuit (în cazul instalațiilor, funcționarea în apropierea limitei admisibile) și pentru reglajul protecției.

III. TERMINOLOGIE ȘI ABREVIERI

<i>Circuit electric echivalent</i>	Un model de descriere a funcționării unui circuit printr-o rețea de elemente ideale.
<i>Componenta aperiodică a curentului de scurtcircuit i_{cc}</i>	Valoarea medie a înfășurătoarei inferioară și superioară a curentului de scurtcircuit, descrescătoare de la valoarea inițială la zero (fig.2.).
<i>Curent de scurtcircuit net (maxim posibil)</i>	Curentul care ar circula dacă scurtcircuitul este înlocuit cu unul ideal printr-o impedanță nulă, care ar scoate din circuit aparatul, fără nici o modificare a alimentării.
<i>Curentul aport la scurtcircuit</i>	Curentul care parcurge laturile rețelei în condițiile unui scurtcircuit într-un punct al acesteia.
<i>Curentul de rupere I_r</i>	Valoarea efectivă a unei perioade complete a componentei simetrice de c.a. la un scurtcircuit net în momentul separării contactelor primului pol al unui aparat de comutație.
<i>Curentul de scurtcircuit</i>	Curentul care se încheie la locul de scurtcircuit. Curentul de scurtcircuit este, inițial, asimetric în raport cu axa de timp și poate fi descompus într-o componentă de curent periodică (simetrică) și o componentă aperiodică (fig. 2).
<i>Curentul de scurtcircuit de șoc $i_{șoc}$</i>	Valoarea instantaneei maxime posibile a unui curent de scurtcircuit. Această valoare depinde de momentul apariției scurtcircuitului (valoarea și faza tensiunii electromotoare). Calculul se face considerând condițiile în care există curenți maximi posibili.
<i>Curentul de scurtcircuit simetric</i>	Valoarea efectivă a componentei simetrice (a curentului alternativ c.a.) la o frecvență egală cu cea de exploatare, componenta aperiodică a curentului fiind neglijată. Se determină pentru o întreagă perioadă, dacă valoarea c.a. variază.
<i>Curentul de trecere I_D</i>	Valoarea maximă instantanee a curentului care parcurge o siguranță fuzibilă sau bobina de declanșare a unui aparat de deconectare rapidă în timpul funcționării acesteia.
<i>Curentul inițial de scurtcircuit I''_k</i>	Valoarea efectivă a componentei simetrice c.a. a unui curent de scurtcircuit în momentul producerii scurtcircuitului, dacă impedanța rămâne constantă.
<i>Curentul motorului asincron cu rotorul în scurtcircuit I_{RS}</i>	Cea mai mare valoare efectivă a curentului unui motor asincron cu rotorul în scurtcircuit alimentat la tensiunea nominală U_{NM} și la frecvența nominală.



a



b

Fig. 2. Variația curentului de scurtcircuit: a – în cazul unui defect departe de generator; b – în cazul unui scurtcircuit aproape de generator (reprezentare schematică); I_k' – curentul inițial de scurtcircuit (c.a.); $i_{șoc}$ – curentul de scurtcircuit de șoc; I_k – curentul permanent de scurtcircuit (c.a.); i_{cc} – componenta aperiodică a curentului de scurtcircuit (c.c.); A – valoarea inițială a componentei aperiodice.

<i>Curentul permanent de scurtcircuit I_k</i>	Valoarea efectivă a curentului de scurtcircuit care rămâne după trecerea fenomenelor tranzitorii (fig.2). Această valoare depinde de caracteristicile rețelei și a celor de reglaj ale generatoarelor.
<i>Curentul tranzitoriu de scurtcircuit I_k'</i>	Valoarea efectivă a curentului de scurtcircuit, determinată considerând reactanțele rețelei și reactanțele tranzitorii longitudinale x'_d ale generatoarelor.
<i>Defect</i>	Modificarea locală a unui circuit electric (de exemplu, ruperea unui conductor, slăbirea izolației).
<i>Factorul de tensiune c</i>	Raportul dintre tensiunea sursei echivalente de tensiune și tensiunea $U_N/\sqrt{3}$. 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. Valorile c sunt prezentate în tabelul 2.
<i>Impedanțe de scurtcircuit la locul de</i>	

<p><i>defect, K:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Impedanța pozitivă (Z^+) a unui sistem trifazat c.a. • Impedanța negativă (Z^-) a unui sistem trifazat de c.a. • Impedanța zero (Z^0) a unui sistem trifazat de c.a. <p>Impedanța de scurtcircuit a unui sistem trifazat (Z_k)</p>	<p>Impedanța pe fază într-un sistem de succesiune pozitivă văzută de la locul de defect K (anexa 1).</p> <p>Impedanța pe fază într-un sistem de succesiune negativă văzută de la locul de defect K (anexa 1).</p> <p>Impedanța pe fază într-un sistem de succesiune zero văzută de la locul de defect K (anexa 1); se include și impedanța dintre neutru și pământ $3 \cdot Z_N$.</p> <p>Formă prescurtată de exprimare pentru impedanța directă, în cazul calculelor curenților de scurtcircuit trifazați.</p>
<p><i>Impedanțele de scurtcircuit ale echipamentului electric:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Impedanța de scurtcircuit pozitivă (Z^+) a unui echipament electric • Impedanța de scurtcircuit negativă (Z^-) a unui echipament electric • Impedanța de scurtcircuit zero (Z^0) a unui echipament electric 	<p>Raportul dintre tensiunea fază – neutru și curentul de scurtcircuit corespunzător fazei unui echipament alimentat de un sistem de tensiuni de succesiune directă (anexa 1).</p> <p>Raportul dintre tensiunea fază – neutru și curentul de scurtcircuit corespunzător fazei unui echipament alimentat de un sistem de tensiuni de succesiune inversă (anexa 1).</p> <p>Raportul dintre tensiunea pe fază (fază – pământ) și curentul de scurtcircuit al unei faze a echipamentului electric, când acesta este alimentat de la o sursă de tensiune de c.a., dacă cei trei conductori de fază, paraleli, sunt utilizați pentru alimentare și un al patrulea conductor și/sau pământul drept conductor de întoarcere (anexa 1).</p>
<p><i>Puterea de scurtcircuit inițială, S''_k</i></p>	<p>Valoarea fictivă definită prin: $S''_k = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I''_k$ unde U_N - tensiunea nominală a rețelei</p>
<p><i>Reactanța supratranzitorie longitudinală a mașinii sincrone, X''_d</i></p>	<p>Reactanța în momentul apariției scurtcircuitului. Se definește ca raportul dintre valoarea inițială a unei variații bruște a amplitudinii componentei fundamentale a tensiunii electromotoare induse, produsă de fluxul longitudinal total al indusului și valoarea variației simultane a amplitudinii fundamentalei componentei longitudinale a curentului indus, mașina rotindu-se la turația nominală.</p> <p>Pentru calculul curenților de scurtcircuit este concludentă valoarea saturată a lui X''_d.</p> <p>Reactanța X''_d se dă în procente din impedanța nominală a mașinii:</p> $Z_{NG} = \frac{U_{NG}^2}{S_{NG}} \quad [\Omega] \quad \text{adică} \quad x''_d = \frac{X''_d}{Z_{NG}} \quad \%$
<p><i>Scurtcircuit</i></p>	<p>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.</p> <p>În cadrul acestui normativ se va considera că scurtcircuitele polifazate se realizează simultan pe toate fazele.</p>
<p><i>Scurtcircuit aproape de generator</i></p>	<p>Un scurtcircuit în care cel puțin o mașină sincronă contribuie cu un curent de scurtcircuit net inițial, care este mai mare decât dublul curentului său nominal, sau un scurtcircuit la care motoarele sincrone și asincrone contribuie cu peste 5% din I''_k fără aportul motoarelor.</p>
<p><i>Scurtcircuit departe de generator</i></p>	<p>Un scurtcircuit în timpul căruia valoarea componentei simetrice de c.a. rămâne practic constantă.</p>

<i>Sursă de tensiune (independentă)</i>	Un element activ care poate fi reprezentat printr-o sursă de tensiune ideală independentă de toți curenții și toate tensiunile din circuit, în serie cu un element pasiv.
<i>Tensiunea de exploatare, U</i>	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.
<i>Tensiunea nominală a sistemului, U_N</i>	Tensiunea prin care se desemnează o rețea și la care se face referire pentru anumite caracteristici de funcționare a rețelei; reprezintă tensiunea între faze, standardizată, la care sistemul este proiectat să funcționeze și în raport cu care se asigură funcționarea optimă a sistemului. Tensiunile nominale sunt standardizate (SR CEI 38 + A1).
<i>Tensiunea supratranzitorie E'' a mașinii sincrone</i>	Valoarea efectivă a tensiunii interne simetrice a unei mașini sincrone aplicată real în spatele reactanței supratranzitorii X'' în momentul producerii scurtcircuitului. Ea este dependentă de sarcina rețelei în momentul anterior defectului.
<i>Tensiunea sursei echivalente de tensiune, $c \cdot U_N / \sqrt{3}$</i>	Tensiunea unei surse ideale, care se aplică în punctul unde se produce scurtcircuitul, în rețeaua de secvență pozitivă, ca singura tensiune activă a sistemului (modul de calcul al scurtcircuitului se prezintă în cap.VI).
<i>Tensiunea tranzitorie E' a mașinii sincrone</i>	Valoarea efectivă a tensiunii interne simetrice a unei mașini sincrone aplicată real în spatele reactanței tranzitorii X' în momentul producerii scurtcircuitului.
<i>Timp minim de deconectare, t_{min}</i>	Cel mai scurt timp între începutul unui curent de scurtcircuit și prima separare a contactelor unui pol al aparatului de deconectare. Timpul t_{min} este suma dintre timpul cel mai scurt de acționare al protecției și cel mai scurt timp de deschidere al întreruptorului.
<i>Simboluri, indici și exponenți.</i>	Simbolurile reprezintă mărimi având valori numerice și dimensiuni diferite într-un sistem coerent de unități de măsură (în acest normativ Sistemul Internațional-SI).
η	Randamentul motorului asincron.
ρ	Rezistivitate.
χ	Factor pentru determinarea curenților de vârf (factor de șoc).
μ	Factor pentru calculul curentului simetric de rupere al motoarelor sincrone.
λ	Factor pentru calculul curentului maxim permanent de scurtcircuit.
ΔP_{sc}	Pierderile totale în înfășurările unui transformator la curentul nominal.
B	Valoare de bază.
C	Factor de tensiune.
$C \cdot U_N / \sqrt{3}$	Sursa echivalentă de tensiune (valoarea efectivă a acesteia).
$\cos \varphi$	Factor de putere.
E'	Tensiunea tranzitorie a mașinii sincrone.
E''	Tensiunea supratranzitorie a mașinii sincrone.
f	Frecvență.
G	Generator.

I'_k	Curentul tranzitoriu de scurtcircuit simetric.
I''_k	Curentul inițial de scurtcircuit simetric (valoare efectivă).
I''_{k1}	Curentul inițial de scurtcircuit monofazat.
I''_{k2}	Curentul inițial de scurtcircuit bifazat.
I''_{k2p}	Curentul inițial de scurtcircuit bifazat cu pământ.
I''_{kpp}	Curentul de scurtcircuit inițial la dublă punere la pământ.
I_b	Curentul de bază.
i_{cc}	Componenta aperiodică a curentului de scurtcircuit.
I_D	Curentul de trecere.
I_k	Curentul permanent de scurtcircuit simetric.
I_N	Curentul nominal al unui echipament electric (valoare efectivă).
I_p	Curentul de pornire al motoarelor.
I_r	Curent de rupere (valoare efectivă).
I_{RS}	Curentul motorului asincron cu rotorul în scurtcircuit.
$i_{șoc}$	Curentul de scurtcircuit de șoc.
IT	Înaltă tensiune.
JT	Joasă tensiune.
K	Defect, locul de scurtcircuit (defect).
K_1	Scurtcircuit monofazat, fază-neutru sau fază pământ.
K_2	Scurtcircuit bifazat.
K_3 sau K	Scurtcircuit trifazat.
K_{bloc}	Factor de corecție al impedanței unui bloc generator - transformator.
K_G	Factor de corecție al impedanței generatorului.
k_t	Coeficient de decrement.
K_T sau k_T	Raportul de transformare nominal $K_T > 1$.
l	Lungimea unei linii.
L	Linie.
M	Motor.
MT	Medie tensiune.
N	Valoare nominală.
NM	nominal motor
P	Puterea activă a unui echipament.
P	Scurtcircuit cu pământ.
Q	Factor pentru calculul curentului simetric de rupere al motoarelor sincrone.
Q,S	Punct de legătură a unei alimentări (sursă).
r	Factor de reducere a curentului de succesiune zero de scurgere prin pământ.
R sau r	Rezistențe.
r_o	Rezistența lineică (pe unitate de lungime).
s	Secțiunea nominală.
S'_k	Puterea de scurtcircuit inițială.
S_N	Puterea aparentă nominală a unui echipament electric.
T	Transformator.
t_{min}	Timp minim de deconectare.
U	Tensiunea de exploatare.
U_b	Tensiunea de bază.
u_{KN}	Tensiunea de scurtcircuit nominală, în procente.

U_N	Tensiunea nominală dintre faze a unei rețele (valoare efectivă).
u_{rN}	Căderea de tensiune rezistivă nominală, în procente.
X sau x	Reactanță.
x_0	Reactanță lineică (pe unitatea de lungime).
x_{db} , x_{db} , x_d	Reactanțele supratranzitorie, tranzitorie și sincronă longitudinale ale unui generator (valori absolute sau raportate la impedanța nominală a generatorului).
\underline{Z}	Impedanța de scurtcircuit de succesiune negativă.
\underline{Z}^+	Impedanța de scurtcircuit de succesiune pozitivă.
\underline{Z}^0	Impedanța de scurtcircuit succesiune zero.
\underline{Z}_k	Impedanța de scurtcircuit trifazat.
<i>Exponenți:</i>	
+	Componentă pozitivă (directă).
-	Componentă negativă (inversă).
0	Componentă zero (homopolară).
"	Valoare inițială (supratranzitorie).
'	Valoare tranzitorie.

IV. PREMISE DE CALCUL AL CURENȚILOR DE SCURTCIRCUIT

Premisele pentru calculul curenților de scurtcircuit sunt în funcție de scopul studiului.

Pentru determinarea solicitărilor la scurtcircuit în rețelele de înaltă tensiune este suficientă efectuarea calculelor în ipoteze simplificatoare care admit:

- egalitatea în modul și argument a tuturor tensiunilor electromotoare (t.e.m.) ;
- neglijarea rezistențelor rețelelor aeriene, considerându-se liniile ca simple reactanțe;
- neglijarea susceptanței capacitive a liniilor în schemele de secvență pozitivă și negativă;
- neglijarea sarcinilor, considerându-se numai aportul motoarelor sau compensatoarelor sincrone precum și al motoarelor asincrone, numai dacă sunt în apropierea locului de defect și au o anumită putere totală .

Acest gen de calcule, numite din cauza ipotezei făcute asupra t.e.m. metodă de curent continuu, se poate face manual pe scheme simple și cu ajutorul unor programe adecvate, utilizând calculatoare personale sau stații de lucru.

Pentru studiul regimurilor dinamice, analiza condițiilor de stabilitate statică, întocmirea de scheme echivalente de calcul, analiza și alegerea judicioasă a caracteristicii și a reglajului protecției de distanță, a protecției diferențiale de fază etc., este necesar să se efectueze un calcul de scurtcircuit exact.

În acest caz, sistemul energetic analizat este reprezentat fidel, calculul regimului cu scurtcircuit permanent fiind practic un calcul de regim în care, la locul de defect, se introduce o impedanță (șunt) corespunzătoare tipului de scurtcircuit analizat. Efectuarea unor astfel de calcule a devenit posibilă numai datorită introducerii calculatoarelor numerice.

În rețelele de medie tensiune, premisele de calcul sunt aceleași ca și în calculele rețelelor de înaltă tensiune cu mențiunea că, în cazul utilizării metodei simplificate liniile aeriene și cablurile electrice se consideră prin rezistențele și reactanțele lor inductive.

Pentru anumite situații prevăzute de standarde sau prescripții, se poate considera la locul de defect o rezistență.

Astfel, pentru verificarea la solicitări termice în caz de scurtcircuit a elementelor liniilor electrice aeriene se consideră la locul de defect o rezistență de 5 Ω .

La verificarea influenței liniilor de energie electrică asupra liniilor de telecomunicații se consideră o rezistență având următoarele valori:

- 15 Ω pentru defecte pe linii aeriene cu conductoare de protecție;

- 50 Ω pentru defecte pe linii aeriene fără conductoare de protecție.

Se menționează că valorile curenților de scurtcircuit se pot determina și din probe pe viu sau măsurători pe un analizor de rețea.

Adesea acestea servesc la etalonarea unor metode de calcul utilizate sau în cazul unor instalații deosebit de importante.

Evident, determinarea prin calcul, are avantajul că poate fi aplicată pentru instalații existente ca și pentru cele proiectate, pentru regimuri frecvent și mai puțin frecvent întâlnite.

În afara metodei de investigație, scopul studiului mai influențează și alte premise de calcul.

În calculele de scurtcircuit, generatoarele vor fi reprezentate prin:

- reactanța supratranzitorie, pentru calculul solicitărilor dinamice și termice;
- reactanța tranzitorie, pentru determinarea valorii curentului de scurtcircuit la $t = 0,1s$, studiul stabilității dinamice în cazul în care se consideră un reglaj de tensiune ideal ($E'_q = \text{const}$), stabilirea generatorului echivalent al sistemului în vederea determinării repartiției șocurilor de putere reactivă ș.a;

- reactanța sincronă, pentru determinarea valorii curenților în regim de scurtcircuit pentru timpi mari (peste 10 s), studiul stabilității statice naturale ș.a.

Este de remarcat că indicațiile CEI prevăd pentru impedanțele de scurtcircuit ale generatoarelor (debitând direct la bare sau bloc cu transformatoare) introducerea unui factor de corecție care ține seama de creșterea tensiunii electromotoare interne în funcție de factorul de putere al generatorului în regim de funcționare înainte de defect, ceea ce conduce la o micșorare a impedanței de scurtcircuit a generatorului (blocului) cu 3 ... 10% .

Regimul de funcționare al sistemului energetic considerat în calcul (generatoare și motoare, linii și transformatoare în funcțiune) trebuie, de asemenea, ales corelat cu scopul calculului.

Calculele de dimensionare a echipamentului și a elementelor de construcție din instalațiile electrice, a prizelor de pământ, a protecției liniilor de telecomunicații, trebuie să se efectueze pentru "regimul maxim" de funcționare și - la proiectare - pentru o etapă de perspectivă suficient de îndepărtată (vezi II).

Pentru verificarea condițiilor pe care le impune sistemului prezența unor consumatori caracterizați prin șocuri de putere activă și reactivă, ca și pentru verificarea condițiilor de siguranță a protecției prin relee ș.a., este necesar să se considere "regimul minim" de funcționare.

Regimul maxim este caracterizat prin:

- toate generatoarele, liniile și transformatoarele rețelei în funcțiune;
- numărul maxim previzibil de transformatoare funcționează cu neutrul legat la pământ.

Regimul minim este caracterizat prin:

- numărul minim previzibil de generatoare, linii și transformatoare în funcțiune, în zona analizată;
- numărul minim posibil de transformatoare cu neutrul legat la pământ în zona analizată;
- neglijarea aportului motoarelor asincrone.

De regulă, se efectuează calculul curenților de scurtcircuit trifazat metalic, iar în rețelele cu neutrul legat la pământ și calculul curenților de scurtcircuit monofazat sau bifazat cu pământul.

În funcție de scopul calculului trebuie aleasă metoda de investigație (aproximativă sau exactă). În cele ce urmează se indică metoda de calcul aproximativă și se introduc factori de corecție pentru apropierea rezultatelor de cele obținute prin metoda exactă.

Acești factori sunt:

- *Factorul de tensiune - c*

Factorii de tensiune c_{\min} și c_{\max} sunt utilizați pentru corectarea tensiunii echivalente în punctul de scurtcircuit la determinarea curenților de scurtcircuit inițiali, maximi și minimi.

- *Factorul de corecție al impedanței generatoarelor - K.*

Factorii de corecție K_G (pentru generator debitând la tensiunea sa nominală) și K_{bloc} (pentru bloc generator - transformator) sunt utilizați pentru a se ține seama de regimul de funcționare al generatoarelor.

- *Factorul pentru determinarea curentului de vârf (de șoc) - χ*

- Factori pentru determinarea variației componentei alternative a curentului de scurtcircuit, la un defect în apropierea generatorului (μ, λ, k_t).
- Factori pentru stabilirea aportului motoarelor asincrone la curentul de scurtcircuit de rupere (q).

V. METODE ȘI CĂI DE DETERMINARE A SOLICITĂRILOR DE SCURTCIRCUIT

V.1. Ipoteze de calcul

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 generatoare. Astfel:

I. *Scurtcircuit departe de generator* (fig. 2a), caz în care componenta periodică, alternativă a curentului de scurtcircuit are o valoare practic constantă ($I''_k = I_k$) pe toată durata scurtcircuitului.

II. *Scurtcircuit aproape de generator* (fig. 2b), caz în care componenta periodică, alternativă, a curentului de scurtcircuit are o valoare ce variază în timp ($I''_k \neq I_k$), variație ce trebuie avută în vedere la stabilirea valorii curentului de rupere și permanent.

În majoritatea cazurilor practice, în funcție de scopul în care se utilizează rezultatele, nu este necesară cunoașterea evoluției pas cu pas a valorii curentului de scurtcircuit. În cazul I prezintă interes numai valoarea componente simetrice de c.a. și valoarea de vârf $i_{\text{șoc}}$ a curentului de scurtcircuit. În cazul II însă trebuiesc determinate valorile componente alternative a curentului de scurtcircuit la timpul zero (I''_k), în regim permanent (I_k) precum și la timpul de rupere (I_r) și curentul de șoc $i_{\text{șoc}}$.

Această variație se stabilește considerând :

- modificarea impedanțelor surselor în timp și refăcând calculul pentru diferite momente (inițial - cu reactanțe supratranzitorii, la timpul de rupere - cu reactanțe tranzitorii, permanent - cu reactanțe sincrone);
- curbe sau/și relații de variație în timp a aportului la scurtcircuit a generatoarelor de diferite tipuri în funcție de distanța electrică dintre generator și locul de defect.

$i_{\text{șoc}}$ depinde de constanta de timp de decrement a componente aperiodice și de frecvență, adică de raportul R/X al impedanței de scurtcircuit Z_k și este maxim dacă scurtcircuitul se produce la trecerea tensiunii prin zero.

În rețelele buclate există diferite constante de timp.

De aceea nu este posibilă indicarea unei metode exacte de calcul a lui $i_{\text{șoc}}$ și i_{cc} .

Pentru determinarea curentului asimetric de rupere componenta aperiodică i_{cc} a curentului de scurtcircuit (fig.2) poate fi calculată cu o precizie suficientă cu relația:

$$i_{cc} = \sqrt{2} \cdot I''_k e^{-2\pi f t R/X} \quad (1)$$

unde:

- I''_k - curentul inițial simetric de scurtcircuit;
- f - frecvența nominală (50 Hz);
- t - timpul;
- R/X - raportul impedanței.

Calculul curenților minimi și maximi de scurtcircuit se bazează pe următoarele simplificări:

- pe durata scurtcircuitului nu se produce o schimbare în ceea ce privește numărul de circuite afectate (adică, un scurtcircuit trifazat rămâne trifazat, un scurtcircuit monofazat rămâne monofazat etc.);
- ploturile transformatoarelor se consideră în poziția reală;
- nu se consideră rezistența arcului.

Deși aceste ipoteze nu sunt absolut adevărate pentru sistemele energetice, adoptarea lor permite studierea scurtcircuitelor cu o precizie suficientă.

V.2. Metode de calcul

Calculul curenților de scurtcircuit simetrici și nesimetrici se face utilizând metoda componentelor simetrice.

Metoda componentelor simetrice necesită calculul a trei componente independente (de secvență pozitivă, negativă și zero), fără legături între ele în afara condițiilor de la locul de scurtcircuit.

Fiecare dintre aceste componente are propria ei impedanță. Valorile impedanțelor directă și inversă diferă esențial între ele numai în cazul mașinilor rotative. În cazul în care scurtcircuitul este departe de generator se admite $Z^+ = Z^-$. Impedanțele de secvență zero sunt, de regulă, diferite de cele pozitive și Z^0 poate fi mai mic sau mai mare decât Z^+ .

Schema pentru calculul curenților de scurtcircuit, dacă se aplică teoria componentelor simetrice, se întocmește numai pentru o fază, atât în calculul scurtcircuitelor simetrice cât și al celor nesimetrice.

Toate elementele rețelei care intervin în calculul curenților de scurtcircuit se introduc în schema de calcul prin impedanțele lor (conform tabelului 3).

Impedanțele pot fi exprimate în unități de măsură [Ω] sau în unități relative (tabelul 3).

În cazul schemelor cu mai multe trepte de tensiune, cuplate prin transformatoare, toate impedanțele trebuie raportate la aceeași treaptă de tensiune (de regulă cea la care are loc defectul). În cazul exprimărilor în unități relative, toate impedanțele trebuie raportate la o aceeași impedanță de bază sau, ceea ce este echivalent, la o aceeași putere de bază (S_b) și tensiune de bază (U_b).

Dacă se calculează curenții de scurtcircuit în puncte cu tensiuni diferite, impedanțele exprimate în ohmi se modifică dar, impedanțele în unități relative rămân neschimbate.

Pornind de la condițiile fizice la locul de defect și transformându-le în valori exprimate prin componentele simetrice de tensiune și curent, se obțin schemele echivalente și relațiile de calcul prezentate în tabelul 1- C7.

(1). Generator echivalent de tensiune la locul de defect

Determinarea curentului de scurtcircuit la locul de defect K este posibilă cu ajutorul unui generator echivalent de tensiune. Pentru aceasta se pot neglija informațiile operaționale privind sarcina consumatorilor, poziția comutatoarelor de ploturi ale transformatoarelor, excitația generatoarelor; de asemenea nu sunt necesare calculele suplimentare privind circulațiile de puteri în momentul scurtcircuitului.

Generatorul echivalent de tensiune reprezintă tensiunea reală la locul de scurtcircuit înainte de apariția acestuia, în condițiile cele mai grele. Aceasta va fi singura sursă activă de tensiune a sistemului. Tensiunile interne ale tuturor mașinilor sincrone și asincrone se vor considera zero.

Mai mult, în această metodă se neglijează toate capacitățile liniilor și toate admitanțele paralele ale celorlalte elemente pasive cu excepția celor de secvență zero (în cazul scurtcircuitelor nesimetrice în rețelele de înaltă tensiune).

În sfârșit, transformatoarele de înaltă tensiune sunt în multe cazuri prevăzute cu comutatoare de ploturi sub sarcină, în timp ce transformatoarele care alimentează rețeaua de medie tensiune au - de regulă - puține trepte ($\pm 2 \times 2,5\%$). Pozițiile reale ale comutatorului de ploturi în cazul scurtcircuitelor departe de generator nu sunt importante, eroarea introdusă fiind neglijabilă.

Tabelul 2. Valorile factorului de tensiune c

Tensiuni nominale U_N	Factorul de tensiune c, pentru calculul curentului de scurtcircuit maxim	Factorul de tensiune c, pentru calculul curentului de scurtcircuit minim
100 - 1000 V (joasă tensiune)	1,05	0,95
1 - 20 kV (medie tensiune)	1,1	1
20 - 220 kV (înaltă tensiune)	1,1	1
400 kV	1	1

Sursa echivalentă de tensiune pentru calculul curentului maxim de scurtcircuit poate fi stabilită, conform tabelului 2, astfel:

$$- c \cdot U_N / \sqrt{3} = 1,0 \cdot U_N / \sqrt{3} \quad \text{în toate sistemele cu tensiune de la 1 kV la 220 kV} \quad (2a)$$

$$- c \cdot U_N / \sqrt{3} = 1,1 \cdot U_N / \sqrt{3} \quad \text{în sistemele cu tensiunea 400 kV și peste} \quad (2b)$$

(2). Impedanțele de scurtcircuit

Calculul curenților de scurtcircuit necesită reducerea schemei rețelei la o impedanță văzută de la locul de defect, impedanța de scurtcircuit. Aceasta trebuie deosebită de impedanțele fiecărui element. Atât impedanța de scurtcircuit echivalentă cât și impedanțele elementelor se definesc pentru secvențele pozitivă, negativă și zero.

În tabelul 3 se prezintă relațiile de determinare a impedanțelor diferitelor elemente ale rețelelor electrice.

Tabel 3. Parametrii elementelor de sistem

Elementul	Relații în unități absolute [Ω]	Relații în unități relative ($U_b = U_N$)[u.r.]
Generator (compensator, motor sincron)	$0,05 \cdot X''_d$ pentru $U_N > 1$ kV, $S_N > 100$ MVA $R = 0,07 \cdot X''_d$ pentru $U_N > 1$ kV, $S_N < 100$ MVA $0,15 \cdot X''_d$ pentru $U_N < 1$ kV	
	$X = [x(\%) / 100] \cdot (U_N^2 / S_{NG})$ unde $x: X''_d, X'_d, X_d$	$X = [x(\%) / 100] \cdot (S_b / S_{NG})$ unde $x: X''_d, X'_d, X_d$
Motor asincron	$R \cong 0$	
	$X = \frac{1}{I_{por} / I_N} \cdot \frac{U_N^2}{S_{NM}}$	$X = \frac{1}{I_{por} / I_N} \cdot \frac{S_b}{S_{NM}}$
Transformator cu două înfășurări	$R = \Delta P_{scc} \cdot \frac{U_N^2}{S_N^2} \cdot 10^{-3}$	$R = \Delta P_{scc} \cdot \frac{S_b}{S_N^2} \cdot 10^{-3}$
	ΔP_{scc} - pierderile la sarcină nominală ale transformatorului	
	$X = \frac{U_k(\%)}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_N}$	$X = \frac{U_k(\%)}{100} \cdot \frac{S_b}{S_N}$
Linii electrice aeriene, cabluri	$R = r_0 \cdot I$ $X = x_0 \cdot I$	$R = r_0 I \cdot \frac{S_b}{U_N^2}$ $X = x_0 I \cdot \frac{S_b}{U_N^2}$
	$R \cong 0$	
Bobine de reactanță	$X = \frac{u_k(\%)}{100} \cdot \frac{U}{\sqrt{3} I_N}$ u_k - căderea de tensiune nominală (reactanța relativă)	$X = \frac{U_k(\%)}{100} \cdot \frac{I_b}{I_N} \cdot \frac{U_N}{U_b}$
	$R = P \cdot \frac{U_N^2}{S^2}$ $X = Q \cdot \frac{U_N^2}{S^2}$	$R = P \cdot \frac{S_b}{S^2}$ $X = Q \cdot \frac{S_b}{S^2}$
Sarcina		
Rețeaua de alimentare	$R_t \cong 0,1 + 0,15 X_k$ $X_k = \frac{U_N^2}{S_k}$	$X_K = \frac{c \cdot S_b}{S_K}$

Calculul curenților de scurtcircuit departe de generator

Defectul poate fi alimentat (fig.4):

- a) dintr-o sursă unică;
- b) din mai multe surse nebuclate;
- c) din mai multe surse, care funcționează cuplate în paralel.

(1). Curentul simetric inițial de scurtcircuit I''_k

$$a) \quad I''_k = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} Z_k} \quad (3)$$

unde (fig.4a): $c \cdot U_N / \sqrt{3}$ sursa echivalentă de tensiune:

$$R_k = R_{Qt} + R_T + R_L$$

$$X_k = X_{Qt} + X_T + X_L$$

$$Z = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$$

Rezistențele de ordin $R_k < 0,3 X_k$ pot fi neglijate.

Impedanțele sistemului $Z_{Qt} = R_{Qt} + jX_{Qt}$ se raportează la tensiunea părții transformatorului unde apare scurtcircuitul.

În acest caz:

$$I_k = I_r = I''_k \quad (4)$$

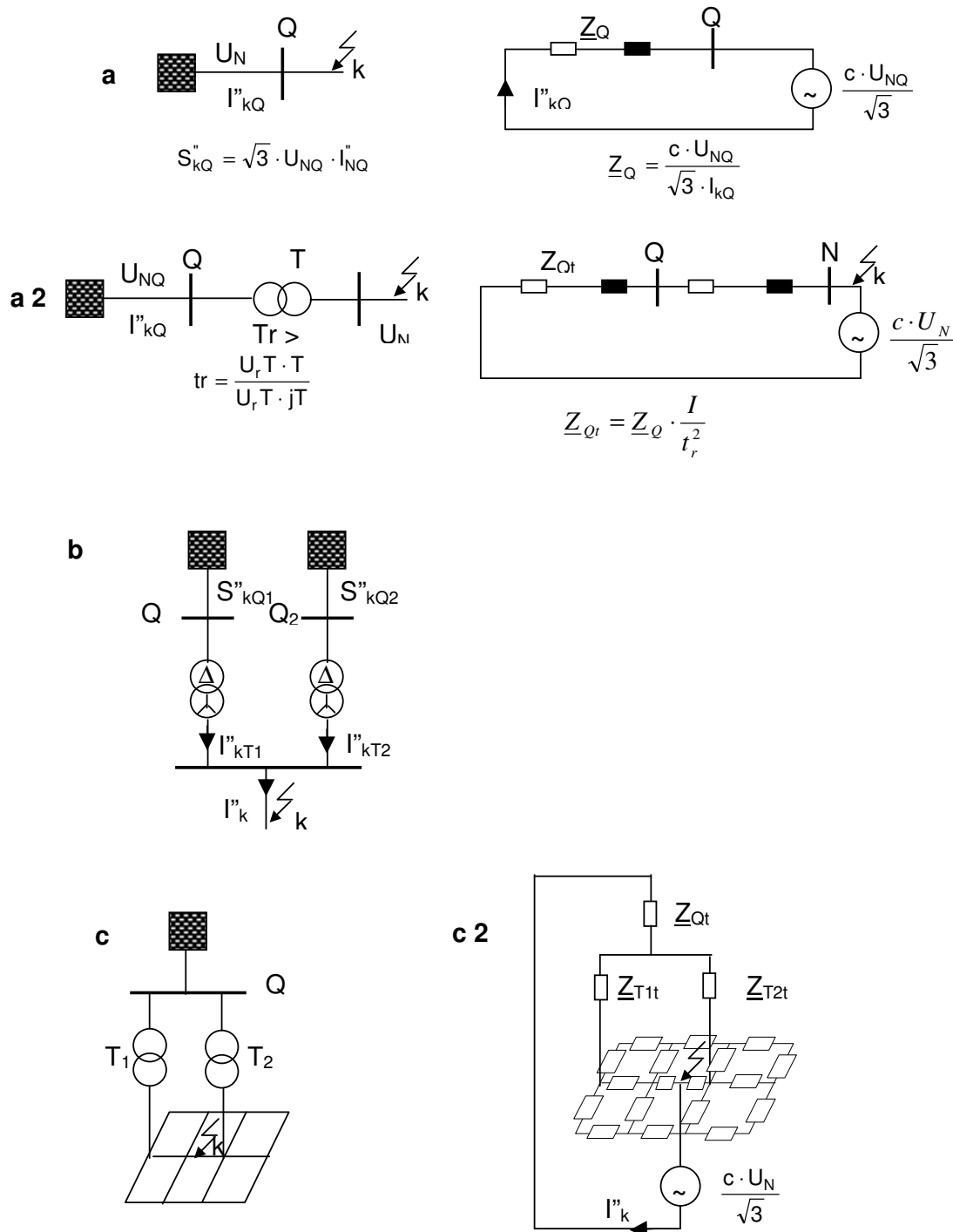


Fig.4 Scurtcircuit departe de generator: a – alimentat dintr-o sursă; 1 – direct; 2 – prin transformator; b – alimentat de surse nebuclate (impedanța fiderului cu scurtcircuit se neglijează); c – alimentat dintr-o rețea buclată; 1 – schema sistemului; 2 – schema echivalentă. Z_Q , Z_{T1t} , Z_{T2t} – impedanțe raportate la joasă tensiune.

b) Curentul inițial de scurtcircuit, curentul de rupere și curentul permanent de scurtcircuit la locul de defect, alimentat din surse care nu sunt buclate între ele (fig. 4b) poate fi considerat a fi compus din aportul independent al fiecărei surse:

$$\underline{I''_k} = \underline{I''_{kT1}} + \underline{I''_{kT2}} \quad (5)$$

Suma este fazorială dar, în majoritatea cazurilor, fazele curenților fiind apropiate, se poate face suma algebrică.

$$I_k = I''_k = I_r \quad (6)$$

Aportul fiecărei surse se determină ca în cazul a).

Impedanța între punctul de scurtcircuit și bară poate fi neglijată dacă este mai mică decât $0,03U_N/I''_k$, I''_k fiind curentul determinat prin relația (5). Dacă condiția nu este îndeplinită, sursele nu mai debitează independent pe scurtcircuit și se aplică prevederile de la c).

c) În concordanță cu exemplul din fig.4, sursa echivalentă de tensiune este aplicată la nodul de defect și este singura sursă activă de tensiune în rețea.

Calculul se face în concordanță cu metoda prezentată mai sus determinând impedanța directă de scurtcircuit văzută de la locul de defect. Se fac transformările necesare în rețea (de exemplu conexiunea serie, paralel, transformări stea - triunghi) considerând impedanțele pozitive ale echipamentului. Toate impedanțele sunt raportate la aceeași tensiune (de regulă, cea de la locul de defect):

$$I''_k = c \frac{U_N}{\sqrt{3} Z_k} \quad (7)$$

unde: $c \cdot U_N / \sqrt{3}$ tensiunea sursei echivalente de tensiune (conform III);

Z_k - impedanța de scurtcircuit.

$$I_k = I''_k = I_r \quad (8)$$

(2). Curentul de scurtcircuit de șoc

a) Deoarece scurtcircuitul este alimentat printr-un circuit serie, curentul de scurtcircuit de șoc are expresia:

$$i_{\text{șoc}} = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot I''_k \quad (9a)$$

Factorul χ se ia din fig.5 în funcție de rapoartele R/X sau X/R.

Se poate calcula cu ecuația aproximativă:

$$\chi \approx 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3R/X} \quad (9b)$$

b) $i_{\text{șoc}}$ este suma curenților de șoc ai diferitelor surse:

$$i_{\text{șoc}} = i_{\text{șoc T1}} + i_{\text{șoc T2}} \quad (10)$$

c) Deoarece factorul de șoc prezentat în fig.5 este pentru o sursă care alimentează scurtcircuitul printr-un circuit serie R și X, în rețelele buclate se alege una din aproximările următoare:

Raportul R/X constant în rețea : $\chi = \chi_a$

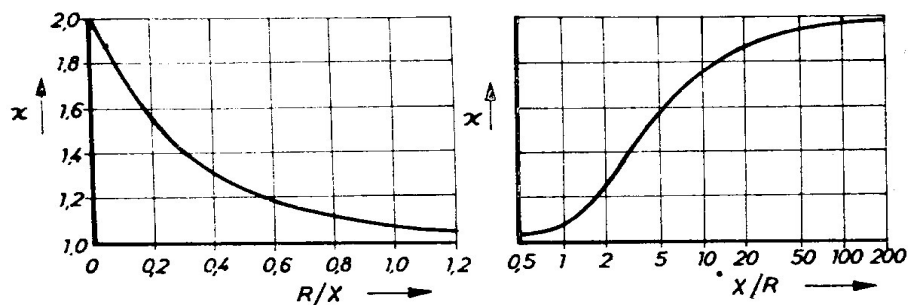


Fig. 5. Factor de șoc χ pentru circuite serie ca o funcție de :
a - raportul R/X; b - raportul X/R.

Se utilizează $\chi = \chi_a$ care se determină din fig.5 luând cel mai mic raport R/X respectiv cel mai mare raport X/R al tuturor ramurilor rețelei.

În acest caz, este necesar să se examineze ramurile prin care circulă aporturile la curentul de scurtcircuit care împreună transportă cel puțin 80 % din curentul de scurtcircuit total și care aparțin acelei părți a sistemului care are tensiunea nominală egală cu cea a punctului de scurtcircuit. Este posibil ca două sau mai multe echipamente să fie compuse într-o ramură.

Raportul R/X sau X/R în punctul de defect determinat pentru ansamblul

rețelei: $\chi = \chi_b$

Curentul de scurtcircuit de șoc se calculează cu:

$$i_{\text{șoc}} = 1,15 \chi_b \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' \quad (11)$$

unde 1,15 este un coeficient de siguranță pentru a acoperi inexactitățile datorate utilizării unui raport de transformare obținut prin reducerea unei rețele buclate.

Factorul χ_b se obține din figura 5 cu raportul R/X dat de impedanța $Z_k = R_k + jX_k$ în punctul K, calculate la $f=50\text{Hz}$. În rețelele de înaltă tensiune $1,15 \cdot \chi_b$ trebuie să fie mai mic decât 2,0.

Frecvența echivalentă f_c : $\chi = \chi_c$.

χ_c se determină pe fig.5 cu raportul:

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \cdot \frac{f_c}{f} \quad \text{sau} \quad (12)$$

$$\frac{X}{R} = \frac{X_c}{R_c} \cdot \frac{f}{f_c}$$

unde: $Z_c = R_c + j X_c$

$R_c = \text{Re}(Z_c) \neq R$ la frecvența rețelei, este rezistența efectivă echivalentă la frecvența echivalentă f_c . $X_c = \text{Im}(Z_c) \neq X$ la frecvența rețelei, este reactanța efectivă echivalentă la frecvența echivalentă f_c .

Impedanța echivalentă $Z_c = R_c + j2\pi f_c \cdot L_c$

Z_c este impedanța în punctul de scurtcircuit dacă o sursă echivalentă de tensiune cu frecvența $f_c = 20 \text{ Hz}$ (pentru frecvența nominală 50 Hz) este introdusă acolo ca singura sursă activă de tensiune [2,3].

(3). *Calculul curenților de scurtcircuit bifazat și monofazat.*

Calculul curenților de scurtcircuit aproape de generator.

Defectul poate fi alimentat (fig.7):

- dintr-o sursă unică;
- din mai multe surse, care alimentează radial scurtcircuitul;
- din mai multe surse care funcționează în paralel.

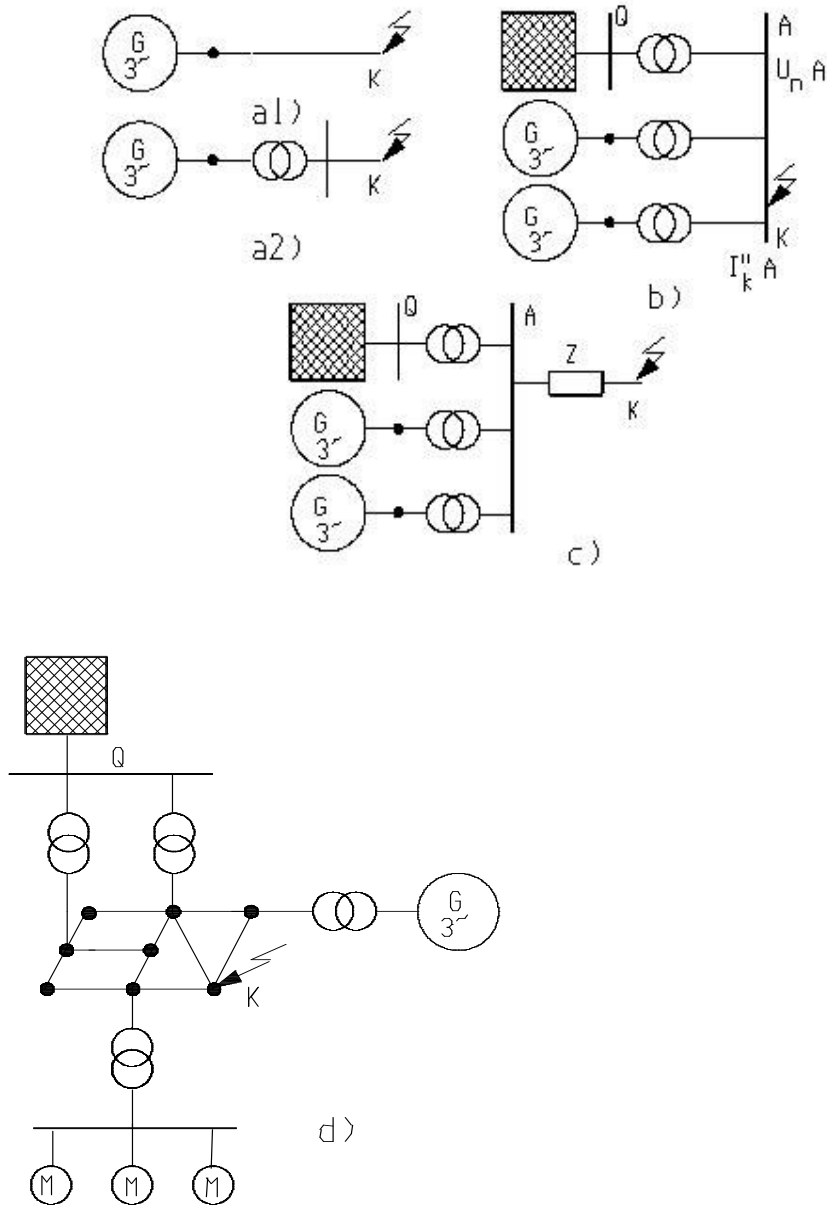


Fig.7 Scurtcircuit aproape de generator: a1 - alimentat de la o sursă directă; a2 - alimentat de la o sursă prin transformator; b - alimentat radial din mai multe surse; c - alimentat din mai multe surse care debitează pe o impedanță comună; d - alimentat din mai multe surse funcționând într-o rețea buclată.

Relațiile de calcul pentru impedanțele de scurtcircuit ale generatoarelor și motoarelor sunt indicate în tabelul 3.

(1). Metode de calcul și factori de corecție.

Pentru scurtcircuitul la bornele unei surse (generator sau bloc generator - transformator) este necesar un calcul de scurtcircuit exact conform recomandărilor CEI.

Calculul se face introducând sursa echivalentă de tensiune la locul de defect, după o prealabilă corectare a impedanțelor generatoarelor și ale blocurilor (generator - transformator) cu factorul de corecție corespunzător care ține seama de înlocuirea tensiunii supratranzitorie E'' a generatoarelor sincrone cu sursa echivalentă de tensiune. Se recomandă utilizarea factorului de corecție în cazurile în care, fără aplicarea acestuia, rezultă valori apropiate de limită (minimă sau maximă) ale curenților de scurtcircuit.

Impedanțele celorlalte elemente de rețea se determină conform tabelului 3.

• Introducerea acestor factori este necesară numai pentru calculul curentului de scurtcircuit la bornele sursei și este importantă în particular dacă reactanța supratranzitorie x_d'' a alternatorului este mare (de exemplu pentru un alternator cu $\cos \varphi_N = 0,9$ ($\sin \varphi_N \cong 0,42$) la încărcarea nominală $K_G < 1$ pentru $x_d'' \geq 24\%$) și/sau dacă raportul de transformare al transformatorului de bloc (cu sau fără comutator de tensiune) este diferit de raportul tensiunilor de serviciu a rețelelor de o parte și de alta a transformatorului.

Utilizarea acestor factori este importantă și în determinarea curenților minimi de scurtcircuit, când trebuie cunoscute condițiile limită precise ale diferitelor grupuri generatoare. Se atrage atenția asupra faptului că, chiar și la vârf de sarcină, un anumit număr de grupuri funcționează cu sarcină parțială sau în zona subexcitată, ceea ce în general se neglijează. Se poate deci obține o aproximare a curenților de scurtcircuit cu ajutorul factorilor K_G și K_{bloc} , chiar dacă aceștia se determină pentru un anumit regim de funcționare.

Factorii de corecție rămân aceeași pentru impedanțele celor trei succesiuni.

Pentru **generator** factorul de corecție al impedanței este:

$$K_G = \frac{U_{NQ}}{U_{NG}} \cdot \frac{c}{1 + \left(\frac{I_G}{I_{NG}}\right) \cdot x_d'' \cdot \sin \phi_G} \quad (22a)$$

care, pentru funcționarea generatorului la parametri nominali sau în apropierea acestora, devine:

$$K_G = \frac{U_{NQ}}{U_{NG}} \cdot \frac{c}{1 + x_d'' \cdot \sin \phi_{NG}} \quad (22b)$$

unde:

c este factorul de tensiune (tabelul 2);

U_{NQ} - tensiunea nominală a sistemului în nodul Q de conectare a generatorului;

U_{NG} - tensiunea nominală a generatorului;

I_G - curentul generatorului;

I_{GN} - curentul nominal al generatorului;

Z_G - impedanța generatorului ($Z_G = R_G + jX_d''$);

x_d - reactanța supratranzitorie raportată la impedanța sa

$$x_d = X_d''/Z_{NG}$$

ϕ_{NG} - faza unghiului dintre $\underline{U}_{NG}/\sqrt{3}$ și \underline{I}_{NG}

ϕ_G - faza unghiului dintre $\underline{U}_G/\sqrt{3}$ și \underline{I}_G

Rezultă că Z_{GK} - impedanța corectată a generatorului va fi:

$$\underline{Z}_{GK} = K_G \underline{Z}_G = K_G (R_G + jX_d'') \quad (23)$$

La stabilirea factorului de corecție a impedanței unui **bloc generator-transformator** se ține seama de faptul că un transformator de bloc are un raport de transformare (reglabil sau nu):

$k_T = U_{NTJT}/U_{NTJT} > U_{NQ}/U_{NG}$ (U_{NQ} - tensiunea nominală a rețelei în care este conectat la înaltă tensiune). În unele cazuri, pentru evacuarea puterii active și reactive a generatorului pe o linie lungă de transport, pot apare situații diferite.

Deși tensiunea fixată alternatorului poate fi diferită de cea de joasă tensiune a transformatorului ($U_{NG} \neq U_{NTJT}$) și puterea aparentă fixată a alternatorului poate diferi de cea a transformatorului ($S_{NG} \neq S_{NT}$) determinarea factorului k_{bloc} se poate face, practic, considerând $S_{NG} = S_{NT}$, $U_G = U_{NG}$ ($= U_{NTJT}$); $\cos \phi_G = \cos \phi_{NG}$. De asemenea, deși pentru $U_G = U_{NG} = \text{const.}$, curentul maxim de scurtcircuit se obține pentru $U_{Q\text{min}}$, se consideră $U_{Q\text{min}} = U_{NQ}$.

Cu aceste aproximări, pentru obținerea curentului maxim de scurtcircuit pentru bloc generator - transformator cu *comutator de prize sub sarcină* factorul de corecție este:

$$K_{\text{bloc}} = \left(\frac{U_{NQ}}{U_{NG}} \cdot \frac{1}{k_T} \right)^2 \cdot \frac{c_{\text{max}}}{1 + (x_d'' - x_T) \cdot \sin \phi_{NG}} \quad (24.a)$$

unde:

k_T este raportul de transformare corespunzător poziției uzuale a comutatorului

$$(k_T = U_{NTIT}/U_{NTIT});$$

x_T - reactanța relativă a transformatorului:

$$x_T = \frac{X_T}{U_{NT}^2/S_{NT}}$$

Dacă tensiunea generatorului este permanent diferită de U_{NG} , atunci se poate introduce în locul acesteia $U_G = U_N \cdot (1 + p_G)$, de exemplu $p_G = 0,05 \div 0,10$.

În cazul transformatoarelor *fără reglaj sub sarcină*:

$$K_{bloc} = \frac{U_{NQ}}{U_{NG} \cdot (1 + p_G)} \cdot \frac{U_{NTIT}}{U_{NTIT}} \cdot \frac{k_T}{k_N} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \cdot \sin \phi_{NG}} \quad (24.b)$$

unde:

k_T este raportul de transformare:

$$k_T = (1 \pm p_T) \cdot k_N$$

p_T - corespunde plotului fix pe care funcționează transformatorul; are valoarea zero pe plotul nominal și poate avea valori: $\pm 0,025$; $\pm 0,05$ ș.a. în funcție de caracteristicile transformatorului.

\underline{Z}_{B1} - impedanța corectată a blocului raportată la înaltă tensiune, care va fi:

$$\underline{Z}_{B1} = K_{bloc} \cdot (k_T^2 Z_G + Z_{TIT}) \quad (25)$$

Pentru rezistența generatoarelor sunt indicate valori în tabelul 3.

Aceste valori, utilizate pentru decrementul componentei de curent continuu, țin seama și de decrementul componentei de curent alternativ a curentului de scurtcircuit în timpul primei semiperioade după apariția scurtcircuitului. Nu este considerată influența variației temperaturii asupra rezistenței generatorului.

În realitate, rezistențele efective ale statorului mașinilor sincrone sunt, în general, mult sub valorile R_G menționate mai sus.