

REGIA AUTONOMĂ DE ELECTRICITATE - RENEL

PE 134-95

N O R M A T I V

PRIVIND METODOLOGIA DE CALCUL

AL CURENȚILOR DE SCURTCIRCUIT ÎN REȚELELE ELECTRICE

CU TENSIUNEA PESTE 1 kV

București - 1996

REGIA AUTONOMĂ DE ELECTRICITATE

RENEL

DECIZIA nr. 524

Președintele - director general al Regiei Autonome de Electricitate - RENEL;

Văzând avizul nr. 928/21.07.1995 al CTES-G.T.D.E.

În temeiul HGR nr. 1199/1990 și HGR nr. 846/1994 privind înființarea și funcționarea Regiei Autonome de Electricitate RENEL și al Ordinului nr. 3093/1995 al Ministerului Industriilor, emite următoarea:

DECIZIE:

1. Se aprobă prescripția energetică "NORMATIV PRIVIND METODOLOGIA DE CALCUL AL CURENȚILOR DE SCURTCIRCUIT ÎN REȚELELE ELECTRICE CU TENSIUNEA PESTE 1 kV" - PE 134.

2. Prescripția de la pct. 1 se aplică de la data de 1 octombrie 1995. Pe aceeași dată încetează aplicarea prescripției PE 134/84, aprobată cu Ordinul M.E.E. nr. O - 382/84.

3. ICEMENERG va multiplica prescripția PE 134/95 în numărul de exemplare rezultat din ancheta de tiraj și o va difuza factorilor interesați.

Data la 4.10.1995

PREȘEDINTE - DIRECTOR GENERAL,

Victor Romert

REGIA AUTONOMĂ DE ELECTRICITATE- RENEL	NORMATIV PRIVIND METODOLOGIA DE CALCUL AL CURENȚILOR DE SCURT-CIRCUIT ÎN REȚELELE ELECTRICE CU TENSIUNEA PESTE 1 kV	Indicativ: PE 134/95
		Înlocuiește: PE 134/84

CUPRINS

	Pag.
1. Considerații generale.....	7
2. Definiții și notații utilizate în calculul curenților de scurtcircuit.....	12
3. Metode și căi de determinare a solicitărilor de scurtcircuit.....	20
3.1. Ipoteze de calcul.....	20
3.2. Metode de calcul.....	21
3.3. Calculul curenților de scurtcircuit departe de generator.....	28
3.4. Calculul curenților de scurtcircuit aproape de generator.....	34
3.5. Influența motoarelor și a compensatoarelor sincrone.....	45
3.6. Curenți la dublă punere monofazată la pământ și curenți parțiali de scurtcircuit prin pământ.....	49
ANEXE	
Anexa 1. Noțiuni privind metoda componentelor simetice.....	63
Anexa 2. Sistemul unităților relative.....	72
Anexa 3. Relații de transfigurare a schemelor.....	76
Anexa 4. Parametrii generatoarelor.....	77
Anexa 5. Parametrii compensatoarelor.....	81
Anexa 6. Scheme echivalente de succesiune directă ale transformatoarelor și autotransformatoarelor.....	82
Anexa 7. Relații de calcul și scheme echivalente pentru reactanțele homopolare. Scheme echivalente homopolare ale transformatoarelor și autotransformatoarelor.....	83
Anexa 8. Conductoare de oțel-aluminiu neizolate.....	85
Anexa 9. Parametrii liniilor electrice aeriene de 20 - 400 kV.....	86

	Pag.
Anexa 10. Scheme homopolare pentru linii electrice aeriene.....	90
Anexa 11. Valori medii ale parametrilor caracteristici pentru elemente ce intervin în schema de succesiune directă.....	92
Anexa 12. Valori medii pentru parametrii caracteristici ai cablurilor de 6 - 220 kV.....	94
Anexa 13. Tabele de decrement ale multiplului curentului nominal ($k = I/I_N$).....	95
Anexa 14. Calculul curenților de scurtcircuit într-o rețea de înaltă tensiune (sursa departe de locul de scurtcircuit).....	103
Anexa 15. Calculul curenților de scurtcircuit într-o rețea de MT. Influența motoarelor asincrone.....	111
Anexa 16. Calculul curenților în cazul unui scurtcircuit aproape de generator.....	117
Bibliografie	

1. CONSIDERAȚII GENERALE

1.1. Prezentul normativ se aplică la calculul curenților de scurtcircuit în instalații electroenergetice de curent alternativ, cu tensiune peste 1 kV pentru defectele transversale simple (fig. 1).

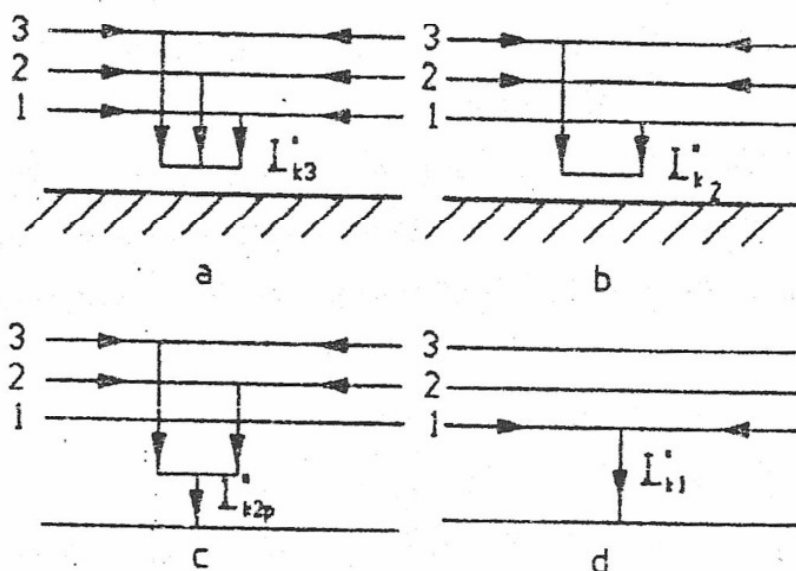


Fig. 1. Tipuri de curenți de scurtcircuit (sensul curenților este ales arbitrar):

- a - scurtcircuit trifazat simetric;
- b - scurtcircuit bifazat;
- c - scurtcircuit bifazat cu pământ;
- d - scurtcircuit monofazat.

1.2. Calculul curenților 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 curenților de scurtcircuit monofazat, ca defectul cel mai probabil.

1.3. 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).

1.4. Calculele 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 schimbare la scurtcircuit (în cazul instalațiilor, funcționarea în apropierea limitei admisibile) și pentru reglajul protecției.

1.5. Premizele pentru calculul curenților de scurtcircuit sunt în funcție de scopul studiului.

Astfel, 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 directă și inversă;

- 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 (pct. 3.4).

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 5Ω .

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

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

- * 50Ω 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 instalațiile existente, ca și pentru cele proiectate, pentru regimuri frecvent și mai puțin frecvent întâlnite.

1.6. 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 îndelungați, 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 a sistemului energetic considerat în calcul (generatoare și motoare, linii și transformatoare în funcțiune) trebuie, de asemenea, ales corelat cu scopul calculului.

Calcululele 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 (pct. 1.4.a).

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.

Impedanțele introduse în calculele de scurtcircuit pot fi determinate pe bază de măsurători efectuate în rețea sau pe baza parametrilor echipamentelor electrice, cu considerarea topologiei rețelei. Evident că această din urmă cale are avantajul aplicării atât pentru sistemele existente, cât și pentru cele în proiectare.

De remarcat că, în conformitate cu prevederile CEI, pentru determinarea valorii curenților minimi de scurtcircuit rezistențele liniilor (aeriane și cabluri) se introduc la o temperatură mai ridicată, valoarea rezistenței calculată la 20°C majorându-se cu 50 % ($R_L + 1,5 R_{20}$) pentru conductoarele de cupru, aluminiu și OL-Al.

Rezultă că studiul regimurilor de scurtcircuit este necesar pentru luarea deciziilor în legătură cu dezvoltarea și exploatarea instalațiilor energetice.

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 (pct. 3.3.3).

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 direct la borne) și K_{bloc} (pentru bloc generator - transformator) sunt utilizați pentru a se ține seama de regimul de funcționare a generatoarelor.

- *Factorul pentru determinarea curentului de vârf - X*

- *Factorii pentru determinarea variației componentei alternative a curentului de scurtcircuit, la un defect în apropierea generatorului (μ, λ, k_1)*

- *Factorii pentru stabilirea aportului motoarelor asincrone la curentul inițial de scurtcircuit (q)*

2. DEFINIȚII ȘI NOTAȚII UTILIZATE ÎN CALCULUL CURENȚILOR DE SCURTCIRCUIT

2.1. Defect - modificarea locală a unui circuit electric (de exemplu, ruperea unui conductor, slăbirea izolației).

2.2. Scurtcircuit - legătură 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.

În cadrul acestui normativ se va considera că scurtcircuiturile polifazate se realizează simultan pe toate fazele.

2.3. Curent de scurtcircuit - curentul care se închide 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).

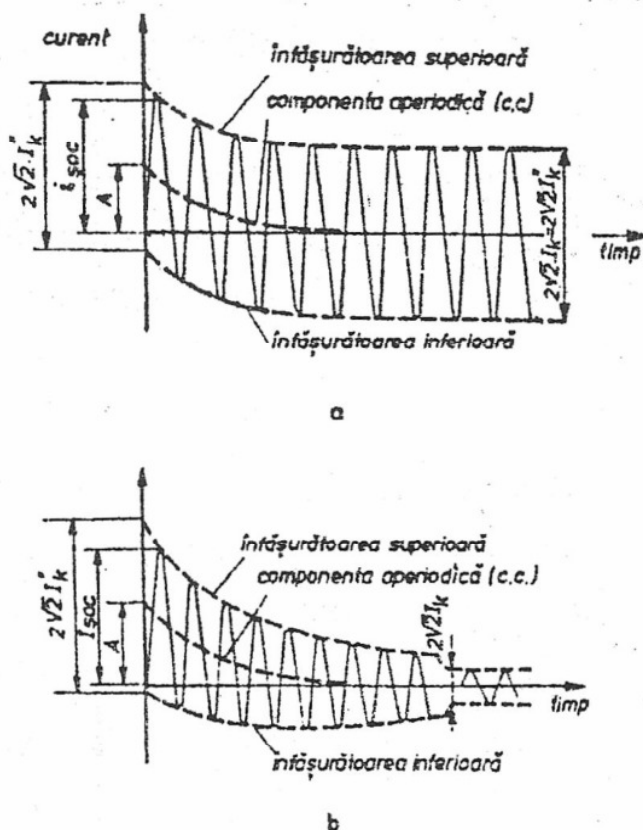


Fig. 2. Variația curentului de scurtcircuit:

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.

2.4. Curent aport la scurtcircuit - curentul care parcurge laturile rețelei în condițiile unui scurtcircuit într-un punct al acesteia.

2.5. Curent de scurtcircuit net (maxim posibil) - 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.

2.6. Curent de scurtcircuit simetric - 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.

2.7. Curent inițial de scurtcircuit, I_k'' - valoarea efectivă a componentei simetrice a c.a. de scurtcircuit în momentul producerii scurtcircuitului, dacă impedanța rămâne constantă.

2.8. Putere de scurtcircuit inițială, S_k'' :

$$S_k'' = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_k''$$

unde U_N este tensiunea nominală a rețelei.

2.9. Componenta aperiodică a curentului de scurtcircuit i_{cc} - valoarea medie între înfășurătoarea inferioară și cea superioară a curentului de scurtcircuit, descrescătoare de la valoarea inițială la zero (fig. 2).

2.10. Curent de scurtcircuit de șoc, $i_{\text{șoc}}$ - valoarea maximă 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 curenții maximi posibili.

2.11. Curent de trecere, I_p - valoarea maximă instantanee a curentului care parcurge o siguranță fuzibilă sau bobina de declanșare a unui aparat de deconectare rapidă în timpul funcționării acesteia.

2.12. Curent de rupere, I_r - 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.

2.13. Curent tranzitoriu de scurtcircuit, I'_k - valoarea efectivă a curentului de scurtcircuit, determinată considerând reactanțele rețelei și reactanțele tranzitorii longitudinale x'_d ale generatoarelor.

2.14. Curent permanent de scurtcircuit, I_k - valoarea efectivă a curentului de scurtcircuit care rămâne după trecerea fenomenelor tranzitorii (fig. 2). Această valoare depinde de caracteristicile rețelei și ale celor de reglaj ale generatoarelor.

2.15. 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.

2.16. Circuit electric echivalent - un model de descriere a funcționării unui circuit printr-o rețea de elemente ideale.

2.17. Sursă de tensiune - 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.

2.18. Tensiunea nominală a sistemului, U_N - tensiunea prin care se denumește 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.

2.19. Tensiune 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.

2.20. Tensiunea sursei echivalente de tensiune, $cU_N/\sqrt{3}$ - tensiunea ideală a sursei, care se aplică în punctul unde se produce scurtcircuitul, în rețeaua de secvență directă, ca singura tensiune activă a sistemului (modul de calcul al scurtcircuitului se prezintă în cap.3).

2.21. Factor de tensiune c - 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.

2.22. Tensiunea supratranzitorie E'' a mașinii sincrone - 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.

2.23. Tensiunea tranzitorie E' a mașinii sincrone - valoarea efectivă a tensiunii interne simetrice a unei mașini sincrone aplicată real în spatele reactanței tranzitorii X' în momentul producerii scurtcircuitului.

2.24. Scurtcircuit departe de generator - un scurtcircuit în timpul căruia valoarea componentei simetrice de c.a. rămâne practic constantă.

2.25. Scurtcircuit aproape de generator - 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.

2.26. Impedanțe de scurtcircuit la locul de defect, K:

- *Impedanța directă (Z_d)* a unui sistem trifazat c.a. - impedanța pe fază într-un sistem de succesiune directă văzută de la locul de defect K (anexa 1).

- *Impedanța inversă (Z_i)* a unui sistem trifazat de c.a. - impedanța pe fază într-un sistem de succesiune inversă văzută de la locul de defect K (anexa 1).

- *Impedanța homopolară (Z_N)* a unui sistem trifazat de c.a. - impedanța pe fază într-un sistem de succesiune homopolară văzută de la locul de defect K (anexa 1): se include și impedanța dintre neutru și pământ $3 \cdot Z_N$.

- *Impedanța de scurtcircuit* a unui sistem trifazat (Z_k) - forma prescurtată de exprimare pentru impedanța directă, în cazul calculelor curenților de scurtcircuit trifazați.

2.27. Impedanțele de scurtcircuit ale echipamentului electric:

- *Impedanța de scurtcircuit directă (Z_d)* 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 directă (anexa 1).

• **Impedanța de scurtcircuit inversă (Z_N)** 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 inversă (anexa 1).

• **Impedanța de scurtcircuit homopolară (Z_H)** a unui echipament electric - 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 pământul drept conductor de întoarcere (anexa 1).

2.28. Reactanța supratranzitorie longitudinală a mașinii sincrone, X_d'' - reactanța în momentul scurtcircuitului. Se definește ca raportul dintre valoarea inițială a unei variații bruște a amplitudinii fundamentale componentei 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.

Pentru calculul curenților de scurtcircuit este concludentă valoarea saturată a lui X_d'' .

Reactanța X_d'' se dă în procente din impedanța nominală a mașinii:

$$Z_{NG} = \frac{U_{NG}^2}{S_{NG}}$$

adică

$$X_d'' = \frac{X_d}{Z_{NG}}$$

2.29. Timp minim de deconectare, t_{min} - 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.

2.30. Simboluri, indici și exponenți

Simbolurile reprezintă mărimi având valori numerice și dimensiuni diferite într-un sistem coerent de unități de măsură (în acest normativ - Sistemul Internațional-SI).

Simboluri:

- I_N - curentul nominal al unui echipament electric (valoarea efectivă).
- I_k - curentul inițial de scurtcircuit simetric (valoarea efectivă).
- i_k - curentul tranzitoriu de scurtcircuit simetric.
- I_k - curentul permanent de scurtcircuit simetric.
- I_{k1} - curentul inițial de scurtcircuit monofazat.
- I_{k2} - curentul inițial de scurtcircuit bifazat.
- I_{k2p} - curentul inițial de scurtcircuit bifazat cu pământul.
- I_{kpp} - curentul de scurtcircuit inițial la dublă punere la pământ.
- I_{cc} - componenta aperiodică a curentului de scurtcircuit.
- I_{soc} - curentul de scurtcircuit de șoc.
- I_D - curentul de trecere.
- I_r - curentul de rupere (valoarea efectivă).
- I_p - curentul de pornire a motoarelor.
- I_{RS} - curentul motorului asincron cu rotorul în scurtcircuit.
- I_b - curentul de bază.
- U_N - tensiunea nominală dintre faze a unei rețele (valoarea eficace).
- U - tensiunea de exploatare.
- U_b - tensiunea de bază.
- $c U_N/\sqrt{3}$ - sursa echivalentă de tensiune.
- E'' - tensiunea supratranzitorie a mașinii sincrone.
- E' - tensiunea tranzitorie a mașinii sincrone.
- U_{KN} - tensiunea de scurtcircuit nominală, în procente.
- U_{rN} - căderea de tensiune rezistivă nominală, în procente.
- K_T - raportul de transformare nominal $K_T > 1$.
- R sau r - rezistențe.
- r_0 - rezistența lineică (pe unitatea de lungime).
- X sau x - reactanță.

x_o	- reactanță lineică (pe unitatea de lungime).
x_d, x'_d, x''_d	- reactanțele supratranzitorie, tranzitorie și sincronă longitudinale ale unui generator (valori absolute sau raportate la impedanța nominală a generatorului).
Z_d	- impedanța de scurtcircuit directă.
Z_i	- impedanța de scurtcircuit inversă.
Z_h	- impedanța de scurtcircuit homopolară.
Z_k	- impedanța de scurtcircuit trifazat.
S_N	- puterea aparentă nominală a unui echipament electric.
S''_k	- puterea de scurtcircuit inițială.
ΔP_{soc}	- pierderile totale în înfășurările unui transformator la curentul nominal.
$\cos \phi$	- factorul de putere.
P	- puterea activă a unui echipament.
f	- frecvență.
l	- lungimea unei linii.
η	- randamentul motorului asincron.
t_{min}	- timpul minim de deconectare.
ρ	- rezistivitatea.
s	- secțiunea nominală.
c	- factorul de tensiune.
χ	- factorul de șoc.
μ	- factorul pentru calculul curentului simetric de rupere al motoarelor sincrone.
λ	- factorul pentru calculul curentului maxim permanent de scurtcircuit.
q	- factorul pentru calculul curentului simetric de rupere al motoarelor sincrone.
K_G	- factorul de corecție al impedanței generatorului.
K_{bloc}	- factorul de corecție al impedanței unui generator-transformator.
ϵ	- factorul de reducere a curentului homopolar de scurgere prin pământ.
k_i	- coeficientul de decrement.

Indici:

- d - componenta directă.
- i - componenta inversă.
- h - componenta homopolară.
- N - valoarea nominală.
- K sau K_3 - scurtcircuit trifazat.
- K_2 - scurtcircuit bifazat.
- K_1 - scurtcircuit monofazat, fază-neutru sau fază-pământ.
- p - scurtcircuit cu pământ.
- K - defect, locul de scurtcircuit (defect).
- Q,S - punctul de legătură al unei alimentări (sursă).
- IT - înaltă tensiune.
- MT - medie tensiune.
- JT - joasă tensiune.
- L - linie.
- G - generator.
- M - motor.
- T - transformator.
- b - valoare de bază.

Exponenți:

- " - valoare inițială (supratranzitorie).
- ' - valoare tranzitorie.

3. METODE ȘI CĂI DE DETERMINARE A SOLICITĂRILOR DE SCURTCIRCUIT

Studiul regimurilor de scurtcircuit a făcut obiectul a numeroase lucrări apărute în România [1, 5, 6, 7, 8, 9] și pe plan internațional [2, 3, 4, 10, 11].

Prezentul normativ are la bază, în principal, ultimele recomandări CEI.

3.1. 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. 2.a), 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. 2.b), 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 componentei simetrice de c.a. și valoarea de vârf $I_{\text{șoc}}$ a curentului de scurtcircuit. În cazul II însă trebuie determinate valorile componentei 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 poate stabili [1] 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 [1, 2, 4].

i_{soc} depinde de constanta de timp de decrement a componentei 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_{soc} și i_{cc} . Metode speciale de calcul al lui i_{soc} , cu o precizie suficientă, sunt indicate la pct. 3.3.2.

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:

$$i_{\text{cc}} = \sqrt{2 \cdot i_k'' e^{-2\pi f t R/x}}, \quad (1)$$

unde:

- i_k'' este curentul inițial simetric de scurtcircuit;
- f - frecvența nominală (50 Hz);
- t - timpul;
- R/X - raportul impedanței, stabilit prin una din metodele indicate la pct. 3.3.2.

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 studiarea scurtcircuitelor cu o precizie suficientă.

3.2. Metode de calcul

Calculul curenților de scurtcircuit simetrici și nesimetrici se face utilizând metoda componentelor simetrice (anexa 1 și referințele bibliografice 5, 6, 7).

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

Fiecare dintre aceste componente are propria ei impedanță (anexa 1, fig. 3). 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 $Z_d = Z_i$. Impedanțele homopolare sunt, de regulă, diferite de cele directe și Z_n poate fi mai mic sau mai mare decât Z_d .

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 $[\Omega]$ sau în unități relative (anexa 2).

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.

Pomind 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.

3.2.1. 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, prin această metodă se neglijează toate capacitățile liniilor și toate admitanțele paralele ale celorlalte elemente pasive, cu excepția celor de secvență homopolară (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.

În cazul unor scurtcircuite aproape de generator există factori speciali de corecție pentru unitățile de transformatoare ale generatoarelor, atunci când generatoarele sunt conectate bloc cu transformatoarele.

În figura 3 este prezentat un exemplu de generator echivalent de tensiune la locul de scurtcircuit K, singura sursă activă de tensiune a sistemului în cazul unui sistem de joasă tensiune alimentat printr-un singur transformator.

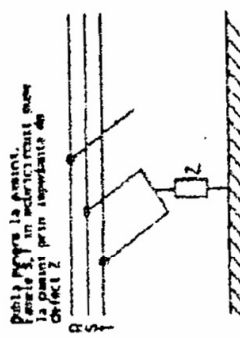
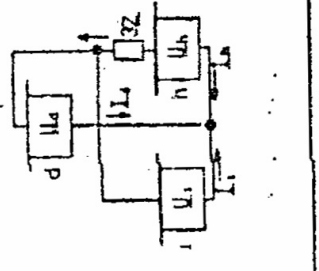


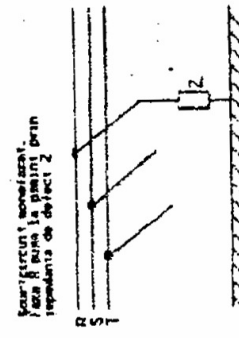
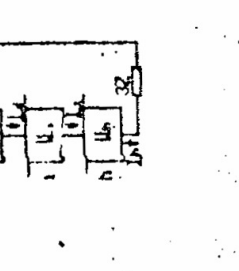
Toate celelalte tensiuni active din sistem sunt considerate zero. Astfel, alimentarea din sistem (în figura 3.a) este reprezentată numai prin impedanța internă Z_0 . Admitanțele paralele (ca, de exemplu, capacitățile liniilor cu tensiune sub 400 kV și sarcinile pasive) nu se iau în considerare; calculul curenților de scurtcircuit se efectuează în concordanță cu figura 3.b.

Tensiunea sursei echivalente $c \cdot U_N / \sqrt{3}$ (conform definiției), la locul de scurtcircuit K, cuprinde un factor de tensiune c , care este diferit pentru calculul curenților de scurtcircuit minim sau maxim. În afara cazului că există alte norme, este indicat să se adopte valori ale factorului c , conform tabelului 2, considerând că tensiunea cea mai înaltă în funcționare normală nu trebuie să depășească, în medie, cu mai mult de aproximativ $+ 5 \%$ (în j.t.), respectiv $+ 10 \%$ (în i.t.) tensiunea nominală.

Calculul curenților de scurtcircuit cu componente simetrice

Defectul	Relațiile între mărimi la locul de defect Mărimile pe fază	Componentele simetrice	Schema echivalentă Impedanța echivalentă introdusă în rețeaua de succesiune directă	Componentele simetrice	Mărimile de fază	Relațiile de calcul ale mărimilor la locul de defect Tensiunea între faze
<p>Porcircuitul în fază prin impedanța de defect Z_f</p>	$U_a = U_b = U_c$ $I_a = I_b = I_c = 0$		$U_a = I_a \cdot Z$ $U_b = U_c = 0$	$U_d = \frac{Z}{-Z} \cdot \frac{Z_a + Z}{Z + j\sqrt{3} \cdot Z}$ $U_z = \frac{Z}{-Z} \cdot \frac{Z_a + Z}{Z - j\sqrt{3} \cdot Z}$ $U_h = \frac{Z}{-Z} \cdot \frac{Z_a + Z}{2}$	$U_{ab} = -j\sqrt{3} \cdot \frac{Z_a + Z}{-j\sqrt{3} \cdot Z}$ $U_{bc} = \frac{Z_a + Z}{Z - j\sqrt{3} \cdot Z}$ $U_{ca} = \frac{Z_a + Z}{2}$	
<p>Porcircuitul în fază prin impedanța de defect Z_f</p>	$I_a + I_b + I_c = 0$ $I_a = I_b = 0$	$Z_0 = Z$	$I_a = \frac{E}{Z_a + Z}$ $I_b = \frac{-E}{-E} \cdot \frac{Z_a + Z}{1 + j\sqrt{3}}$ $I_c = \frac{2}{-E} \cdot \frac{Z_a + Z}{1 - j\sqrt{3}}$	$I_a = 0$ $I_b = -j\sqrt{3} \cdot \frac{E}{Z_a + Z}$ $I_c = j\sqrt{3} \cdot \frac{E}{Z_a + Z}$	$U_{ab} = -j\sqrt{3} \cdot \frac{Z_a + Z}{-j\sqrt{3} \cdot Z}$ $U_{bc} = \frac{Z_a + Z}{Z - j\sqrt{3} \cdot Z}$ $U_{ca} = \frac{Z_a + Z}{2}$	
<p>Porcircuitul în fază prin impedanța de defect Z_f</p>	$U_a - U_b = Z \cdot I_a$ $I_a = I_c$ $I_b = 0$	$Z_0 = Z_1 + Z$	$U_d = U_z = Z \cdot I_a$ $U_h = 0$	$I_a = 0$ $I_b = -I_c$	$U_{ab} = -j\sqrt{3} \cdot \frac{Z_a + Z_1 + Z}{-j\sqrt{3} \cdot Z}$ $U_{bc} = \frac{Z_a + Z_1 + Z}{Z - j\sqrt{3} \cdot Z}$ $U_{ca} = \frac{Z_a + Z_1 + Z}{2}$	

Tabelul 1 (continuare)

Defectul	Relațiile între mărimi la locul de defect	Schema echivalentă	Componentele simetrice	Mărimile de fază	Tensiunea între faze
<p>Pentru faza la pământ, faza h este conectată prin impedanță de defect Z</p> 	<p>Mărimile pe fază</p> $U_h = U_a = U_b = U_c = 0$ $I_a = I_b = I_c = -I_h$	<p>Impedanța echivalentă introdusă în rețeaua de succesiune directă</p> 	<p>Componentele simetrice</p> $I_a = I_b = I_c = -I_h = -\frac{3 \cdot Z_0 \cdot I_0}{Z_0 + 3 \cdot Z}$ $I_0 = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} = -\frac{I_h}{3}$	<p>Mărimile de fază</p> $U_a = U_b = U_c = \frac{E \cdot (Z_0 + 3 \cdot Z)}{Z_0 + Z_1 + (Z_0 + 3 \cdot Z)}$ $U_h = 0$	<p>Tensiunea între faze</p> $U_{ab} = E \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{Z_0 + 3 \cdot Z}{Z_0 + Z_1 + (Z_0 + 3 \cdot Z)}$ $U_{bc} = E \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{Z_0 + 3 \cdot Z}{Z_0 + Z_1 + (Z_0 + 3 \cdot Z)}$ $U_{ca} = E \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{Z_0 + 3 \cdot Z}{Z_0 + Z_1 + (Z_0 + 3 \cdot Z)}$
<p>Pentru faza la pământ, faza h este conectată prin impedanță de defect Z</p> 	<p>Mărimile pe fază</p> $U_h = 0$ $I_a = I_b = I_c = -I_h$	<p>Schema echivalentă</p> 	<p>Componentele simetrice</p> $I_a = I_b = I_c = -I_h = -\frac{3 \cdot Z_0 \cdot I_0}{Z_0 + 3 \cdot Z}$ $I_0 = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} = -\frac{I_h}{3}$	<p>Mărimile de fază</p> $U_a = U_b = U_c = \frac{E \cdot (Z_0 + 3 \cdot Z)}{Z_0 + Z_1 + (Z_0 + 3 \cdot Z)}$ $U_h = 0$	<p>Tensiunea între faze</p> $U_{ab} = E \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{Z_0 + 3 \cdot Z}{Z_0 + Z_1 + (Z_0 + 3 \cdot Z)}$ $U_{bc} = E \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{Z_0 + 3 \cdot Z}{Z_0 + Z_1 + (Z_0 + 3 \cdot Z)}$ $U_{ca} = E \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{Z_0 + 3 \cdot Z}{Z_0 + Z_1 + (Z_0 + 3 \cdot Z)}$
<p>Pentru faza la pământ, faza h este conectată prin impedanță de defect Z</p> 	<p>Mărimile pe fază</p> $U_h = 0$ $I_a = I_b = I_c = -I_h$	<p>Schema echivalentă</p> 	<p>Componentele simetrice</p> $I_a = I_b = I_c = -I_h = -\frac{3 \cdot Z_0 \cdot I_0}{Z_0 + 3 \cdot Z}$ $I_0 = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} = -\frac{I_h}{3}$	<p>Mărimile de fază</p> $U_a = U_b = U_c = \frac{E \cdot (Z_0 + 3 \cdot Z)}{Z_0 + Z_1 + (Z_0 + 3 \cdot Z)}$ $U_h = 0$	<p>Tensiunea între faze</p> $U_{ab} = E \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{Z_0 + 3 \cdot Z}{Z_0 + Z_1 + (Z_0 + 3 \cdot Z)}$ $U_{bc} = E \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{Z_0 + 3 \cdot Z}{Z_0 + Z_1 + (Z_0 + 3 \cdot Z)}$ $U_{ca} = E \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{Z_0 + 3 \cdot Z}{Z_0 + Z_1 + (Z_0 + 3 \cdot Z)}$

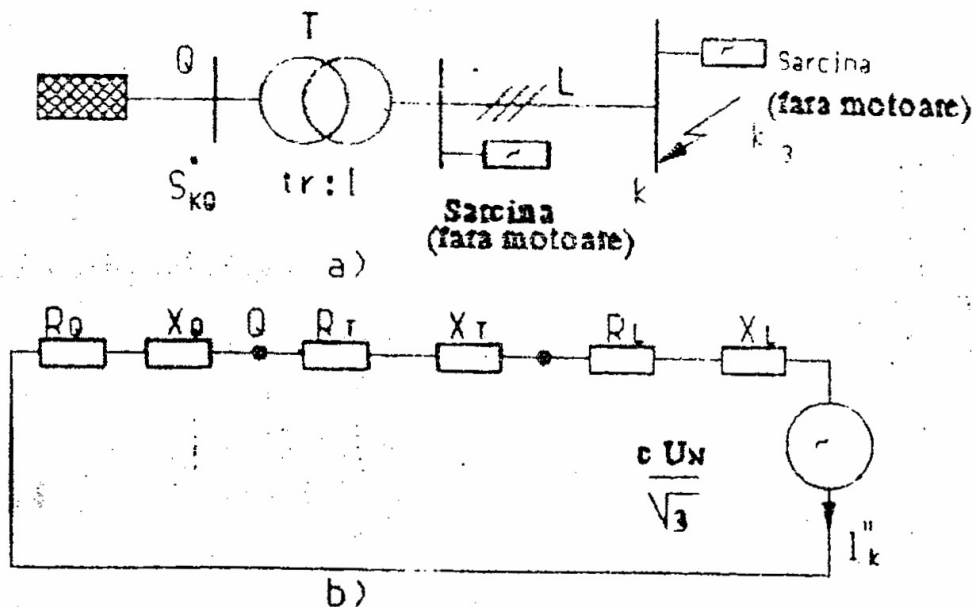


Fig. 3. Exemplu de schemă pentru calculul curentului simetric inițial de scurtcircuit I_k'' , în concordanță cu metoda generatorului echivalent de tensiune:

- a) schema sistemului;
- b) schema echivalentă (secvența directă).

Tabelul 2

Valorile factorului de tensiune c

Tensiunile 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 (înalță 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:

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

$$c \cdot U_N / \sqrt{3} = 1,0 \cdot U_N / \sqrt{3} \text{ - în sistemele cu tensiunea 400 kV și peste. (2.b)}$$

3.2.2. 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 directă, inversă și homopolară.

În tabelul 3 și anexele 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 și 12 se prezintă relațiile de determinare a impedanțelor diferitelor elemente ale rețelelor electrice.

Tabelul 3

Elementul	Relațiile în unități absolute [Ω]	Relațiile în unități relative ($U_b = U_N$) [u.r.]
1	2	3
Generator (compensator, motor sincron)	$R = \begin{cases} 0,05 \cdot X'' & \text{pentru } U_N > 1 \text{ kV}, S_N > 100 \text{ MVA} \\ 0,07 \cdot X'' & \text{pentru } U_N > 1 \text{ kV}, S_N < 100 \text{ MVA} \\ 0,15 \cdot X'' & \text{pentru } U_N < 1 \text{ kV} \end{cases}$	
	$X = [x(\%)/100] \cdot (U_N^2 / S_{NG}),$ <p>unde $x: x_d'', x_d', x_d$</p>	$X = [x(\%)/100] \cdot (S_b / S_{NG}),$ <p>unde $x: x_d'', x_d', x_d$</p>
Motor asincron	$R = 0$	
	$X = \frac{1}{I_{por} / I_N} \cdot \frac{U_N^2}{S_{NM}}$	$X = \frac{1}{I_{por} / I_N} \cdot \frac{S_b}{S_{NM}}$
Transformator cu două înfășurări	$R = \Delta P_{Cu} \cdot \frac{U_N^2}{S_N^2} \cdot 10^{-3}$	$R = \Delta P_{Cu} \cdot \frac{S_b}{S_N^2} \cdot 10^{-3}$
	ΔP_{Cu} - 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	$R = r_o \cdot l$ $X = x_o \cdot l$	$R = r_o \cdot l \cdot \frac{S_b}{U_N^2}$ $X = x_o \cdot l \cdot \frac{S_b}{U_N^2}$

Tabelul 3 (continuare)

1	2	3
Bobine de reactanță	$R = 0$	
	$X = \frac{u_k(\%) \cdot U}{100 \cdot \sqrt{3} I_N}$ <p>u_k - căderea de tensiune nominală (reactanța relativă)</p>	$X = \frac{u_k(\%) \cdot I_b \cdot U_N}{100 \cdot I_N \cdot U_b}$
Sarcină	$R = P \cdot \frac{U_N^2}{S^2}$ $X = Q \cdot \frac{U_N^2}{S^2}$	$R = P \cdot \frac{S_b}{S^2}$ $X = Q \cdot \frac{S_b}{S^2}$
Rețeaua de alimentare	$R_l = 0,1 + 0,15 X_k$ $X_k = \frac{U_N^2}{S_k}$	$X_k = \frac{c \cdot S_b}{S_k}$

3.3. Calculul curenților de scurtcircuit departe de generator

Defectul poate fi alimentat (fig. 4):

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

3.3.1. Curentul simetric inițial de scurtcircuit I_k'' :

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

a) unde (fig. 4.a): $c \cdot U_N / \sqrt{3}$ este 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:

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

Un exemplu de calcul se prezintă în anexa 14.

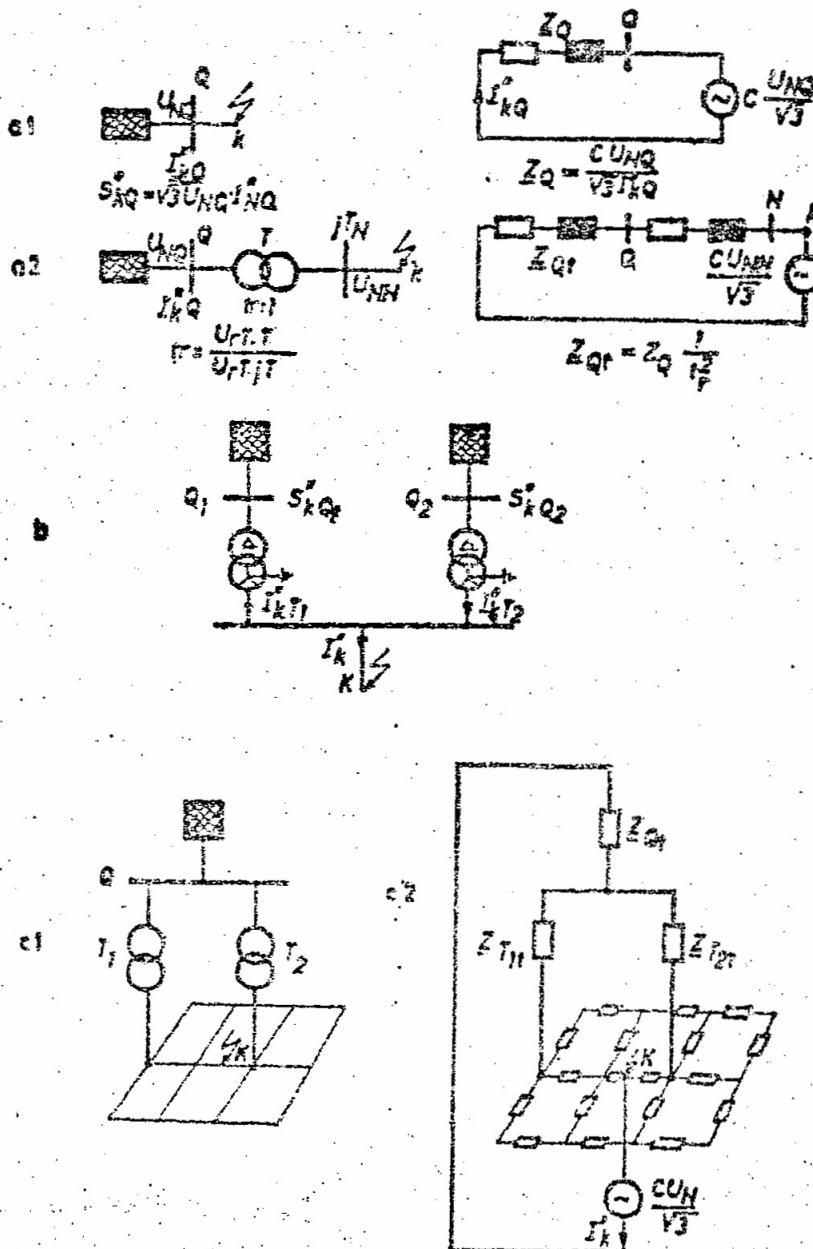


Fig. 4. Scurtcircuit departe de generator:

- 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_{Q1} , Z_{T11} , Z_{T21} - impedanțe raportate la joasă tensiune.

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

$$I_k'' = I_{kT1}'' + I_{kT2}'' \quad (5)$$

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 $0,03 U_N / I_k''$, 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 pct.c).

c) În concordanță cu exemplul din figura 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 directe 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: $U_N / \sqrt{3}$ este sursa echivalentă de tensiune (conform pct. 2.3.1);

Z_k - impedanța de scurtcircuit.

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

3.3.2. Curentul de scurtcircuit de șoc

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

$$I_{\text{șoc}} = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' \quad (9.a)$$

Factorul χ se ia din figura 5, în funcție de rapoartele R/X și X/R .

Se poate calcula cu ecuația aproximativă:

$$\chi \approx 1,02 + 0,93 \cdot e^{-3R/X} \quad (9.b)$$

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

$$i_{\text{șoc}} = i_{\text{șocT1}} + i_{\text{șocT2}} \quad (10)$$

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

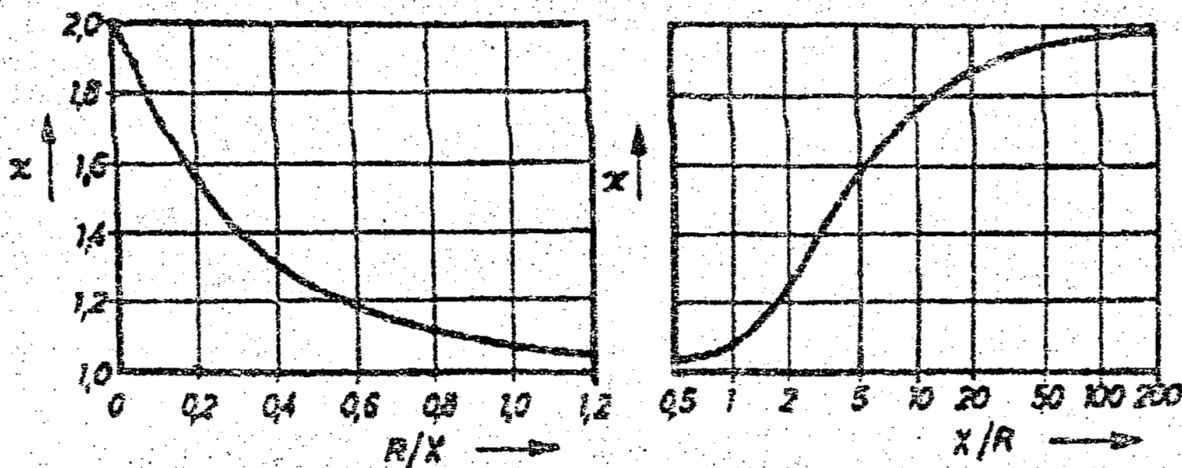


Fig. 5. Factorul de șoc X pentru circuitele serie ca o funcție de:

a - raportul R/X ; b - raportul X/R .

Raportul R/X constant în rețea: $X = X_a$.

Se utilizează $X = X_a$, care se determină din figura 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: $X = X_b$

Curentul de scurtcircuit de șoc se calculează cu:

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

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 $\underline{Z}_k = R_k + jX_k$ în punctul K, calculate la $f = 50$ 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 figura 5 cu raportul:

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

unde:

$$\underline{Z}_c = R_c + jX_c;$$

$R_c = \text{Re}(\underline{Z}_c) = R$ la frecvența rețelei, este rezistența efectivă echivalentă la frecvența echivalentă f_c ;

$X_c = \text{Im}(\underline{Z}_c) = X$ la frecvența rețelei, este reactanța efectivă echivalentă la frecvența echivalentă f_c .

$$\text{Impedanța echivalentă } \underline{Z}_c = R_c + j2\pi f_c \cdot L_c.$$

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

3.3.3. Calculul curenților de scurtcircuit bifazat și monofazat

În figura 1 și tabelul 1 sunt prezentate aceste tipuri de scurtcircuit și relațiile de calcul.

3.3.3.1. Scurtcircuit bifazat

Curentul inițial de scurtcircuit I_{k2}''

Independent de configurația sistemului, curentul inițial de scurtcircuit bifazat se calculează cu relația:

$$I_{k2}'' = c \cdot \frac{U_N}{|\underline{Z}_d + \underline{Z}_1|} = c \cdot \frac{U_N}{2 \cdot |\underline{Z}_d|} \quad (13)$$

$$\text{Raportul } I_{k2}'' / I_k'' = \sqrt{3} / 2. \quad (14)$$

În cazul unui scurtcircuit departe de sursă, curentul permanent de scurtcircuit și curentul de rupere sunt egali cu I_{k2}'' :

$$I_{k2}' = I_{r2} = I_{k2}'' \quad (15)$$

Curentul de scurtcircuit de șoc $i_{\text{șoc}2}$

Curentul de scurtcircuit de șoc poate fi exprimat prin:

$$i_{\text{șoc}2} = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot i_{k2}'' \quad (16)$$

Factorul χ se calculează conform pct. 3.3.2, în funcție de configurația sistemului.

Pentru simplificare se poate admite aceeași valoare ca în cazul scurtcircuitului trifazat.

3.3.3.2. Scurtcircuit bifazat cu punere la pământ

Curenții inițiali de scurtcircuit

Formulele de calcul, pentru ipoteza $Z_d = Z_f$, sunt:

$$i_{k2pL2}'' = \sqrt{3} \cdot c \cdot U_N \frac{\left| 1 + a^2 + \frac{Z_h}{Z_d} \right|}{\left| Z_d + 2 \cdot Z_h \right|} \quad (17)$$

$$i_{k2pL3}'' = \sqrt{3} \cdot c \cdot U_N \frac{\left| 1 + a + \frac{Z_h}{Z_d} \right|}{\left| Z_d + 2 \cdot Z_h \right|} \quad (18)$$

unde: L_2 și L_3 sunt fazele 2, respectiv 3.

Curentul inițial de scurtcircuit i_{k2p}'' , la pământ sau la conductoare legate la pământ, se calculează cu formula:

$$i_{k2p}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_N}{\left| Z_d + 2 \cdot Z_h \right|}$$

Curentul de scurtcircuit de șoc $i_{\text{șoc}2p}$

Nu este necesar să se calculeze $i_{\text{șoc}2p}$, deoarece sau $i_{\text{șoc}} \geq i_{\text{șoc}2p}$ sau $i_{\text{șoc}1} \geq i_{\text{șoc}2p}$.

3.3.3.3. Scurtcircuit monofazat

Curentul inițial de scurtcircuit i_{k1}'' (conform figurii 1 și tabelului 1) pentru ipoteza $Z_f = Z_d$:

$$i_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_N}{\left| 2 \cdot Z_d + Z_h \right|} \quad (19)$$

În caz de scurtcircuit depărtat de sursă, curenții de scurtcircuit sunt maximi pentru cazul impedanțelor Z_d , Z_i , Z_h în fază:

$$I_{k1} = I_{r1} = I''_{k1} \quad (20)$$

Curentul de scurtcircuit de șoc $i_{șoc1}$

$$i_{șoc1} = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k1} \quad (21)$$

χ se calculează conform pct. 3.3.2, în funcție de configurația sistemului. Pentru simplificare se admite să se ia aceeași valoare ca în cazul scurtcircuitului trifazat.

În figura 6 se prezintă domeniile în care diferenții curenți de scurtcircuit sunt maximi pentru cazul impedanțelor Z_d , Z_i , Z_h , în fază.

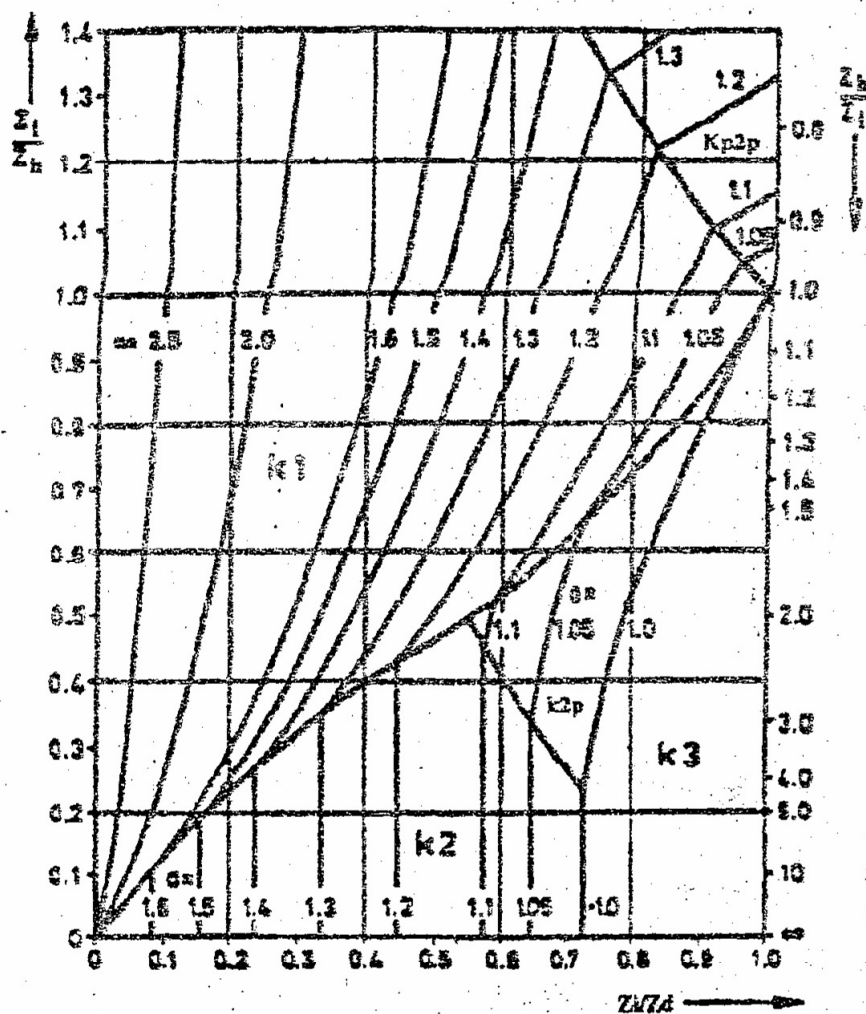


Fig. 6. Diagramă pentru determinarea tipului de scurtcircuit care conduce la valoarea maximă a curentului de scurtcircuit: $a = I_{k1} / I_{k3}$.

3.4. Calculul curenților de scurtcircuit aproape de generator

Defectul poate fi alimentat (fig.7).

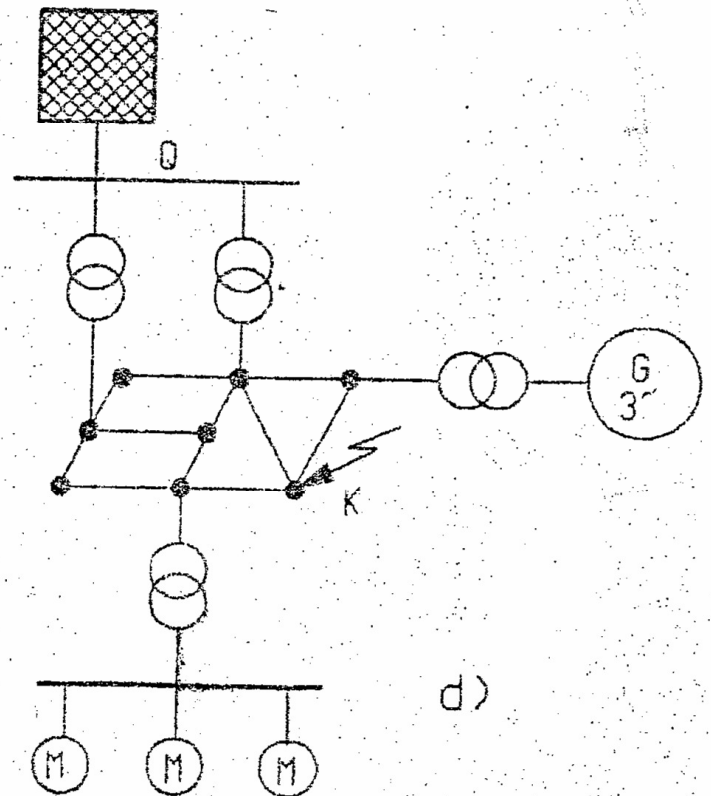
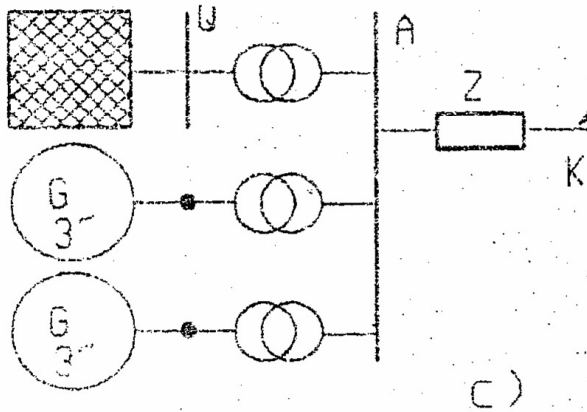
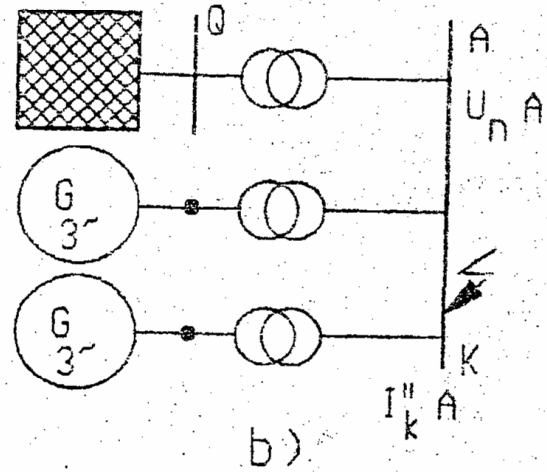
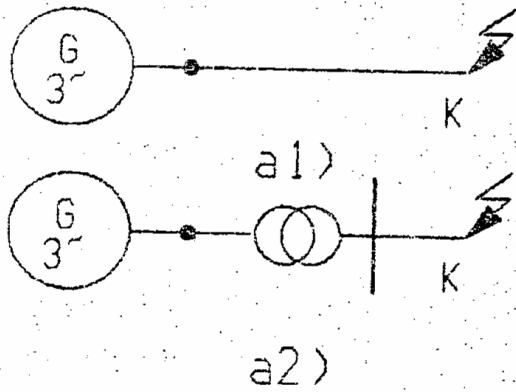


Fig.7 Scurtcircuitul aproape de generator: a1 - alimentat de la o sursă directă; a2 - alimentat de la o sursă prin transformator; b - alimentat radial din mai multe surse; c - alimentat din mai multe surse care debitează pe o impedanță comună; d - alimentat din mai multe surse funcționând în paralel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

Prevederile generale de la pct. 3.3, referitoare la scurtcircuiturile simetrice și nesimetrice, rămân valabile.

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

3.4.1. Metode de calcul și factori de corecție

Pentru scurtcircuiturile la bornele unei surse (generator sau bloc generator transformator) se recomandă 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.

- 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 $\cos \phi_N = 0,9$ ($\sin \phi_N = 0,42$) la încărcarea nominală $K_c < 1$ pentru $x_d'' \geq 24 \%$) și dacă raportul de transformare al transformatorului de bloc (cu sau fără comutator de tensiune) este diferit de raportul tensiunilor de serviciu ale 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.

Pentru generator factorul de corecție al impedanței este:

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

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

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

unde:

c este factorul de tensiune (tabelul 2);

U_N - tensiunea nominală a sistemului;

U_{NG} - tensiunea nominală a generatorului;

I_G - curentul generatorului;

I_{NG} - 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 $U_{NG} / \sqrt{3}$ și I_{NG} ;

ϕ_G - faza unghiului dintre $U_G / \sqrt{3}$ și I_G .

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

$$Z_{GK} = K_G \cdot Z_G = K_G (R_G + jX_d'') \quad (23)$$

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):

$k_T = U_{NTIT} / U_{NTJT} > U_{NQ} / U_{NG}$ (U_{NQ} este tensiunea nominală a rețelei în care este conectat pe înaltă tensiune). În unele cazuri, pentru evacuarea puterii active și reactive a generatorului pe linie lungă de transport pot apărea 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 $U_G = U_{NG} = \text{const.}$, iar curentul maxim de scurtcircuit se obține pentru U_{Qmin} , se consideră $U_{Qmin} = U_{NQ}$.

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

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

unde:

k_T este raportul de transformare corespunzător poziției uzuale a comutatorului
($k_T = U_{\text{NIT}}/U_{\text{NJT}}$);

x_T - reactanța relativă a transformatorului:

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

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, $p_G = 0,05 + 0,10$ (exemplul din anexa 16).

În cazul transformatoarelor fără reglaj sub sarcină:

$$K_{\text{bloc}(t)} = \frac{U_{\text{NG}}}{U_{\text{NG}} \cdot (1 + p_G)} \cdot \frac{U_{\text{NTJT}}}{U_{\text{NTIT}}} \cdot \frac{k_T}{k_N} \cdot \frac{c_{\text{max}}}{1 + x''_d \sin \phi_{\text{NG}}}, \quad (24.b)$$

unde:

k_T este raportul de transformare:

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

Z_{Bt} impedanța corectată a blocului raportată la înaltă tensiune, care va fi:

$$Z_{\text{Bt}} = K_{\text{bloc}} \cdot (k_T^2 Z_G + Z_{\text{TIT}}) \quad (25)$$

Pentru rezistența generatoarelor sunt indicate valorile din tabelul 3.

Aceste valori, utilizate pentru decrementul componentei de curent continuu, 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.

Pentru calculul curentului simetric inițial de scurtcircuit, I_k'' curentului simetric de rupere I_r și curentului permanent de scurtcircuit I_k la locul de scurtcircuit, sistemul poate fi redus prin transformări la o impedanță echivalentă Z_k . Această metodă nu este admisă pentru calculul curentului de șoc ($i_{\text{șoc}}$), deoarece în acest caz trebuie făcută distincția între sisteme, cu și fără ramuri în paralel.

3.4.2. Scurtcircuit alimentat de la un generator

3.4.2.1. Curentul de scurtcircuit simetric inițial I_k''

Curentul simetric inițial de scurtcircuit I_k'' (fig.8) este calculat cu sursa echivalentă de tensiune $c \cdot U_N / \sqrt{3}$ la locul de scurtcircuit și impedanța de scurtcircuit $Z_k = R_k + jX_k$:

$$I_k'' = \frac{cU_N}{\sqrt{3} Z_k} \quad (26)$$

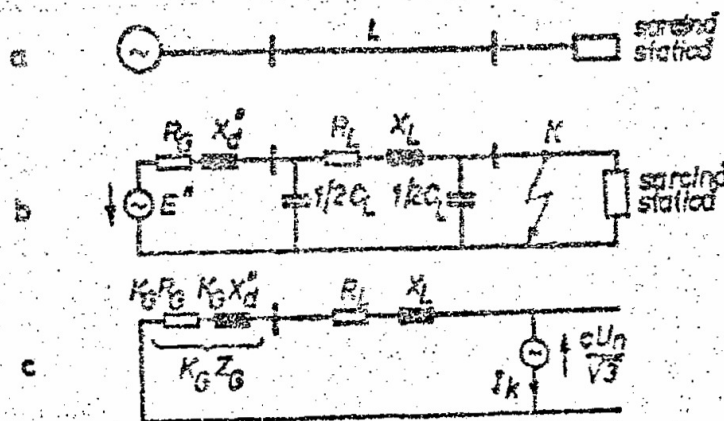


Fig.8. Exemplu de calcul al curentului simetric inițial de scurtcircuit I_k'' pentru un scurtcircuit alimentat direct de la un generator:

a - schema sistemului; b - schema echivalentă (secvența directă) cu tensiunea supratranzitorie a generatorului E'' ; c - schema echivalentă pentru calculul cu sursă echivalentă de tensiune și impedanța corectată.

Pentru calculul curentului maxim de scurtcircuit se ia valoarea sursei echivalente de tensiune, conform tabelului 2.

În mod normal se poate presupune că tensiunea nominală U_{NG} a generatorului este cu 5 % mai mare decât tensiunea nominală a sistemului U_N .

3.4.2.2. Curentul de scurtcircuit de șoc $I_{\text{șoc}}$ se determină ca la pct. 3.3.2.

Se iau pentru generator rezistențele și reactanțele corectate $K_G R_G$ și $K_G X_d''$

3.4.2.3. Curentul simetric de rupere I_r

Decrementul curentului simetric de scurtcircuit se poate determina fie ținând seama de un factor

$$I_r = \mu \cdot I_k'' \quad (27)$$

unde: μ este dependent de t_{min} de deconectare și de raportul I_k'' / I_{NG} , fie utilizând curbe de decrement pentru diferite tipuri de generatorare. Valorile lui μ în cazul turbogeneratoarelor cuplate la medie tensiune, a generatoarelor cu poli aparenti și compensatoarelor sincrone având excitație rotativă sau statică se pot aproxima cu următoarele relații:

$$\begin{aligned} \mu &= 0,84 + 0,26 e^{-0,26 I_k'' / I_{NG}} & t_{\text{min}} &= 0,02 \text{ s} \\ \mu &= 0,71 + 0,51 e^{-0,30 I_k'' / I_{NG}} & t_{\text{min}} &= 0,05 \text{ s} \\ \mu &= 0,62 + 0,72 e^{-0,32 I_k'' / I_{NG}} & t_{\text{min}} &= 0,10 \text{ s} \\ \mu &= 0,56 + 0,54 e^{-0,38 I_k'' / I_{NG}} & t_{\text{min}} &\geq 0,25 \text{ s} \end{aligned} \quad (28)$$

Dacă $I_k'' / I_{NG} \leq 2$, se ia $\mu = 1$ pentru orice t_{min} .

În toate celelalte cazuri, dacă nu se cunoaște valoarea lui μ , $\mu = 1$.

Factorul μ se poate obține, de asemenea, din figura 9.

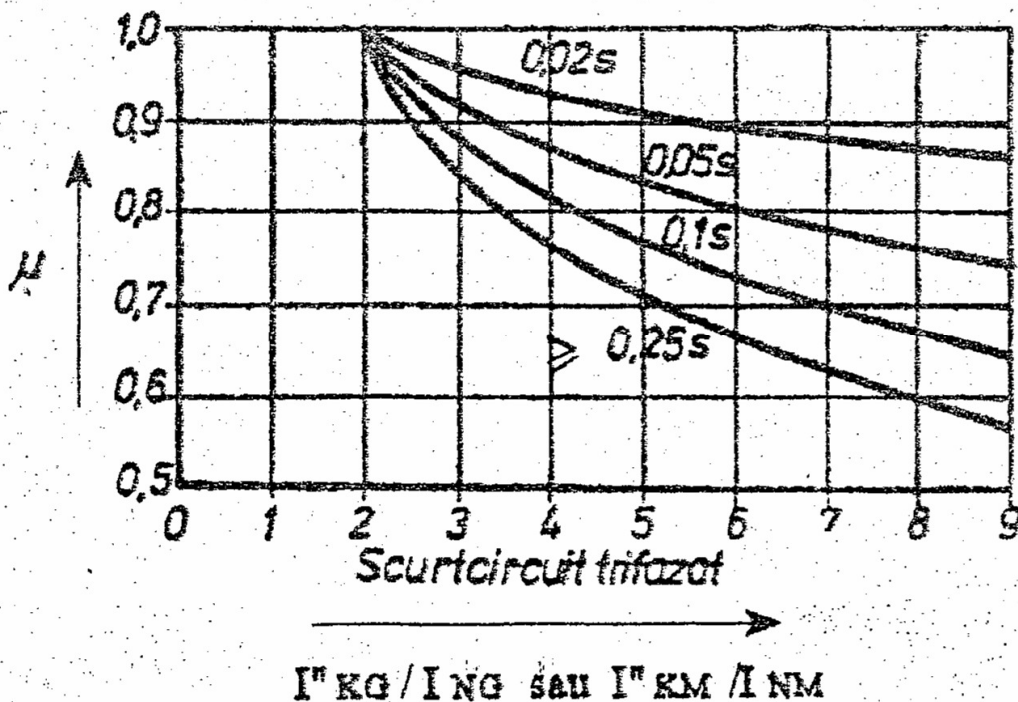
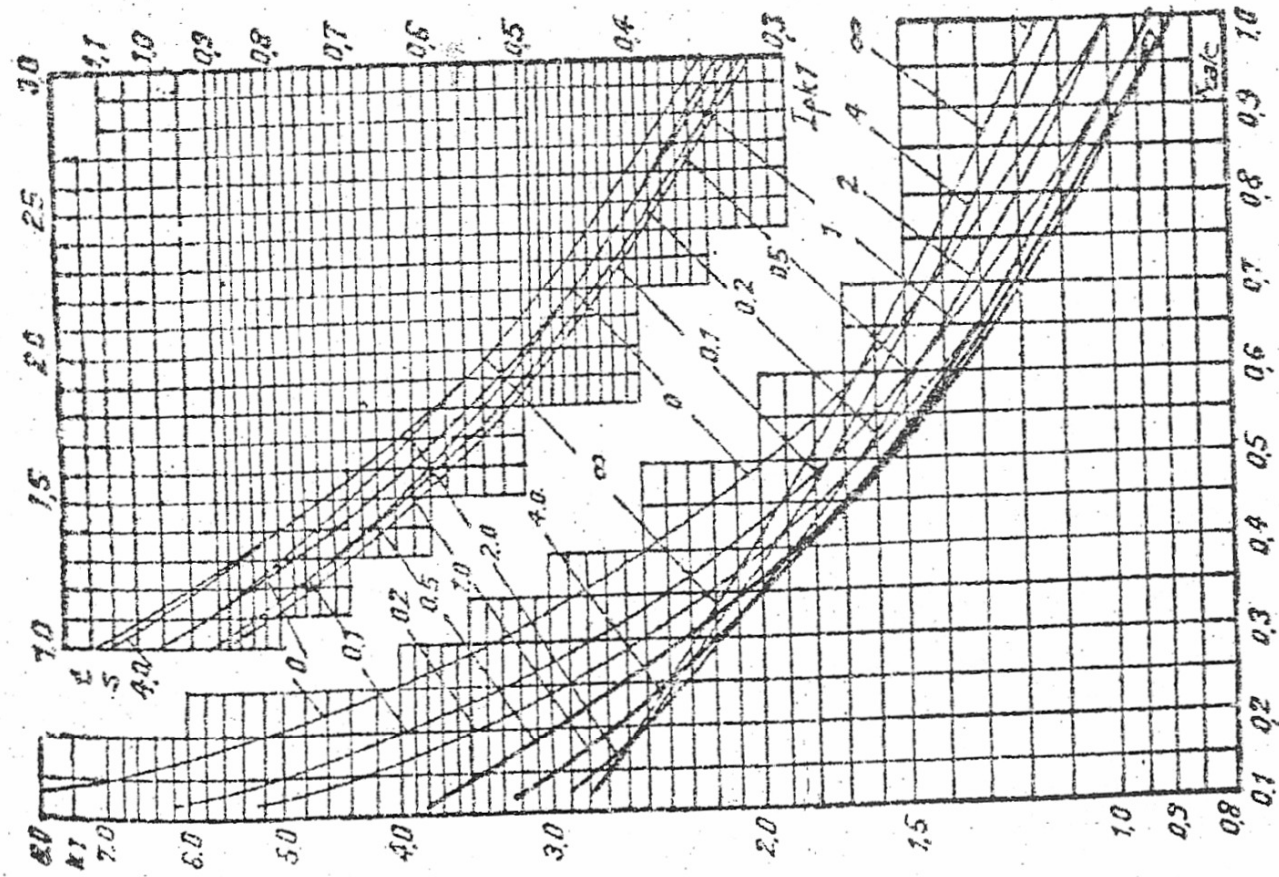
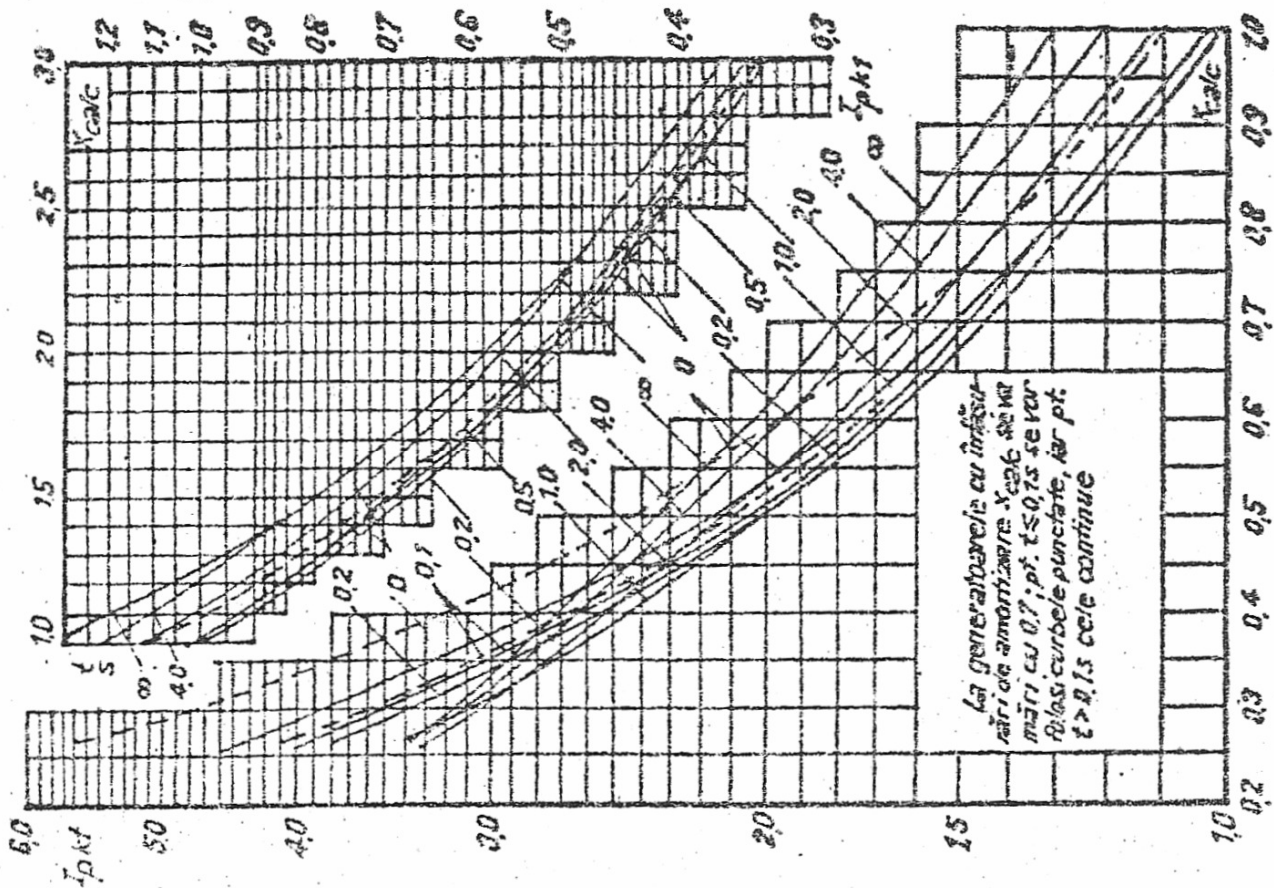


Fig. 9. Factorul μ pentru calculul curenților de scurtcircuit de rupere.



b

Fig. 10. Curbe de decrement:

a - turbogenerator cu reglaj automat de tensiune;

b - hidrogenerator cu reglaj automat de tensiune.

În figura 10 se indică valorile coeficienților k_t (pentru diferiți timpi t), cu care trebuie multiplicat curentul nominal al sursei de alimentare pentru a se obține curentul de scurtcircuit I_t . Curbele reprezintă dependența coeficienților k de o valoare x_{calcul} :

$$x_{\text{calcul}} = X_k \frac{\sum S_N}{U^2} \text{ - pentru } X_k, \text{ în } \Omega, \text{ respectiv:}$$

$$x_{\text{calcul}} = X_{Kx} \frac{\sum S_N}{S_b} \text{ - pentru } X_{Kx} \text{ în unități relative,}$$

în care $\sum S_N$ este puterea nominală totală a generatoarelor din rețea, în MVA;

S_b - puterea de bază, în MVA;

X_k, X_{Kx} - reactanța echivalentă de la locul de defect.

Rezultă: $I_k'' = k_0 I_N$

$$I_t = k_t I_N \tag{29}$$

$$I_N = \frac{\sum S_N}{\sqrt{3} U_N}$$

3.4.2.4. Curentul permanent de scurtcircuit I_k

Deoarece mărimea curentului permanent de scurtcircuit I_k depinde de influențele saturației și condițiilor de conectare, calculul acestuia este mai puțin precis decât calculul lui I_k'' .

Căile indicate de calcul trebuie privite ca o estimare suficientă pentru limitele superioară și inferioară, în cazul în care scurtcircuitul este alimentat de un generator sau o mașină sincronă.

Curentul maxim permanent de scurtcircuit $I_{k\text{max}}$

Se consideră că mașina sincronă este la excitația maximă pentru a se obține curentul maxim permanent;

$$I_{k\text{max}} = \lambda_{\text{max}} \cdot I_{NG} \tag{30.a}$$

λ_{max} poate fi obținut din figura 11 pentru turbogeneratoare sau din figura 12 pentru mașini cu poli aparenti;

x_{dsat} este inversul raportului de scurtcircuit.

Valoarea minimă a curentului permanent $I_{k\text{min}}$ corespunde lipsei de excitație:

$$I_{k\text{min}} = \lambda_{\text{min}} \cdot I_{NG} \tag{30.b}$$

În care λ_{min} se poate obține tot din figurile 11 și 12.

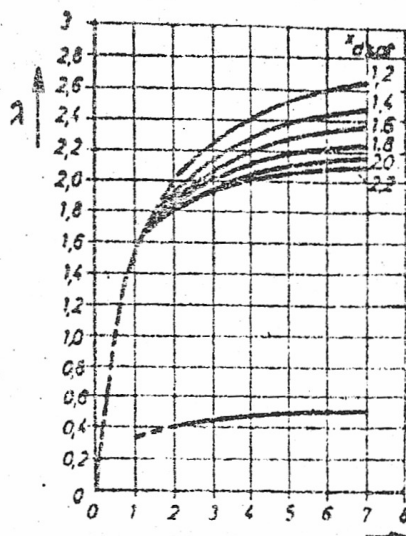
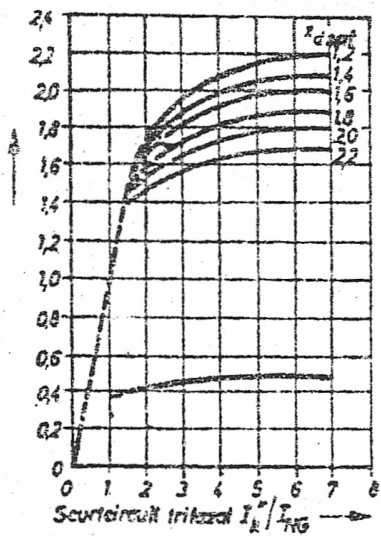


Fig. 11. Factorii λ_{\max} și λ_{\min} pentru turbogeneratoare:
 a - plafon de excitație 1.3;
 b - plafon de excitație 1.6.

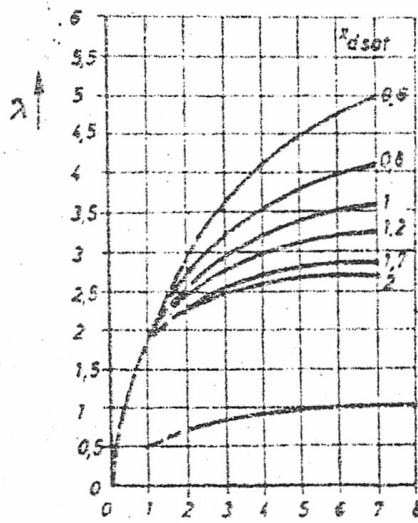
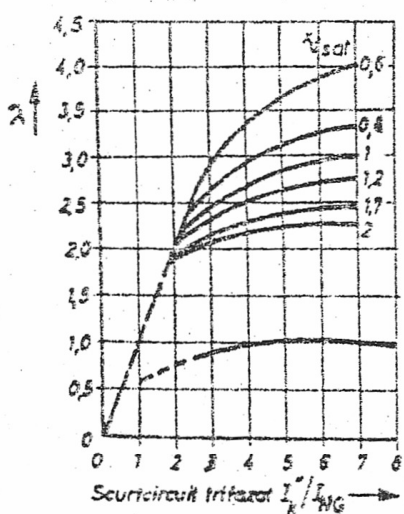


Fig. 12 Factorii λ_{\max} și λ_{\min} pentru generatoare cu poli aparanti:
 a - plafon de excitație 1.6;
 b - plafon de excitație 2

3.4.3. Scurtcircuit alimentat de la un bloc generator-transformator

Calculul se face în același mod ca în situația alimentării dintr-un generator, cu observația că impedanța de scurtcircuit (fig. 7.a2) se determină cu raportare la înaltă tensiune a impedanței Z_{KBL} .

Curentul de rupere se determină cu referire la curentul raportat la înaltă tensiune $I_{NGI} = I_{NG}/k_T$.

3.4.4. Scurtcircuit alimentat din mai multe surse nebuclate

Toate sursele nebuclate (fig. 7.b) alimentează scurtcircuitul direct sau (fig. 7.c) printr-o impedanță comună Z (dacă $Z < 0,05 U_{NA}/\sqrt{3} I''_{KA}$).

Toți curenții de scurtcircuit: simetric inițial I''_k , de șoc $i_{\text{șoc}}$, de rupere I_r , permanent I_k se calculează ca sumă a curenților parțiali debitați de generatoare și motoare.

3.4.5. Scurtcircuit alimentat din mai multe surse funcționând într-o rețea buclată

3.4.5.1. Calculul curentului simetric inițial I''_k și al celui de șoc $i_{\text{șoc}}$ se poate face după regula generală.

3.4.5.2. Curentul simetric de rupere I_r se poate aproxima conform CEI cu I''_k ($I_r = I''_k$), dar această valoare este mai mare decât cea reală.

Un calcul mai precis se poate obține prin următoarele ecuații:

$$I_r = I''_k - \sum_i \frac{\Delta U''_{Gi}}{c U_N / \sqrt{3}} (1 - \mu_i) \cdot I''_{kGi} - \sum_j \frac{\Delta U''_{Mj}}{c U_N / \sqrt{3}} (1 - \mu_{jq}) \cdot I''_{kMj} \quad (31)$$

$$\Delta U''_{Gi} = j X''_{di} I''_{kGi} \quad (31.a)$$

$$\Delta U''_{Mj} = j X''_{Mj} I''_{kMj} \quad (31.b)$$

unde:

- $c U_N / \sqrt{3}$ este sursa echivalentă de tensiune la punctul de scurtcircuit;
- I''_k, I_r - curentul inițial simetric de scurtcircuit, curentul simetric de rupere;
- $\Delta U''_{Gi}$ - diferența inițială de tensiune în punctele de conectare ale
- $\Delta U''_{Mj}$ mașinilor sincrone și/ sau motoarelor asincrone j .

Relațiile (31.a) și (31.b) se raportează la aceeași tensiune.

3.4.5.3. Curentul permanent de scurtcircuit I_k

Curentul maxim permanent se va obține cu relația:

$$I_{k\max} = \frac{\sum_{i=1}^m (\lambda_{\max i} U_{Ni} I_{Ni})}{U_N} + \frac{\sum_{j=1}^n (U_{Nj} I''_{kj})}{U_N}, \quad (32)$$

în care:

- $\lambda_{\max i}$ este factorul λ_{\max} pentru calculul aportului maxim de durată al mașinii sincrone (fig. 11, fig. 12);
- U_{Ni} - tensiunea nominală a rețelei alimentată de mașina sincronă i ;
- I_{Ni} - curentul nominal al mașinii sincrone i ;
- $i = 1, \dots, m$ - indicele mașinii sincrone (surse apropiate de locul de scurtcircuit);
- $j = 1, \dots, n$ - surse departe de locul de scurtcircuit;
- $I_{k\max}$ - se poate aproxima [13] ca fiind egal cu I''_k , fără aportul motoarelor. În acest sens este necesar un calcul complet nou.

3.5. Influența motoarelor și a compensatoarelor sincrone

3.5.1. Motoare și compensatoare sincrone

Calculul curentului simetric inițial de scurtcircuit I''_k , curentul de șoc $I_{\text{șoc}}$, curentul simetric de rupere I_r și curentul permanent I_k , pentru motoare și compensatoare sincrone, se tratează ca la generatoarele sincrone.

Ca excepții: nu se corectează X''_d pentru aplicarea generatorului echivalent.

Motoarele racordate la tensiune înaltă trebuie considerate în calculul curenților de scurtcircuit.

Motoarele de joasă tensiune se consideră la serviciile interne ale centralelor, în rețelele fabricilor chimice, oțelării ș.a.

Motoarele în sistemele publice de alimentare se neglijează.

Se neglijează motoarele sau grupele de motoare al căror aport este sub 5 % din I''_k , calculat fără aportul motoarelor.

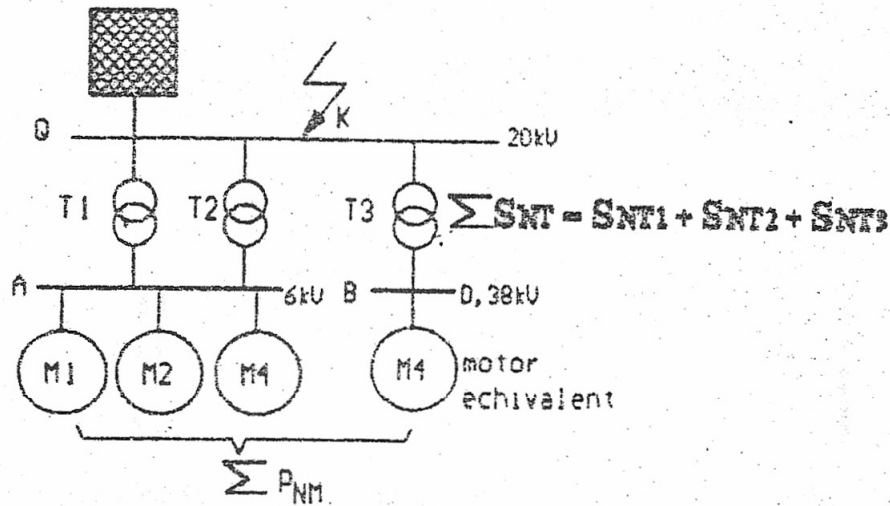


Fig. 13: Exemplu de estimare a aportului de scurtcircuit al motoarelor asincrone.

Motoarele de înaltă tensiune și joasă tensiune, care sunt conectate prin transformatoare cu două înfășurări la rețeaua în care se produce scurtcircuitul, pot fi neglijate în calculele de scurtcircuit pe un fider conectat într-un punct K (fig. 13), dacă:

$$\frac{\sum S_{MN}}{\sum S_{TN}} \leq \frac{\frac{p}{100} X_M}{\left| \frac{c \cdot 100 S_{TN}}{S''_k} - \frac{p}{100} U_{KT} \right|} \quad (33)$$

în care:

- p este aportul motoarelor, raportat la I''_k , calculat fără acesta (%);
- X_M - reactanța grupului de motoare, considerată aceeași pentru toate motoarele (%);
- U_{KT} - tensiunea de scurtcircuit a transformatoarelor de racordare a grupului de motoare la rețea, considerată aceeași pentru toate unitățile (%);
- $\sum S_{MN}$ - suma puterilor aparente nominale ale motoarelor (MVA);
- $\sum S_{TN}$ - suma puterilor nominale ale transformatoarelor (MVA);
- S''_k - puterea de scurtcircuit la bara de racord a transformatorului, fără aportul motoarelor (MVA).

Dacă se consideră pentru toate motoarele $\eta_N \cos \phi_N$ același, ținând seama de relația $P_{NM} = S_{NM} \eta_M \cos \phi_M$, relația (33) devine:

$$\frac{\sum P_{NM}}{\sum S_{NT}} \leq \frac{\frac{p}{100} \cdot x_M \cdot \eta_M \cdot \cos \phi_M}{\frac{c \cdot 100 \cdot \sum S_{TN}}{S''_K} - \frac{p}{100} \cdot u_{KT}} \quad (34)$$

Se menționează că, în conformitate cu prevederile CEI, relația de calcul este stabilită pentru $p = 5 \%$: $u_{KT} = 6 \%$, $x_M = 20 \%$ și $\eta_M \cos \phi_M = 0,8$:

$$\frac{\sum P_{NM}}{\sum S_{NT}} \leq \frac{0,8}{\frac{c \cdot 100 \sum S_{NT}}{S''_K} - 0,3} \quad (34.a)$$

Relațiile (33) și (34) se vor utiliza în cazul în care se doresc particularizări atât în ceea ce privește caracteristicile motoarelor și transformatorului, cât și valoarea aportului motoarelor ($p \%$). Uzual se poate folosi relația (34.a).

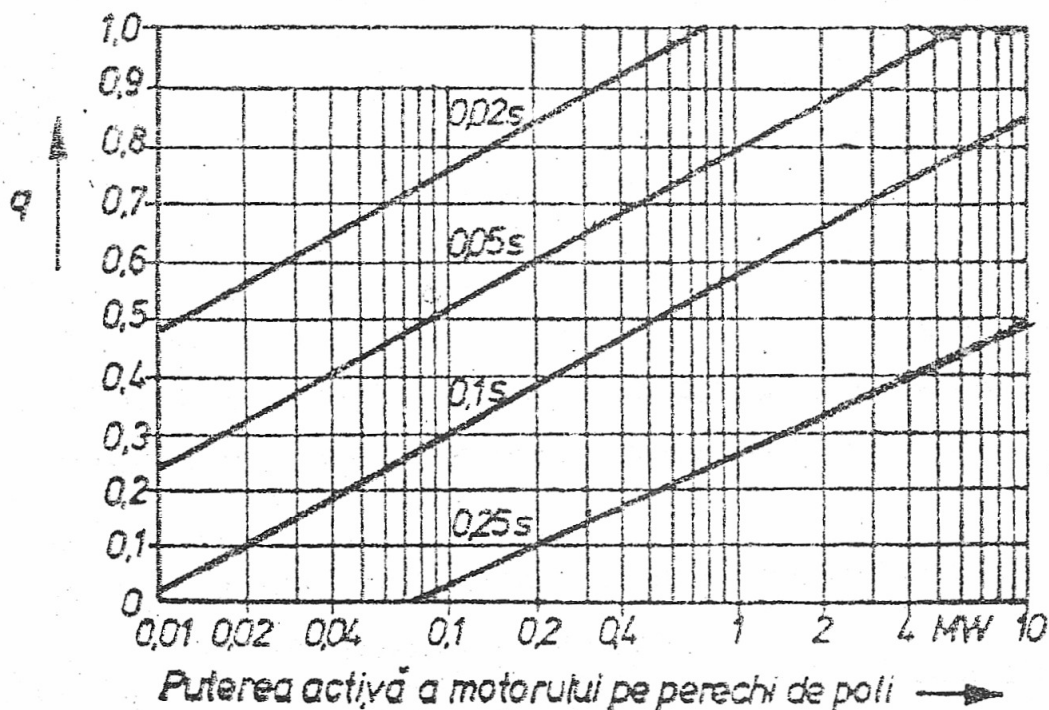


Fig. 14. Factorul q pentru calculul curentului simetric de rupere al motoarelor asincrone.

3.5.2. Factorul q pentru calculul curentului de scurtcircuit simetric de rupere pentru motoarele asincrone poate fi determinat în funcție de t_{min} (fig. 14) și:

$$q = 1,03 + 0,12 \ln m \quad t_{min} = 0,02 \text{ s}$$

$$q = 0,79 + 0,12 \ln m \quad t_{min} = 0,05 \text{ s}$$

$$q = 0,57 + 0,12 \ln m \quad t_{min} = 0,10 \text{ s}$$

$$q = 0,26 + 0,10 \ln m \quad t_{min} > 0,25 \text{ s}$$

(35)

m este puterea activă (în MW) pe perechea de poli.

Valorile mai mari decât 1 se înlocuiesc cu $q = 1$.

Motoarele de joasă tensiune sunt conectate la bare prin cabluri de diferite lungimi și secțiuni. Pentru simplificarea calculului se includ într-un motor echivalent.

Pentru aceste motoare asincrone, incluzând cablurile de alimentare, se utilizează:

I_{NM} este suma curenților nominali ai tuturor motoarelor într-o grupă de motoare (motor echivalent).

$$I_p / I_{NM} = 5$$

$$R_M / X_M = 0,42, \text{ respectiv } K_M = 1,3.$$

Pentru un scurtcircuit la bara B în figura 13, aportul la curentul de scurtcircuit al grupei de motoare M_4 poate fi neglijat dacă:

$$I_{NM4} < 0,01 \cdot I''_{KM4}$$

unde:

- I_{NM4} este curentul nominal al motorului;

- $I''_{KM4} - I''_k$ fără M_4 .

În cazul unui scurtcircuit la înaltă tensiune (adică scurtcircuit în Q sau A, fig. 13) este posibil, pentru simplificare, să se calculeze Z_M , conform tabelului 3, din curentul nominal al transformatorului T3 (I_{NT3JT}) din figura 13, în locul curentului nominal I_{NM} al motorului echivalent M_4 .

Tabelul 4

Calculul curenților de scurtcircuit al motoarelor asincrone în cazul unui scurtcircuit la borne

Scurtcircuit	Scurtcircuit simetric	Scurtcircuit bifazat
1	2	3
Curentul de scurtcircuit inițial (c.a.)	$I''_{K3M} = \frac{cU_N}{\sqrt{3} Z_M}$	$I''_{K2M} = \frac{\sqrt{3}}{2} I''_{K3M}$

Tabelul 4 (continuare)

1	2	3
Curentul de scurtcircuit de șoc	$I_{\text{șoc}3M} = K_M \sqrt{2} I_{k3M}''$ <p>Motoare de înaltă tensiune: $K_M = 1,65$ (coresp. $R_M/X_M = 0,15$); pentru motoare cu puterea pe perechea de poli < 1 MW; $K_M = 1,75$ (coresp. $R_M/X_M = 0,1$); pentru motoare cu puterea pe perechea de poli ≥ 1 MW; Grup de motoare de joasă tensiune, inclusiv cablurile de conectare $K_M = 1,3$ (coresp. $R_M/X_M = 0,42$).</p>	$I_{\text{șoc}2M} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{șoc}3M}$
Curentul de scurtcircuit simetric de rupere	$I_{r3M} = \mu q I_{k3M}''$ <p>μ conf. ec. (28) sau figurii (9) q conf. ec. (35) sau figurii (14)</p>	$I_{r2M} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{k3M}''$
Curentul de scurtcircuit permanent	$I_{k3M} = 0$	$I_{k2M} = \frac{1}{2} I_{k3M}''$

În tabelul 4 se prezintă sintetic relațiile de calcul pentru curenții de scurtcircuit trifazat și bifazat la bornele motoarelor.

3.6. Curenți la dublă punere monofazată la pământ și curenți parțiali de scurtcircuit prin pământ

Acest capitol este în concordanță cu norma internațională CEI/CE sau SC:TC 73.5.1/octombrie 1993. Sunt date prescripțiile referitoare la procedurile aplicabile la

calculul valorilor preliminate ale curenților de scurtcircuit nesimetric în rețelele trifazate de înaltă tensiune de curent alternativ funcționând la frecvența nominală de 50 Hz, și anume:

a) curenții la o dublă punere monofazată la pământ în rețele cu neutrul izolat sau legat la pământ printr-o bobină;

b) curenții de scurtcircuit parțiali prin pământ, în cazul unui defect monofazat la pământ în rețele cu neutrul pus direct la pământ sau printr-o impedanță mică.

Curenții determinați prin aceste proceduri vor fi utilizați la determinarea tensiunilor induse sau a tensiunilor de pas.

În vederea determinării curentului se va utiliza o sursă de tensiune echivalentă aplicată la locul de scurtcircuit, toate celelalte surse fiind anulate. Procedura este aplicabilă pentru o determinare prin metode manuale, simulări analogice sau prin calcul numeric.

Toate cele prezentate mai jos au la bază definițiile, simulările și ipotezele de calcul menționate anterior pentru calculul curenților de scurtcircuit.

3.5.1. Definiții suplimentare necesare

Dublă scurtcircuit monofazat la pământ:

Scurtcircuite monofazate la pământ produse simultan în locuri (puncte) distincte și pe faze distincte ale unei rețele trifazate de curent alternativ al cărei neutru este izolat sau legat la pământ printr-o impedanță mare sau printr-o bobină de stingere.

Curent inițial de dublă punere monofazată la pământ, I_{kpp} :

Valoarea efectivă a curentului de scurtcircuit inițial circulând cu aceeași amplitudine în cele două puncte, în momentul dublei puneri monofazate la pământ.

Curentul total prin pământ, I_{pv} , la locul (punctul) de scurtcircuit:

Valoarea efectivă a curentului total trecând prin priza de pământ a unei stații (centrală, post de transformare) sau prin priza de pământ a stâlpului unei linii aeriene sau prin mantalele, ecranele sau armăturile cablurilor.

Curentul de scurtcircuit parțial prin pământ $r \cdot 3 \cdot I_0$:

Amplitudinea fracțiunii din curentul total care se scurge prin pământ la o anumită distanță de locul de producere a scurtcircuitului și de priza de pământ a unei stații, unde repartiția curentului total între conductoarele puse la pământ și pământ este aproape constantă.

Amplitudinea sa depinde de un factor de reducere r .

Factorul de reducere al unei linii, r :

Factorul care determină fracțiunea (partea) din curentul homopolar care se scurge la pământ, la o anumită distanță de locul de producere a scurtcircuitului și de priza de pământ a unei stații.

Impedanța de intrare, Z_p :

În cazul unei linii electrice aeriene impedanța constituită din impedanța firului de gardă Z_w între doi stâlpi cu întoarcere prin pământ și din rezistența stâlpului R_T . Impedanța de intrare este definită pentru o direcție (fig. 15):

$$Z_p = \frac{Z_w}{2} + \sqrt{\left[\frac{Z_w}{2}\right]^2 + Z_w \cdot R_T} = \frac{Z_w}{2} \left[1 + \sqrt{1 + 4 \cdot \frac{R_T}{Z_w}} \right] \quad (36)$$

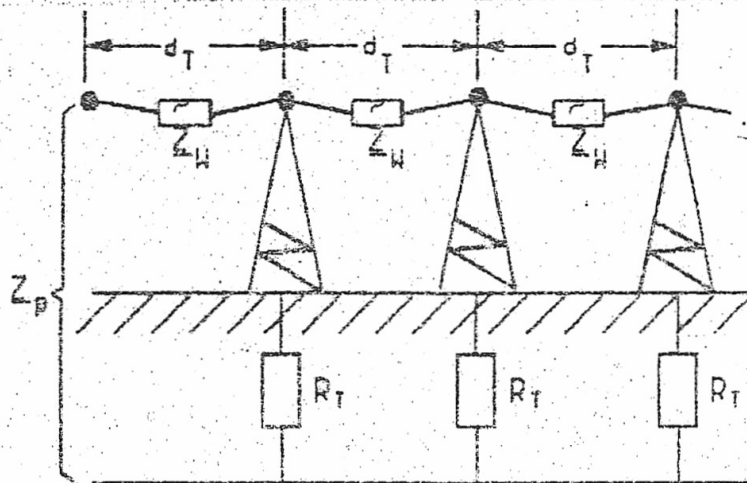


Fig. 15. Lanț infinit constituit de impedanța firului de gardă și rezistența la piciorul stâlpului R_T , pentru distanțe d_T egale.

Notă.

Impedanța de intrare Z_p poate fi considerată constantă la o distanță de locul de scurtcircuit (F) mai mare decât distanța D_F (ecuația 49).

În cazul unui cablu electric abordarea poate fi similară, dar sunt necesare unele precauții.

3.6.2. Curentul de dublă punere monofazată la pământ. Metoda de calcul

Curentul de scurtcircuit simetric inițial

În figura 16 sunt reprezentați curenții de scurtcircuit I_{kpp}'' în cazul unei duble puneri la pământ, pe faze diferite, în punctele A și B separate de o distanță diferită de zero.

În rețelele cu neutrul izolat sau legat la pământ printr-o bobină de stingere, curentul de scurtcircuit simetric inițial I''_{kpp} va fi:

$$I''_{kpp} = \frac{3 \cdot c \cdot U_N}{|Z_{dA} + Z_{iA} + Z_{dB} + Z_{iB} + \underline{M}_d + \underline{M}_i + Z_h|} \quad (37)$$

unde:

Z_{dA}, Z_{dB} sunt impedanțele de scurtcircuit directe ale rețelei trifazate de curent alternativ în locul de scurtcircuit A și B;

Z_{iA}, Z_{iB} - impedanțele de scurtcircuit inverse ale rețelei trifazate de curent alternativ în locul de scurtcircuit A și B;

$\underline{M}_d, \underline{M}_i$ - impedanțele mutuale, respectiv directă și inversă;

Z_h este impedanța homopolară de scurtcircuit a întregii rețele între punctele A și B (admitanțele între faze și pământ sunt neglijabile).

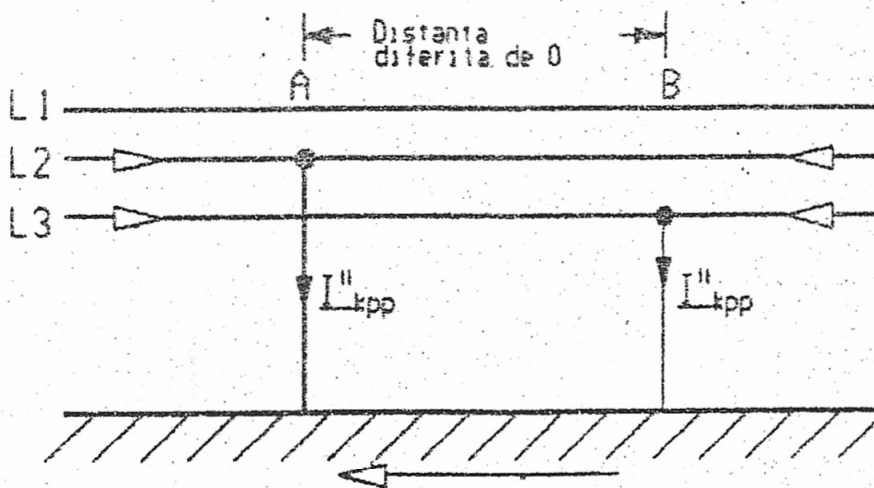


Fig. 16. Reprezentarea unei duble puneri monofazate la pământ și a curentului I''_{kpp} .

În cazul unui scurtcircuit departe de generator, pentru care $Z_d = Z_i$ și $M_d = M_i$, curentul inițial de scurtcircuit devine:

$$I''_{kpp} = \frac{3 \cdot c \cdot U_N}{|2Z_{dA} + 2Z_{dB} + 2\underline{M}_d + Z_h|} \quad (38)$$

Determinarea impedanțelor de cuplaj, directă și inversă, \underline{M}_d și \underline{M}_i se face după procedura următoare:

- o sursă de tensiune U_A este introdusă în punctul A, ca singura tensiune activă a rețelei. Dacă I_{dA} și I_{iA} sunt curenții produși de această sursă de tensiune în sistemele direct și invers, în punctul de scurtcircuit A, și dacă U_{dB} și U_{iB} sunt tensiunile rezultate în sistemele direct și invers în punctul B, atunci:

$$\underline{M}_d = \frac{U_{dB}}{I_{dA}}; \quad \underline{M}_i = \frac{U_{iB}}{I_{iA}} \quad (39)$$

Impedanțele mutuale \underline{M}_d și \underline{M}_i pot fi, de asemenea, determinate prin punctul de scurtcircuit B în loc de A cu ajutorul relațiilor:

$$\underline{M}_d = \frac{U_{dA}}{I_{dB}}; \quad \underline{M}_i = \frac{U_{iA}}{I_{iB}} \quad (40)$$

Exemple simple de dublă punere monofază la pământ

În tabelul 5 sunt date exemple pentru cazuri simple și cu condițiile $Z_d = Z_i$ și $\underline{M}_d = \underline{M}_i$. În această ipoteză, ecuațiile (tabelul 5) sunt deduse prin ecuația (37). Indicii din ecuații se referă la impedanțele respective din circuite.

Valoarea de vârf (de șoc) a curentului de scurtcircuit, a curentului simetric de întrerupere și a curentului de scurtcircuit permanent

Valoarea de vârf (curentul de șoc) se calculează conform celor arătate anterior (pct.3.3), cu ajutorul relației:

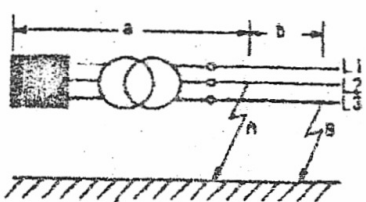
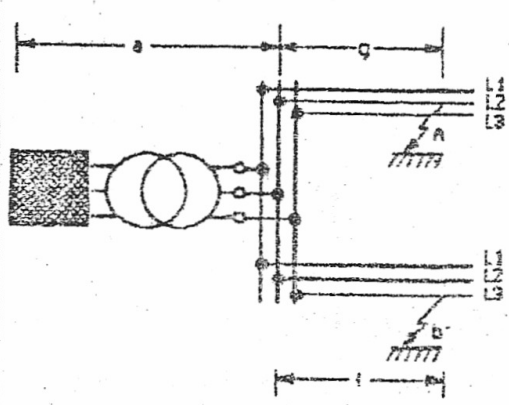
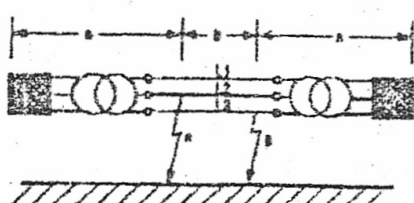
$$i_{\text{șoc}} = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{kpp} \quad (41)$$

Pentru factorul χ se va utiliza valoarea corespunzătoare unui scurtcircuit trifazat în A sau B, alegându-se valoarea cea mai mare.

Dacă dubla punere la pământ poate fi asimilată cu un scurtcircuit departe de generator,

$$I_{kpp} = I_{dpp} = I''_{kpp} \quad (42)$$

Calculul curentului monofazat inițial de dublă punere prin pământ într-un caz simplu ($Z_d = Z_n$)

<p>a)</p>		<p>Linie radială:</p> $I''_{kpp} = \frac{3 \cdot c \cdot U_n}{ 6 \cdot Z_{da} + 2 \cdot Z_{db} + Z_{nb} }$
<p>b)</p>		<p>Două linii radiale:</p> $I''_{kpp} = \frac{3 \cdot c \cdot U_n}{ 6 \cdot Z_{da} + 2 \cdot Z_{db} + 2 \cdot Z_{dr} + Z_{ng} + Z_{nr} }$
<p>c)</p>		<p>Linie cu alimentare de la ambele capete:</p> $I''_{kpp} = \frac{3 \cdot c \cdot U_n}{\left \frac{6 \cdot Z_{da} \cdot Z_{dn} + 2 \cdot Z_{da} \cdot Z_{db} + 2 \cdot Z_{dn} \cdot Z_{db}}{Z_{da} + Z_{db} + Z_{dn}} + Z_{nb} \right }$

Pentru Z_d trebuie luată în considerare observația făcută după relația 36. Factorul c este conform datelor din tabelul 2.

Repartiția curenților de dublă punere monofazată la pământ

Dacă se produce o dublă punere monofazată la pământ în punctele A și B, repartiția curentului prin pământ poate fi calculată admitând că $r \cdot 3 \cdot I_h = r \cdot I_{kpp}''$ este singura sursă activă de curent, alimentând sistemul homopolar în A și B; toate celelalte surse se neglijează.

De exemplu, în cazul unei duble puneri monofazate la pământ la stâlpii A și B ai unei linii aeriene, curentul prin pământ I_T al stâlpului (considerat în fig.17) devine:

$$I_T = r \cdot I_{kpp}'' \frac{Z_p}{Z_p + 2 \cdot R_T} \quad (43)$$

unde:

r - este factorul de reducere al liniilor aeriene (pct. 5.4.1.4);

R_T - rezistența la piciorul stâlpului;

Z_p - impedanța de intrare (relația 36).

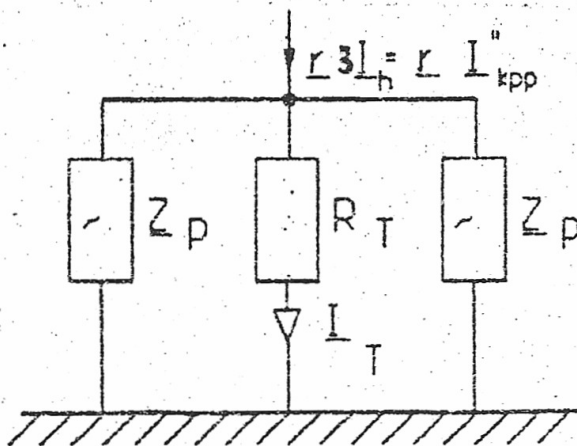


Fig.17. Repartiția curentului parțial de scurtcircuit prin pământ $r \cdot 3 \cdot I_h$ pe stâlpii A și B.

3.6.3. Curenții de scurtcircuit parțiali prin pământ în cazul unui scurtcircuit nesimetric

Metoda de calcul

Paragrafele următoare tratează curenții parțiali de scurtcircuit prin pământ și în conductoarele puse la pământ (de exemplu, prize de pământ, fire de gardă ale liniilor aeriene sau mantale conductoare, ecrane sau armături de cabluri), în cazul unui scurtcircuit monofazat la pământ. Acest tip de scurtcircuit este defectul care se produce cel mai frecvent în rețele cu neutrul direct legat la pământ. El conduce la curenți parțiali la pământ mai ridicați dacă Z_h este mai mare decât Z_d .

„Dacă Z_h este mai mic decât Z_d , în cazul unui scurtcircuit bifazat cu pământul, curentul I''_{kp2p} trebuie să fie luat în considerare.

Se presupune că stațiile A, B și C sunt separate de distanțe mai mari decât dublul lui D_F (conform relației 48).

Pentru calculul curentului maxim de scurtcircuit, impedanțele stâlpilor, cu sau fără fir de gardă, și impedanțele prizelor de pământ și ale altor conexiuni la pământ pot fi neglijate.

Procedura de calcul se va expune pentru o rețea simplificată din trei stații A, B, C și din linii aeriene simplu circuit și un singur fir de gardă.

3.6.3.1. Scurtcircuit monofazat la pământ într-o stație

În figura 18 se reprezintă o stație de transformare B cu sosiri din stațiile adiacente A și C.

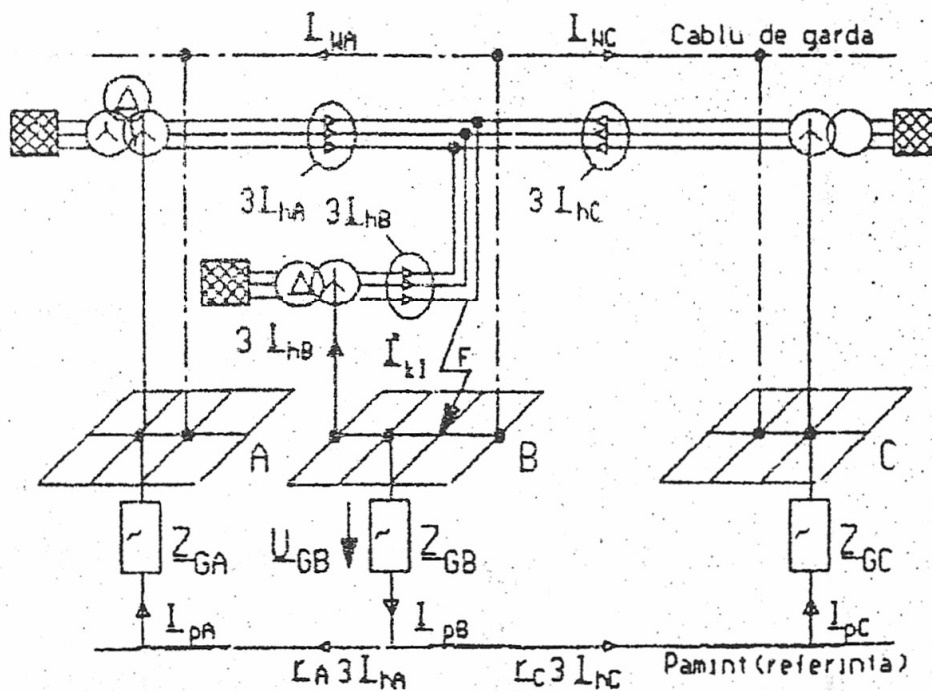


Fig 18. Curenți parțiali de scurtcircuit în cazul unui scurtcircuit monofazat la pământ în stația B.

Unul sau mai multe transformatoare ale stației B sunt cu neutrul direct legat la pământ. Curentul de scurtcircuit monofazat la pământ I''_{k1} este egal cu de trei ori curentul homopolar care circulă în punctul de scurtcircuit F:

$$I''_{k1} = 3 \cdot I_{hA} + 3 \cdot I_{hB} + 3 \cdot I_{hC} \quad (44)$$

Curentul total prin pământ în punctul F de scurtcircuit într-o stație departe de celelalte stații cu care este racordată este:

$$I_{pt} = \Sigma r \cdot 3 \cdot I_n \quad (45.a)$$

și conform figurii 18:

$$I_{pt} = r_A \cdot 3 \cdot I_{nA} + r_A \cdot 3 \cdot I_{nC} \quad (45.b)$$

Impedanța de punere la pământ a unei stații este:

$$Z_G = \frac{1}{\frac{1}{R_p} + \Sigma \frac{1}{Z_p} + \Sigma \frac{1}{Z_u}} \quad (46)$$

unde:

R_p este rezistența prizei de pământ;

Z_p - impedanța de intrare (conform relației 36);

Z_u - impedanța de intrare a mantalelor, ecranelor și armăturilor cablurilor.

Potențialul la pământ al stației B este:

$$U_{GB} = I_{pT} \cdot Z_{GB} \quad (47)$$

Ecuatiile (46 - 13.a) și (46 - 13.b) presupun că distanța dintre stația B și stațiile A și C este mai mare decât distanța D_F (depărtarea stâlpilor) cu:

$$D_F = 3\sqrt{R_p} \frac{d_T}{\text{Re}(\sqrt{Z_w})} \quad (48)$$

unde:

R_p este rezistența piciorului stâlpului;

d_T - distanța între stâlpi;

$\text{Re}(\sqrt{Z_w})$ - partea reală a rădăcinii pătrate a impedanței firului de gardă, conform figurii 15.

În alte condiții curentul total la pământ, I_{pT} , se reduce la o parte prea importantă din curentul de dublă punere monofazată la pământ, care curge spre stația cea mai apropiată A sau C prin firul de gardă. Repartiția curenților de scurtcircuit între firele de gardă și pământ, așa cum se arată în figura 18, este determinată de factorii de reducere a firelor de gardă r_A și r_C ale liniilor aeriene AB și BC. În cazul cablurilor factorul de reducere depinde de mantalele conductoare, armături și punerile lor la pământ. Curenții în firele de gardă din figura 18, departe de stațiile A, B și C, sunt dați de relațiile:

$$I_{WA} = (1 - r_A) \cdot 3 \cdot I_{hA} \quad (49.a)$$

$$I_{WC} = (1 - r_C) \cdot 3 \cdot I_{hC} \quad (49.b)$$

Se remarcă faptul că, în cazul liniilor duble sau al liniilor paralele cu sisteme homopolare cuplate, pot fi necesare precauții deosebite.

3.6.3.2. Scurtcircuit monofazat la pământ în afara stației

În figura 19 este reprezentat un scurtcircuit monofazat la un stâlp al unei linii aeriene.

Se presupune că scurtcircuitul este departe de stație.

Curentul de scurtcircuit monofazat la pământ I_{k1} este:

$$I_{k1} = 3 \cdot I_{hA} + 3 \cdot I_{hB} + 3 \cdot I_{hC} \quad (50)$$

Impedanța totală de pământ a stâlpului la care se produce scurtcircuitul, racordat la firul de gardă al liniei aeriene în locul de defect, este:

$$Z_{GT} = \frac{1}{\frac{1}{R_T} + \frac{2}{Z_p}} \quad (51)$$

unde: R_T este rezistența la piciorul stâlpului;

Z_p - impedanța de intrare a liniei (relația 36).

În cazul unui scurtcircuit la un stâlp T depărtat de stațiile A, B și C, curentul total la pământ este:

$$I_{pt} = I_C \cdot (3 \cdot I_{hA} + 3 \cdot I_{hB}) + I_C \cdot 3 \cdot I_{hC} = I_C \cdot I''_{kt} \quad (52)$$

Potențialul față de pământ, unde se produce scurtcircuitul este:

$$\underline{U}_{GT} = I_{pt} \cdot \underline{Z}_{GT} \quad (53)$$

Dacă curentul de scurtcircuit monofazat la pământ se produce la stâlpul unei linii care are un fir de gardă legat la pământ în vecinătatea unei stații, o mare parte a curentului de scurtcircuit monofazat la pământ poate reveni stației prin firul de gardă. Partea de curent care se scurge la pământ poate fi în acest caz inferioară celei calculate cu relația (52). Calculul necesită o atenție particulară dacă distanța dintre stația B și stâlpul unde se situează scurtcircuitul este redusă în raport cu distanța D_F .

Curentul prin pământ în stația B este obținut (fig. 19) cu relația:

$$I_{pB} = I_C \cdot (3 \cdot I_{hA} + 3 \cdot I_{hB}) - I_A \cdot 3 \cdot I_{hA} \quad (54)$$

Curentul prin pământ I_{pB} , rezultat dintr-un scurtcircuit monofazat la pământ produs pe o linie aeriană, poate fi superior celui rezultat dintr-un scurtcircuit în interiorul stației B.

3.6.4. Factorul de reducere al liniilor

Relațiile următoare se aplică liniilor aeriene cu fir de gardă. Ele sunt valabile și pentru cabluri cu mantale metalice, ecrane sau armături legate la pământ la ambele extremități. Factorul de reducere în cazul unui fir de gardă este dat de relația:

$$\underline{r} = \frac{I_{pt}}{3 \cdot I_{h1}} = 1 - \frac{\underline{Z}'_m}{\underline{Z}'_w} \quad (55)$$

unde: \underline{Z}'_m și \underline{Z}'_w depind de rezistivitatea solului ρ (tabelul 6), de distanța între conductoare și de raza echivalentă a conductorului r_e pentru unul sau mai multe conductoare.

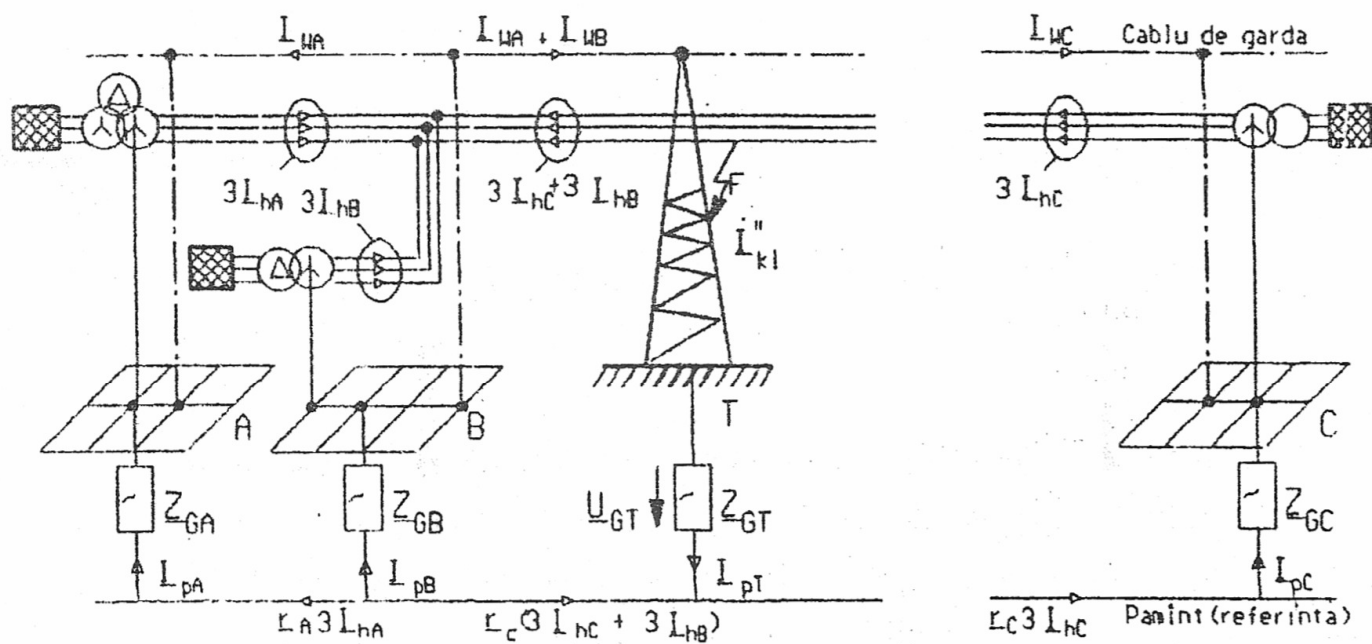


Fig. 19. Curenți parțiali de scurtcircuit în cazul unui scurtcircuit monofazat la pământ la un stâlp al unei LEA.

Tabelul 6

Rezistența ρ și adâncimea echivalentă de pătrundere în pământ δ pentru diferite tipuri de sol

Solul	Rezistivitatea ρ (Ωm)	Adâncimea echivalentă de pătrundere în pământ δ (m), $f = 50$ Hz
Granit	> 10000	> 9300
Stâncă	$3000 + 10000$	$5100 + 9300$
Sol pietros	$1000 + 3000$	$2940 + 5100$
Pietriș, nisip uscat	$200 + 1200$	$1820 + 3220$
Sol calcaros, nisip umed	$70 + 200$	$780 + 1320$
Pământ agricol	$50 + 100$	$660 + 930$
Argilă	$10 + 50$	$295 + 660$
Sol mlăștinos	< 20	< 415

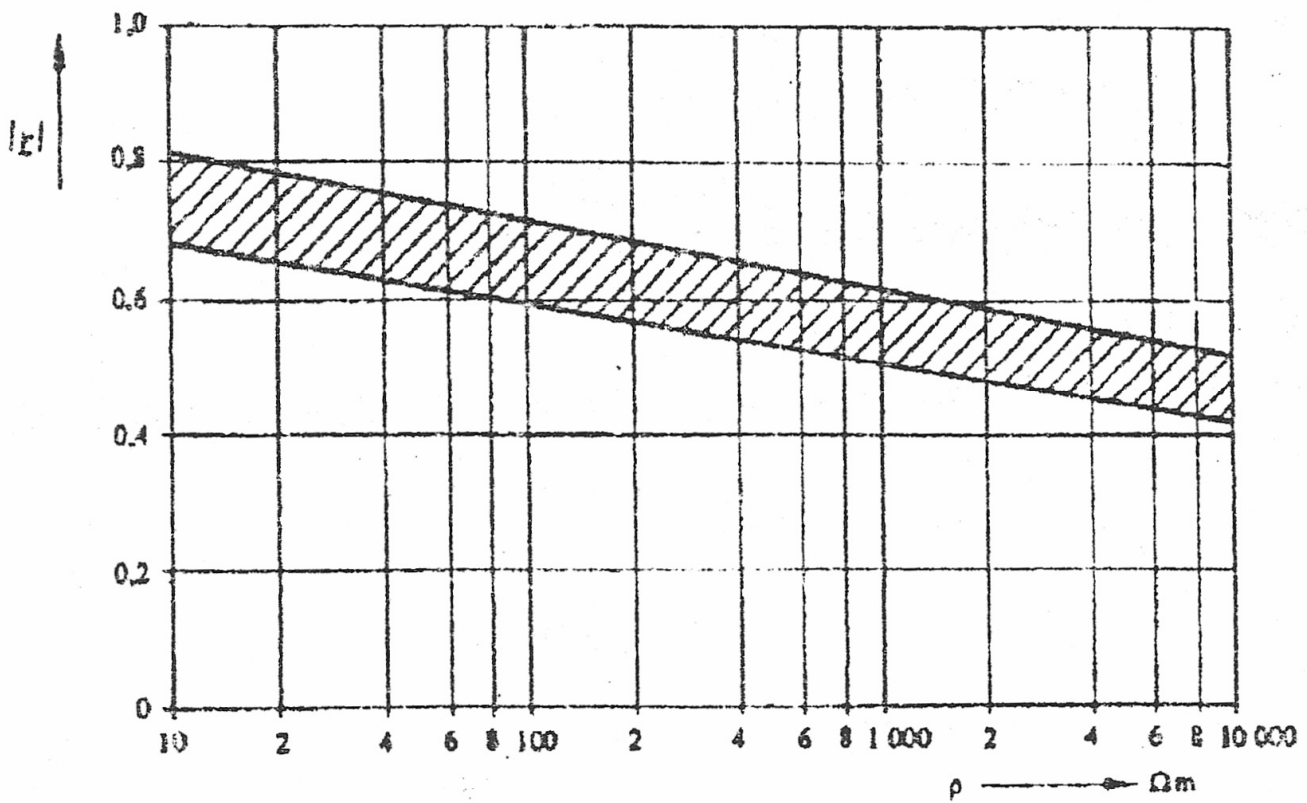


Fig. 20 Valoarea absolută $|r|$ a factorului de reducere pentru fire de gardă nemagnetice, în funcție de ρ .

Factorul de reducere poate fi evaluat pornind de la figura 20 și utilizând tabelul 6.

Pentru un calcul detaliat al factorului de reducere se pot utiliza relațiile următoare.

Impedanța lineică a firului de gardă este:

$$Z'_w = R'_w + \frac{\omega \cdot \mu_0}{8} + j\omega \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \left[11r / 4n + \ln \delta / r_e \right], \quad (56)$$

cu $\frac{\omega \cdot \mu_0}{8} = 0,05 \Omega / \text{km}$ la 50 Hz. Impedanța lineică mutuală între firul de gardă și

conductoarele de fază paralele, cu o întoarcere comună prin pământ, este:

$$Z'_{m} = \frac{\omega \cdot \mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{d_{wl}} \quad (57)$$

și adâncimea echivalentă de pătrundere în pământ (tabelul 6):

$$\delta = \frac{1,85}{\sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_0}{\rho}}}, \quad (58)$$

unde: R'_w este rezistența lineică a firului de gardă;

r_w - raza firului de gardă;

d_w este distanța între firele de gardă;

r_e - raza echivalentă a firului de gardă:

- pentru un conductor: $r_e = r_w$;

- pentru două conductoare: $r_e = \sqrt{r_w d_w}$

n - numărul de fire de gardă;

d_{wL} - distanța medie geometrică între firul de gardă și conductoarele de fază L_1 ,

L_2, L_3 :

- pentru un fir de gardă:

$$d_{wL} = 3 \sqrt{d_{wL1} d_{wL2} d_{wL3}}$$

- pentru două fire de gardă:

$$d_{wL} = 6 \sqrt{d_{w1L1} d_{w1L2} d_{w1L3} d_{w2L1} d_{w2L2} d_{w2L3}}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am};$$

μ_r - permeabilitatea relativă a firului de gardă:

cablu de OL-Al cu un strat de Al: $\mu_r = 5 + 10$;

alte cabluri OL - Al: $\mu_r = 1$;

cabluri de oțel: $\mu_r = 75$;

q - rezistivitatea solului (tabelul 6).

Din relațiile 55 + 57 factorul de reducere al liniilor cu fir de gardă OL-Al uzual depinde de rezistivitatea solului. Figura 20 arată, de exemplu, valoarea factorului de reducere pentru diferite tipuri de linii aeriene cu tensiune nominală de 60 kV + 220 kV. În cazul liniilor aeriene având unul sau două fire de gardă de oțel, valoarea factorului de reducere devine, respectiv, între 0,95 și 0,90.

În cazul cablurilor de energie, factorul de reducere depinde și de tipul și dimensiunile mantalei, de ecran și de armătură, conform practicii și normelor naționale. Se pot găsi indicații în manualele de fabrică.

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 decalate cu $\pm 120^\circ$.

Metoda componentelor simetrice permite extinderea analizei de fază în cazul sistemelor cu sarcini dezechilibrate.

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 simetrici poate fi descompus în două sisteme de fazori simetrici (unul de succesiune directă și altul de succesiune inversă) și un sistem de fazori în fază (homopolari). În cazul în care curenții și tensiunile sunt astfel reprezentate, 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 curenți ai unui sistem trifazat, sunt:

- Să permită simplificarea calculelor. Acest lucru este posibil 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 (homopolară, directă, inversă), cu coordonate de transformare în valori complexe, există și alte componente simetrice dintre care, mai larg utilizat, este sistemul α , β , 0 propus de E. Clarke [6], cu coordonate de transformare în valori reale. Acest din urmă sistem se pretează mult mai bine la studiul fenomenelor tranzitorii ale mașinilor electrice și au o largă răspândire în acest domeniu.

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.

Metoda este prezentată într-o serie de lucrări [5, 6, 7]. 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 fazori. Legătura dintre aceste două grupe de mărimi se exprimă printr-un sistem de ecuații lineare:

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

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

Prin aceasta sistemul inițial de trei vectori a fost înlocuit cu unul nou format din nouă vectori, care pot fi grupați în trei sisteme:

Sistemul 1: $a_{11} \underline{V}_d; a_{21} \underline{V}_d; a_{31} \underline{V}_d$.

Sistemul 2: $a_{12} \underline{V}_l; a_{22} \underline{V}_l; a_{32} \underline{V}_l$.

Sistemul 3: $a_{13} \underline{V}_h; a_{23} \underline{V}_h; a_{33} \underline{V}_h$.

Pentru studiul sistemelor trifazate, folosind componentele simetrice: directă, inversă și homopolară, este convenabil să se introducă un fazor operator care să defazeze cu $+120^\circ$ unghiul unui fazor dat, fără a-i schimba mărimea (fig. A.1).

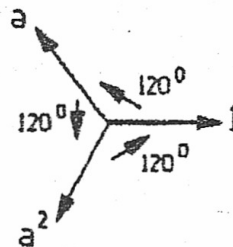


Fig. A. 1. Diagrama fazorială a operatorului a .

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

Este deci clar că \underline{a} rotește un fazor cu $+120^\circ$, iar \underline{a}^2 cu -120° .

Funcțiile operatorului \underline{a} sunt prezentate în tabelul A. 1 (operatorii $1, \underline{a}, \underline{a}^2$ formează un sistem de fazori simetric, echilibrat, de succesiune inversă; operatorii $\underline{1}, \underline{a}^2, \underline{a}$ formează un sistem de fazori simetric, echilibrat, de succesiune directă după convenția uzuală de rotație în sens invers acelor de ceasornic).

Proprietățile operatorului a

Funcția	În coordonate polare	În coordonate carteziene
a	e^{j120}	$-0,5 + j0,866$
a^2	e^{j240}	$-0,5 - j0,866$
a^3	e^{j0}	$1,0 + j0$
$1 + a + a^2$	0	0
$1 + a = -a^2$	e^{j60}	$0,5 + j0,866$
$1 + a^2 = -a$	e^{j60}	$0,5 - j0,866$
$1 - a$	$\sqrt{3} e^{j90}$	$1,5 - j0,866$
$1 - a^2$	$\sqrt{3} e^{j30}$	$1,5 + j0,866$
$a - 1$	$\sqrt{3} e^{j150}$	$-1,5 + j0,866$
$a^2 - 1$	$\sqrt{3} e^{j150}$	$-1,5 - j0,866$
$a - a^2$	$\sqrt{3} e^{j90}$	$0 + j1,732$
$a^2 - a$	$\sqrt{3} e^{j90}$	$0 - j1,732$
$a + a^2$	e^{j180}	$-1 + j0$

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 a vom obține (fig. A.2):

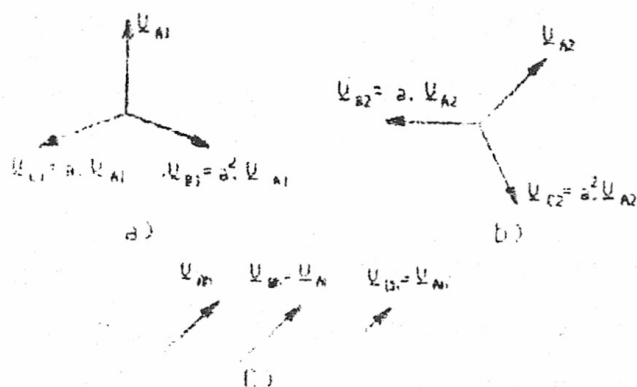


Fig. A.2. Componentele simetrice de tensiune:

- a) Sistem de succesiune directă.
- b) Sistem de succesiune inversă.
- c) Sistem de succesiune homopolară.

Sistemul 1 (de succesiune directă): $\underline{V}_{Ad}; \underline{V}_{Bd} = a^2 \underline{V}_{Ad}; \underline{V}_{Cd} = a \underline{V}_{Ad}$

Sistemul 2 (de succesiune inversă): $\underline{V}_{Ai}; \underline{V}_{Bi} = a \underline{V}_{Ai}; \underline{V}_{Ci} = a^2 \underline{V}_{Ai}$

Sistemul 3 (homopolar): $\underline{V}_{Ah}; \underline{V}_{Bh} = \underline{V}_{Ah}; \underline{V}_{Ch} = \underline{V}_{Ah}$

Deci, ecuațiile (A - 1) devin:

$$\begin{aligned} \underline{V}_A &= \underline{V}_{Ah} + \underline{V}_{Ad} + \underline{V}_{Ai} \\ \underline{V}_B &= \underline{V}_{Ah} + a^2 \underline{V}_{Ad} + a \underline{V}_{Ai} \\ \underline{V}_C &= \underline{V}_{Ah} + a \underline{V}_{Ad} + a^2 \underline{V}_{Ai} \end{aligned} \quad (A-2)$$

Rezolvarea acestui sistem de observații dă:

$$\begin{aligned} \underline{V}_{Ah} &= 1/3 (\underline{V}_A + \underline{V}_B + \underline{V}_C) \\ \underline{V}_{Ad} &= 1/3 (\underline{V}_A + a \underline{V}_B + a^2 \underline{V}_C) \\ \underline{V}_{Ai} &= 1/3 (\underline{V}_A + a^2 \underline{V}_B + a \underline{V}_C) \end{aligned} \quad (A-3)$$

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:

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_A \\ \underline{V}_B \\ \underline{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_d \\ \underline{V}_b \\ \underline{V}_i \end{bmatrix} \text{ sau } \begin{bmatrix} \underline{V}_A \\ \underline{V}_B \\ \underline{V}_C \end{bmatrix} = \mathbf{S} \begin{bmatrix} \underline{V}_b \\ \underline{V}_d \\ \underline{V}_i \end{bmatrix} \quad (A-4)$$

și

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_b \\ \underline{V}_d \\ \underline{V}_i \end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_A \\ \underline{V}_B \\ \underline{V}_C \end{bmatrix} \text{ sau } \begin{bmatrix} \underline{V}_b \\ \underline{V}_d \\ \underline{V}_i \end{bmatrix} = \mathbf{S} \begin{bmatrix} \underline{V}_A \\ \underline{V}_B \\ \underline{V}_C \end{bmatrix} \quad (A-5)$$

\mathbf{S} fiind matricea de conexiuni 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 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 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 repartizat printr-o interconectare între rețele echivalente de diferite succesiuni.

Rețeaua de succesiune directă este singura din cele trei care va conține tensiuni electromotoare (generatoare), întrucât alternatoarele produc, practic, numai tensiuni de succesiune directă. Tensiunile care apar în rețelele de succesiune inversă și homopolară vor fi generate de dezechilibru și vor fi ca tensiuni aplicate rețelelor în punctul de defect. În plus, rețeaua de succesiune directă reprezintă sistemul de operare în condiții normale echilibrate. Pentru studiile de scurtcircuit tensiunile interne sunt scurtcircuitate și rețeaua de succesiune directă 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 trebuie adunați la curentul de defect I_d , 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 homopolară să se pornească de la punctul de defect, nu de la punctul de dezechilibru, deoarece curenții homopolari pot să nu circule în întregul sistem. Dar acele părți ale sistemului prin care circulă curenții homopolari, ca rezultat al aplicării tensiunii în punctul de dezechilibru, sunt incluse în rețeaua homopolară ca văzute dinspre defect.

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.

Impedanțele de diferite succesiuni ale liniilor, transformatoarelor și ale mașinilor rotative sunt prezentate în anexele 5, 6, 9, 10, 12, 13.

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

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

În figura A . 3 se prezintă modul de determinare a acestora.

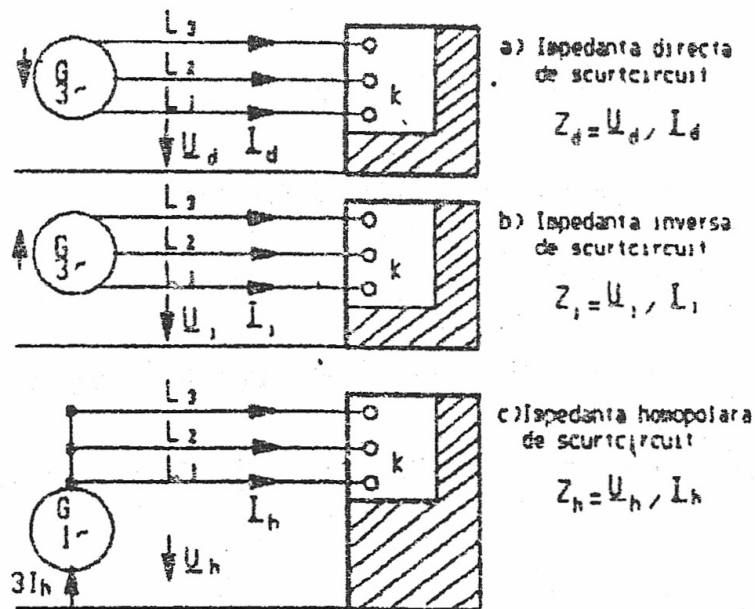


Fig. A. 3. Impedanțele de scurtcircuit ale sistemelor trifazate de c.a. la locul de defect k.

Impedanțe pe neutru nu apar în schemele echivalente de succesiune directă sau inversă, întrucât suma curenților pe cele trei faze conduce la un curent total nul pe neutru. În schema echivalentă de succesiune homopolară va apărea o impedanță egală cu de trei ori impedanța ohmică pe neutru, deoarece curenții homopolari care circulă în cele trei faze dau un curent total pe neutru de $3 I_h$.

Pentru efectuarea calculelor cu componente simetrice este necesară stabilirea unei convenții de succesiune pentru tensiuni și curenți (fig. A. 4).

Prin convenție se stabilește că sensul pozitiv al curentului în fiecare rețea de diferite succesiuni este cel ieșind din punctul de 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. Cu alte cuvinte, dacă un element oarecare al unui circuit este echilibrat și prezintă în raport cu curenții $\underline{I}_d, \underline{I}_i, \underline{I}_h$ impedanțele proprii $\underline{Z}_d, \underline{Z}_i, \underline{Z}_h$, componentele simetrice ale căderilor de tensiune pe acest element vor fi:

$$\Delta \underline{U}_d = \underline{Z}_d \cdot \underline{I}_d$$

$$\Delta \underline{U}_i = \underline{Z}_i \cdot \underline{I}_i$$

$$\Delta \underline{U}_h = \underline{Z}_h \cdot \underline{I}_h$$

(A - 6)

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 succesiune respectivă din tensiunea generatorului, considerând punctul neutru al rețelei ca punct de potențial nul. De exemplu, dacă impedanțele între neutru și punctul considerat sunt: $\underline{Z}_d, \underline{Z}_i, \underline{Z}_h$, componentele simetrice ale tensiunii vor fi:

$$\underline{V}_d = E_A - I_d \cdot \underline{Z}_d$$

$$\underline{V}_i = 0 - I_i \cdot \underline{Z}_i$$

(A - 7)

$$\underline{V}_h = 0 - I_h \cdot \underline{Z}_h,$$

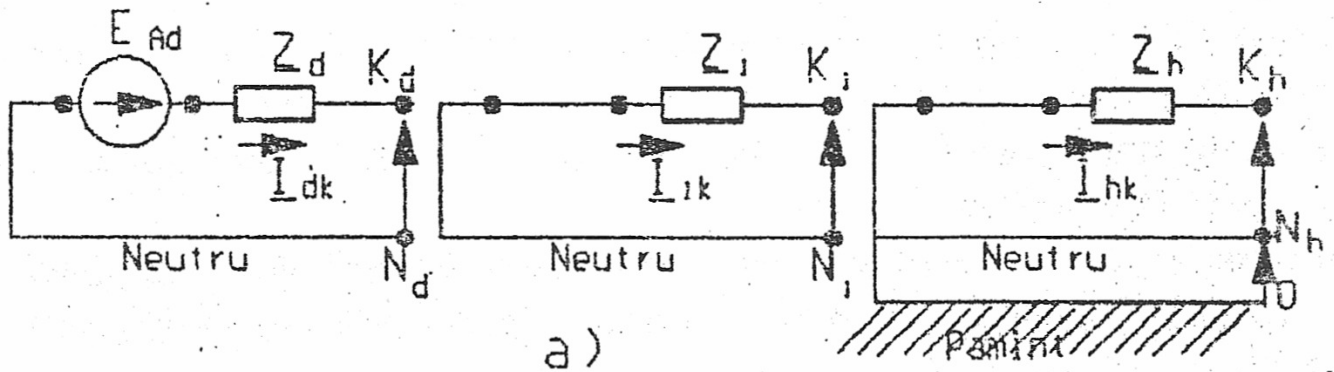
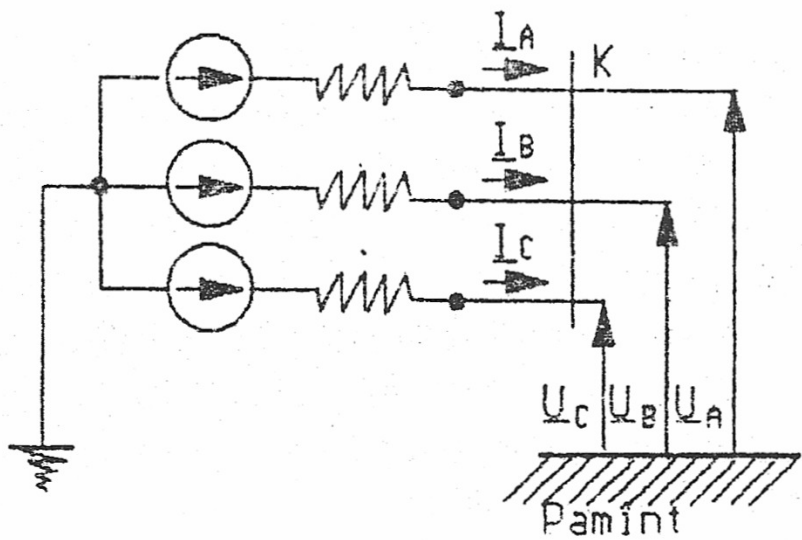
unde E_A este tensiunea directă a generatorului.

Circulația curenților de defect în t în întreaga rețea se determină prin compunerea curenților de diferite succesiuni în fiecare latură în parte, curenți obținuți prin repartitia 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.

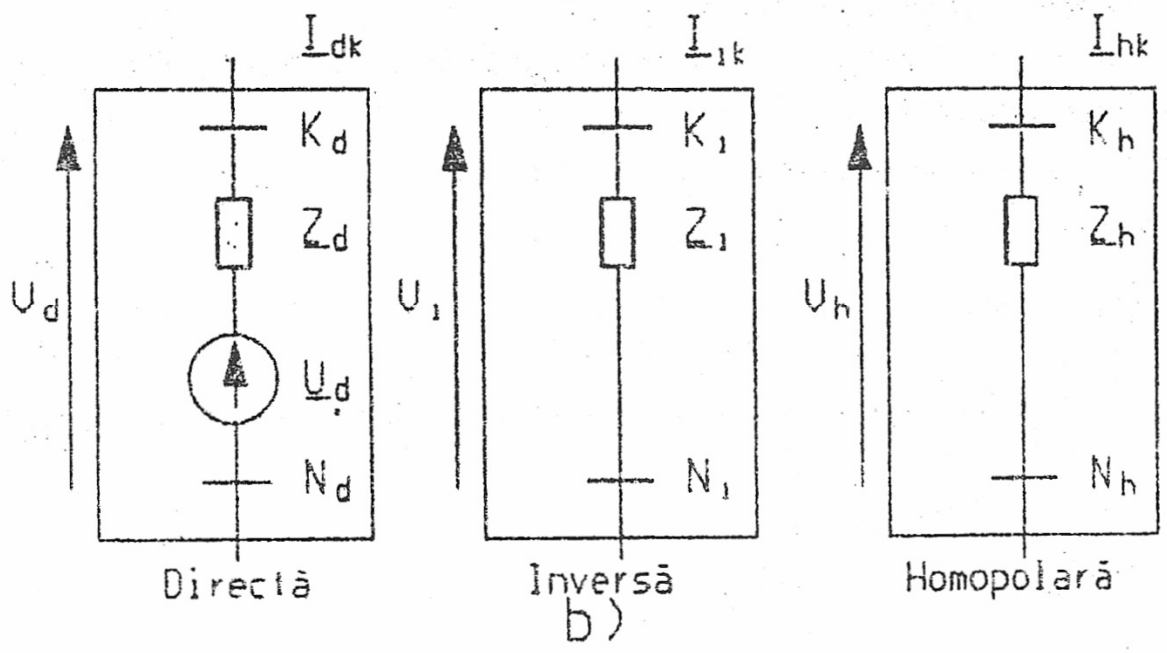
Pentru puterea complexă în regim nesimetric și (sau) dezechilibrat se obține:

$$S = P + jQ = \underline{U}_A \cdot I_A^* + \underline{U}_B \cdot I_B^* + \underline{U}_C \cdot I_C^*$$

$$S = 3 (\underline{U}_h \cdot I_h^* + \underline{U}_d \cdot I_d^* + \underline{U}_i \cdot I_i^*)$$



a)



b)

Fig. A. 4. Reprezentarea schemelor echivalente pentru rețele de diferite succesiuni:
 a) prin impedanțe respective;
 b) ca dipoli de diferite succesiuni.

SISTEMUL UNITĂȚILOR RELATIVE

Calculul mărimilor caracteristice ale unui sistem poate fi ușor efectuat cu ajutorul reprezentării în **unități relative**: ale tensiunii, curentului, puterii active, reactive sau aparente. Valoarea numerică a unității relative a oricărei mărimi este raportul acesteia la o mărime de bază de aceeași natură (cu aceleași dimensiuni), arbitrar aleasă. Deci, o mărime relativă este ca o valoare normalizată în raport cu o valoare de bază aleasă.

În calculul rețelelor electrice intră, de regulă, cinci mărimi, prezentate în tabelul A.1, cu indicarea dimensiunilor lor (denumire preluată ca o extindere a noțiunii de dimensiune adoptată pentru termenii masă, lungime, timp).

Având în vedere relațiile dintre aceste mărimi, este necesară și suficientă alegerea a numai două mărimi de bază.

În calculele de rețele electrice tensiunea normală a liniilor și a echipamentului este cunoscută, astfel încât tensiunea poate și este logic să fie aleasă ca mărime de bază. Cea de a doua mărime de bază uzual aleasă este puterea aparentă, care poate fi considerată arbitrar 100 MVA, 1000 MVA ș.a.m.d.

Aceeași putere aparentă este utilizată pentru întreaga rețea. Tensiunea de bază, arbitrar aleasă, trebuie corectată cu rapoartele de transformare ale transformatoarelor (considerate cu Y/Y sau echivalente cu acestea).

Dacă notăm mărimile de bază cu indicele b și considerăm cazul rețelelor trifazate, vom avea:

$$\text{- puterea de bază trifazată - } S_b \text{ [VA]} \quad (\text{A - 1})$$

$$\text{- tensiunea de linie de bază (arbitrar aleasă) - } U_b \text{ [V]} \quad (\text{A - 2})$$

$$\text{- curentul de bază - } I_b = S_b / \sqrt{3} \cdot U_b \text{ [A]} \quad (\text{A - 3})$$

$$\text{- impedanța de bază - } Z_b = \frac{U_b / \sqrt{3}}{S_b / \sqrt{3} \cdot U_b} = \frac{U_b^2}{S_b} \quad (\text{A - 4})$$

Odată definite mărimile de bază, se pot determina unitățile relative aferente oricărei mărimi:

$$U^* = U/U_b; I^* = I/I_b; S^* = S/S_b; Z^* = Z/Z_b, \quad (\text{A - 5})$$

unde U, I, S, Z sunt exprimate în unități fizice.

Rezultă:

$$Z^* = \frac{Z(\Omega)}{Z_b(\Omega)} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_b \cdot Z}{U_b} = Z \cdot \frac{S_b}{U_b^2}, \quad (\text{A - 6})$$

adică ea este numeric egală cu căderea de tensiune relativă în elementul considerat, atunci când acesta este parcurs de curentul de bază.

Iar pentru: $S = P + jQ$ [VA]

$$S^* = P^* + jQ^*,$$

$$\text{în care } P^* = \frac{P[W]}{S_b[VA]} \quad \text{și} \quad Q^* = \frac{Q[VAR]}{S[VA]} \quad (A-7)$$

Relațiile de mai sus au fost stabilite pentru rețele cuplate galvanic.

Menționăm că, în cazul unor cuplaje magnetice - prin transformatoare - toate mărimile trebuie calculate în unități relative raportate la condițiile de bază, având în vedere că, în relațiile de mai sus, prin U_b , I_b , Z_b se înțeleg întotdeauna tensiunea, curentul și impedanța de bază ale acelei trepte de transformare la care se găsesc mărimile care sunt supuse operațiilor de raportare. Această ordine de raportare a schemelor cu legături magnetice este cea mai simplă și riguroasă, deoarece la recalcularea la condițiile de bază nu trebuie introduse sub formă explicită toate rapoartele de transformare intermediare. Acestea sunt incluse în înseși valorile unităților de bază. Exemplificând pentru o impedanță despărțită prin n transformatoare de zona pentru care s-a ales U_b , impedanța unui element din zona respectivă de impedanțe Z [Ω] va avea o impedanță raportată la tensiunea treptei de bază:

$$Z_r = Z \cdot \frac{1}{(k_1 k_2 \dots k_n)^2},$$

unde:

$k_1, k_2 \dots k_n$ sunt rapoartele de transformare ale transformatoarelor.

$$Z^* = Z \cdot \frac{1}{(k_1 k_2 \dots k_n)^2} \cdot \frac{S_b}{U_b^2}$$

Se observă, că în unități relative, tensiunea de linie și tensiunea de bază sunt numeric egale. De asemenea, puterea trifazată și cea monofazată (ale unei rețele echilibrate) în unități relative au aceeași valoare numerică.

Uneori, în locul exprimării în unități fracționare, mărimile relative se exprimă în procente. Relațiile dintre acestea sunt evidente:

$$\underline{Z} \% = 100 \cdot Z^*$$

După cum se știe tensiunea de scurtcircuit a transformatoarelor se exprimă în procente din tensiunea nominală a acestora. Neglijând rezistența, care este foarte mică,

se poate considera $u_k\% = Z\% = x\%$, valoare care trebuie considerată față de tensiunea în gol a acelei prize pe care funcționează transformatorul și pentru o putere de bază egală cu puterea nominală a transformatorului.

Adesea este necesar ca o impedanță, raportată la o anumită bază, să fie trecută într-o altă bază.

Schimbarea bazei este o operație simplă.

Impedanța $Z [\Omega]$ raportată la baza veche era:

$$Z_v^* = Z \cdot \frac{S_{bv}}{U_{bv}^2},$$

dar raportată la baza nouă este:

$$Z_n^* = Z \cdot \frac{S_{bn}}{U_{bn}^2}$$

Rezultă deci:

$$Z_n^* = Z_v^* \left(\frac{U_{bv}}{U_{bn}} \right)^2 \cdot \left(\frac{S_{bn}}{S_{bv}} \right) \quad (\text{A - 8.a})$$

Relația (A - 8.a) este importantă pentru că permite schimbarea bazei fără cunoașterea valorii impedanței (în Ω). De notat că noua valoare variază direct proporțional cu puterea de bază și invers proporțional cu pătratul tensiunii de bază.

La alegerea condițiilor de bază trebuie să se aibă în vedere ca operațiile de calcul să fie cât mai simple și ordinul de mărime al unităților relative să permită folosirea lor comodă. De aceea, pentru S_b este bine să se aleagă o valoare simplă și rotundă (100 MVA, 1000 MVA ș.a) sau uneori puterea nominală a unităților generatoare (transformatoare) care se repetă des în schema dată (sau un multiplu al acesteia). Pentru tensiunea de bază se recomandă să se aleagă tensiunea nominală U_N sau o valoare apropiată. Dacă $U_b = U_N$, recalcularea tensiunilor electromotoare relative se reduce ($E_b^* = E_N^*$), iar expresiile pentru recalcularea impedanțelor relative capătă o formă mai simplă:

$$Z_n^* = Z_v^* \cdot \left(\frac{S_N}{S_b} \right) \quad (\text{A - 8.b})$$

Condițiile $U_b = U_N$, în general, se respectă numai pentru o parte a elementelor, deoarece tensiunile nominale ale elementelor aceluiași circuit electric pot fi, în general, diferite. Totuși, aceste diferențe sunt relativ mici (în limite de 10 %) și în calculele aproximative ele pot fi neglijate, presupunând că tensiunile nominale ale tuturor

elementelor aceleiași trepte de tensiune sunt egale cu valoarea medie U_m a tensiunii nominale pentru un circuit dat. De menționat că, în cazul existenței unor bobine de reactanță, dat fiind faptul că ele reprezintă o parte preponderentă a impedanței totale a circuitului, este foarte importantă calcularea valorii exacte a impedanței.

Conversia de la unități relative la unități fizice, necesară după efectuarea completă a calculelor, este simplă și se face cu relațiile:

$$I = I^* \cdot I_b \text{ [A]} \quad (\text{A - 9.a})$$

$$U = U^* \cdot U_b \text{ [V]} \quad (\text{A - 9.b})$$

$$S = S^* \cdot S_b \text{ [VA]} \quad (\text{A - 9.c})$$

$$P = P^* \cdot S_b \text{ [W]} \quad (\text{A - 9.d})$$

$$Q = Q^* \cdot S_b \text{ [VAr]} \quad (\text{A - 9.e})$$

De regulă, nu este necesară recalcularea (în Ω) a impedanței, dar procedura este aceeași:

$$Z = Z^* \cdot \frac{U_b^2}{S_b} \text{ } |\Omega| \quad (\text{A - 9.f})$$

Tabelul A.1

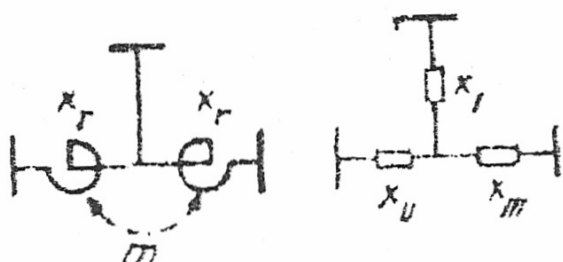
Mărimile electrice și dimensiunile lor

Mărimea	Simbolul	Dimensiunea
Curent, A	I	[I]
Tensiune, V	V	[V]
Putere aparentă, S	$S = P + jQ$	[VI]
Impedanță, Ω	$Z = R + jX$	[V/I]
Unghi de defazaj	ϕ, θ ș.a.	fără dimensiuni
Timp, s	t	[T]

RELAȚII DE TRANSFIGURARE A SCHEMELOR

SCHEMA		RELAȚII DE TRANSFIGURARE A REACTANȚELOR	DISTRIBUȚIA CURENȚILOR ÎN SCHEMA ÎNAINTE DE TRANSFORMARE
ÎNAINTE DE TRANSFIGURARE	DUPĂ TRANSFIGURARE		
		$X_e = X_1 + X_2 + \dots + X_n$	$I_1 = I_2 = \dots = I_n$
		$X_e = \frac{1}{\frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} + \dots + \frac{1}{X_n}}$ PENTRU 2 REACTANȚE $X_e = \frac{X_1 \cdot X_2}{X_1 + X_2}$	$I_n = I \frac{X_e}{X_n}$
		$X_A = \frac{X_{AB} \cdot X_{AC}}{X_{AB} + X_{AC} + X_{BC}}$ $X_B = \frac{X_{AB} \cdot X_{BC}}{X_{AB} + X_{AC} + X_{BC}}$ $X_C = \frac{X_{AC} \cdot X_{BC}}{X_{AB} + X_{AC} + X_{BC}}$	$I_{BA} = \frac{I_B X_C - I_C X_A}{X_{AB}}$ $I_{AC} = \frac{I_A X_A - I_C X_C}{X_{AC}}$ $I_{CB} = \frac{I_C X_C - I_B X_B}{X_{BC}}$
		$X_{AB} = X_A + X_B + \frac{X_B \cdot X_C}{X_C}$ $X_{BC} = X_B + X_C + \frac{X_B \cdot X_C}{X_A}$ $X_{AC} = X_A + X_C + \frac{X_B \cdot X_C}{X_B}$	
		$X_{AB} = X_A \cdot X_B \cdot \Sigma Y$ $X_{BC} = X_B \cdot X_C \cdot \Sigma Y$ $\Sigma Y = \frac{1}{X_A} + \frac{1}{X_B} + \frac{1}{X_C} + \frac{1}{X_D}$ ANALOG SI PENTRU O STEA CUI MAI ARII, TR. BAZK.	$I_A = I_{AC} + I_{AB} - I_{BA}$ ----- ----- S.C.M.D.

REACTORI JUMELAȚI



Σ - m . z
 $\Sigma_{II} = \Sigma_{IN} = \Sigma (1 + m)$
 X_r - reactanța unei ramuri a reactorului când cordonul ramurii este de gol
 m - coeficientul de cuplaj dintre ramurile reactorului

PARAMETRII GENERATOARELOR

Tipul	S N [MVA]	U N [kV]	I N [kA]	cos φ /N	Rezistența în fabricarea la 15°C (20°C) [10 ⁻³ Ω]		Reactanțele în unități relative							Constantele de timp [s]		Constantele de inerție ale grupului [s]		
					Stator	Rotor	x _d ^m	x _d [']	x _d	x _q	x ₁	x _h	T _{d0} [']	T _{d0} ^m	T	J		
																	x _d ^m	x _d [']
1. Turbogeneratoare fabricate în ROMÂNIA																		
A 1300/900	3,75	6,3	0,343	0,8	33,3	345	0,123	0,169	1,689	1,689	1,689	1,689	0,151	0,0294				
A 1300/1050	5,0	6,3	0,459	0,8	26,4	370	0,126	0,19	1,771	1,771	1,771	1,771	0,154	0,0095				
A 1500/1400	9,0	6,3	0,825	0,8	11,6	341	0,142	0,2	1,877	1,877	1,877	1,877	0,173	0,0802				
TA-12-2	15,0	6,3	1,375	0,8	4,82		0,115	0,175	1,82	1,82	1,82	1,82	0,14	0,055				
TH-60-2	75,0	10,5	4,125	0,8		99,5	0,176	0,309	1,657	1,657	1,657	1,657			5,4	0,063	6,65	
THA-150-2	187,5	15,75	6,9	0,8			0,212	0,319	2,067	2,067	2,067	2,067			4,8	0,063	5,76	
THA-330-2	308	24,0	9,34	0,85			0,269	0,364	2,15	2,15	2,15	2,15			6,13	0,13	6,1	
2. Hidrogeneratoare fabricate în ROMÂNIA																		
HVS 260/35-10	3,8	6,3		0,9			0,21	0,215	1,12	1,12								
HVS 424/55-44	4,3	6,3		0,9			0,22	0,31	1,02	1,02								
HVS 260/55-10	5,8	6,3		0,9														
HVS 420/65-28	6,2	6,3		0,9			0,17	0,27	0,981	0,981								
HVS 426/66-36	6,4	6,3		0,9			0,21	0,26	0,81	0,81								
HVS375/150-24	8,5	6,3		0,9			0,18	0,27	1,009	1,009								
HVS 380/90-28	8,85	6,3		0,9			0,17	0,245	0,335	0,335								
HVS375/100-24	9,5	6,3		0,9														

Tipul	S N [MVA]	U N [kV]	I N [kA]	cos φ	Rezistența în fașurării la 15 °C (20 °C) [10 ⁻³ Ω]		Reactanțele în unități relative										Constante de timp [s]		Constantele de inerție ale grupului [s]
					Stator	Rotor	x _d ^M	x _d [']	x _d	x _d	x _q	x _f	x _h	T _{d0} [']	T _{d0} ^M	T	J		
							x _d	x _d	x _d	x _q	x _f	x _h	T _{d0}	T _{d0}					
HVS 602/95-44	12,5	6,3	1,147	0,9			0,21	0,32	1,03										
HVS 795/90-64	21,0	10,5	1,155	0,9	3,97	182,5	0,2128	0,2938	0,8058	0,5328	0,217	0,0905							
HVS 838/100-36	25,0	10,5	1,376	0,9			0,18	0,27	0,979										
HVS 420/125-20	25,5	10,5	1,404	0,9			0,17	0,23	1,066										
HVS 800/95-60	26,0	10,5	1,43	0,9	2,48	165	0,2398	0,3068	0,8712	0,5756	0,234	0,0896							
KOT 27/12,8	27,55	6,3	2,528	0,98			0,3	0,42	1,0	0,7							1,65	0,028	1,82
HVS 423/167-16	62,0	10,5	3,41	0,9			0,171	0,264	1,06								6,4	0,255	5,16
HVS 463/160-4	85,0	15,75	3,11	0,9			0,194	0,255		0,609							6,53	0,383	5,33
HVS 396/215-10	90,0	15,75	3,3	0,9			0,151	0,167		0,609							7,15	0,064	5,59
HVS 1500/175-84	185,0	15,75	6,78	0,9			0,237	0,323	1,05	0,68							5,53	0,045	5,6
HVS 1500/175 84	190,0	15,75	6,97	0,9	0,439	165	0,316	0,38	1,14	0,84	0,26	0,11					5,6	0,068	8,1
3. Turbogeneratoare de fabricație străină existente în SEM																			
T-2-50-2 LMZ	58,8	10,5	3,24	0,85			0,128	0,19	1,73	1,73	1,73						6,0	0,04	11,9
TH-6378-2SKODA	62,5	10,5	3,44	0,8			0,125	0,2	2,2	2,2	2,2						6,0	0,04	6,4
GH-6378-2SKODA	66,75	10,5	3,78	0,8			0,173	0,262	2,1	2,1	2,1						6,0	0,04	6,4
TVF-60-2 LMZ	75,0	10,5 (6,3)	4,13	0,8			0,156	0,242	2,0	2,0	2,0						6,4	0,0557	8,18
TVF-63-2 LMZ	78,75	10,5	4,13	0,8			0,139	0,22	1,67	1,67	1,67						6,4	0,0557	5,8
TV 2-100-2	117,5	13,8	4,93	0,85	1,45	335	0,14	0,2	1,8	1,8	1,8	0,17	0,08				13,0	0,38	4,42
TVF-100-2 LMZ	117,5	10,5	6,54	0,85	1,03	122	0,183	0,263	1,8	1,8	1,8	0,22	0,10				7,75	0,053	7,9
TV 2-150-2	166,5	18,0	5,35	0,85	1,41	436	0,12	0,18	1,49	1,49	1,49	0,15	0,07				11,9	0,42	4,97
D-6590-2SKODA	125,0	13,8	5,24	0,8			0,152	0,21	1,95	1,95	1,95						6,4	0,04	7,95

Anexa 4 (continuare)

Tipul	S N [MVA]	U N [kV]	I N [kA]	cos φ / N	Rezistența în fașă R11 la 15 °C (20 °C) [10 ⁻³ Ω]		Reactanțele în unități relative										Constantele de timp [s]		Constantele de inerție ale grupului [s]
					Stator	Rotor	x ^d	x ^{d'}	x ^d	x ^q	x ^t	x ^h	T ^{d0}	T ^{d0'}	T ^J				
FTH 5400-63-2 SIEMENS	125,0	10,5	6,8	0,8			0,14	0,205	2,08	2,08						6,0	0,04	7,95	
TVF-120-2 LMZ	141,2	10,5	7,76	0,85			0,192	0,274	1,907	1,907						7,75	0,053	8,3	
H-644872/2-HH SKODA	170,0	13,8	7,1	0,8			0,167	0,294	2,42	2,42						4,5	0,068	7,95	
TVV-165-2 LMZ	176,5	16,0	5,67	0,85	2,36	118	0,21	0,3	1,71	1,71	0,26	0,11				4,8	0,063	7,58	
H-6688-2VH SKODA	235,0	15,75	9,06	0,85			0,212	0,275	1,92	1,92						6,4	0,0484	6,75	
TVF-200-2	235,0	11,0	12,35	0,85	0,41	124	0,17	0,25	1,95	1,95	0,2	0,1				7,12	0,52	2,78	
TGV-200-2	235,0	15,75	8,63	0,85	1,08	194	0,19	0,27	1,85	1,85	0,23	0,08				6,53	0,47	2,79	
TVV-200-2 LMZ	235,0	15,75	9,06	0,85	1,21	87	0,19	0,27	1,85	1,85	0,23	0,1				6,4	0,04	5,77	
TVV-200-2ALMZ	247,0	15,75	9,06	0,85			0,19	0,25	2,2	2,2						6,4	0,048	6,7	
T-252-520	370,0	24,0	8,9	0,85			0,249	0,36	2,29	2,29						6,23	0,144	6,6	

4. Hidrogeneratoare de fabricație străină existente în SEN

EAHV-530/145- -20 SKODA	54,0	10,5	2,75	0,85			0,205	0,326	1,2	0,855						6,4	0,255	9,65
HV 760732/14 SKODA	61,0	10,5	3,95	0,9			0,16	0,25		0,88						6,0	0,383	7,9
HVS1500/175-84	185,0	15,75	6,78	0,9			0,237	0,323	1,05	0,68						5,53	0,045	5,6

5. Turbogenerator CNE Carneșvodă

CANDU-700HW Canada	800,0	24,0	19,25	0,9			0,25	0,335	1,81	1,69						8,7	0,038	14,57
-----------------------	-------	------	-------	-----	--	--	------	-------	------	------	--	--	--	--	--	-----	-------	-------

1. Grupurile de fabricație românească au rezistența înfășurării dată la 20°C pentru turbogeneratoare și 75°C pentru hidrogeneratoare.

2. Pentru turbogeneratoare, adică pentru mașini cu poli înnecați:

$$x_d'' = x_q$$

3. Pentru mașini cu poli aparenti x_q depinde puțin de saturație, practic este considerată constantă, aproximativ egală cu:

$$x_q \approx 0,6 \cdot x_d''$$

4. La turbogeneratoare și la mașinile cu înfășurări pe ambele axe ale rotorului, în lipsă de date, se poate considera:

$$x_i \approx x_d''$$

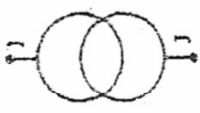
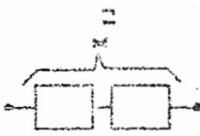
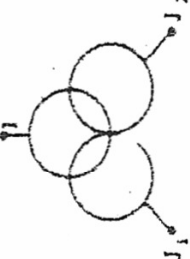
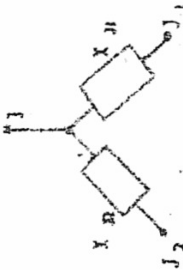
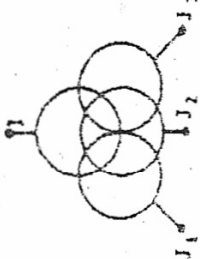
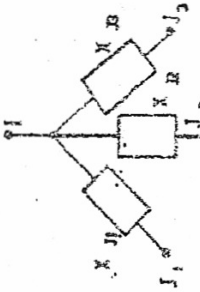
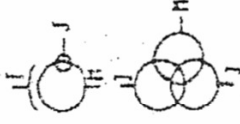
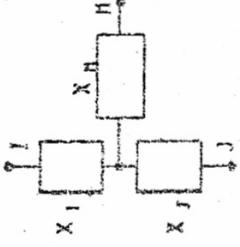
5. La mașinile sincrone $x_h \approx (0,15 + 0,6) x_d''$.

6. Cu referire la rezistențele mașinilor sincrone $r_h = r_d + r_l \gg r_d$, se determină experimental.

PARAMETRII COMPENSATOARELOR

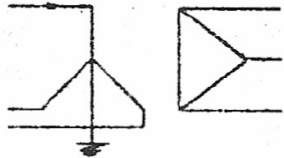
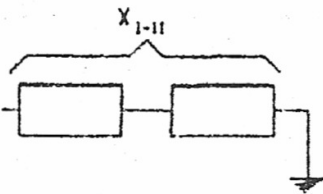
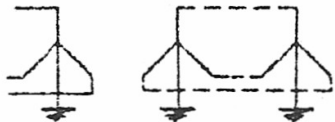
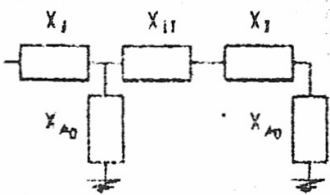
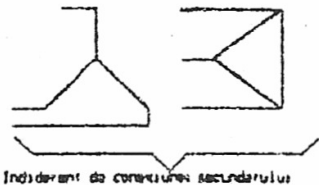
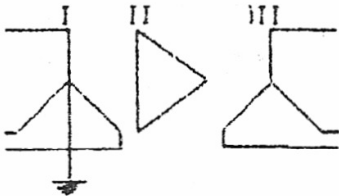
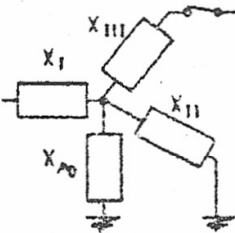
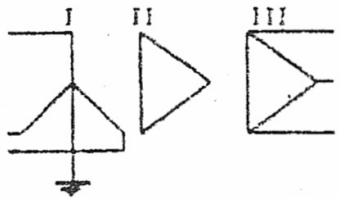
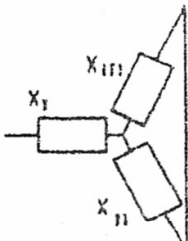
Tipul	Puterea nominală (MVar)	U_n (kV)	I_n (kA)	$\cos\phi$	Reactanța (Ω)			Constantele de timp (s)		Constanta la inerție GD^2
					X_d	X'_d	X''_d	T'_{d0}	T''_d	
HK 682760/6	60	10,5	3,3	0,0092	171	27,5	22,0	11,7	2,2	0,78
CS-RSR	60	10,5	3,3	-	168	32,74	28	8,68	1,692	0,78

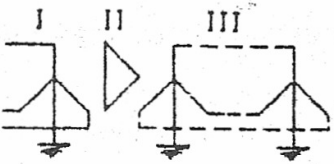
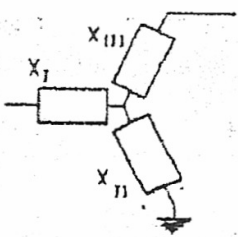
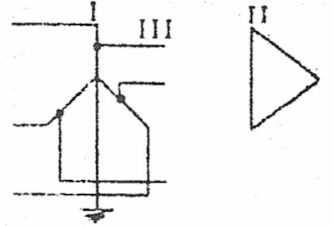
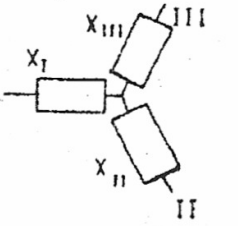
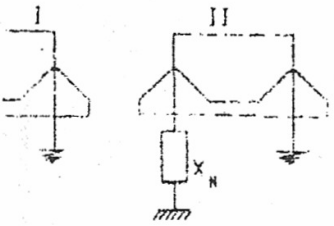
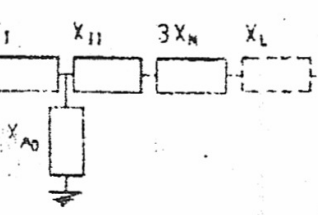
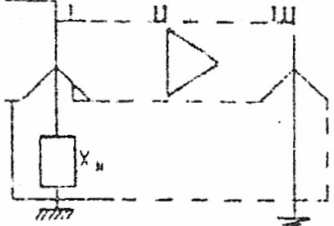
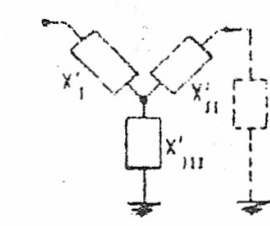
SCHEME ECHIVALENTE DE SUCCESIUNE DIRECTĂ ALE TRANSFORMATOARELOR
ȘI AUTOTRANSFORMATOARELOR

Transformatorul	Schema echivalentă	Parametrii
		$X = X_{10}$
		$X_{J1} = X_{J2} = 2X_{10}$
		$X_{J1} = X_{J2} = X_{J3} = 3X_{10}$
		$X_{J1} = 0,5 \cdot (X_{10} + X_{20} - X_{30})$ $X_{J2} = 0,5 \cdot (X_{10} + X_{30} - X_{20})$ $X_H = 0,5 \cdot (X_{10} + X_{40} - X_{30})$

RELAȚII DE CALCUL ȘI SCHEME ECHIVALENTE
PENTRU REACTANȚELE HOMOPOLARE

Scheme echivalente homopolare ale transformatoarelor
și autotransformatoarelor

Schema de conexiuni	Schema echivalentă homopolară	Relații de calcul
		$X_s = X_d = X_{1-II}$
		$X_s = X_d = X_{1-II}$
 <p>Indiferent de conexiunea secundarului</p>		$X_s = \infty$
		$X_s = X_1 + X_2 = X_{d-II}$
		$X_s = X_1 + \frac{X_1 X_{II}}{X_1 + X_{II}}$

Schema de conexiuni	Schema echivalentă homopolară	Relații de calcul
		<p>Întreaga schemă echivalentă a transformatorului se introduce în schema generală a secvenței homopolare.</p>
		
		$X_a = X_d + 3 \cdot X_N$
		$X'_I = X_I + 3 \cdot X_N \cdot (1 - U_I/U_{II})$ $X'_{II} = X_{II} + \frac{(U_I - U_{II}) \cdot U_I}{U^2}$ $X'_{III} = X_{III} + 3 \cdot X_N \cdot U_I/U_{II}$ <p>(cu raportare la tensiunea primară)</p>

CONDUCTOARE DE OTEL - ALUMINIU NEIZOLATE

Conținutul de con- ductiv rău de căldură aluziale	Secțiunea nominată a conductorului de Al.-Al (mm ²)	Nr. total de fire aluziale-otel	Diametrul conductorului (mm)	Rezistența la s.c. la 50°C (Ω/km)	l = 20 m		
					Rezistența în c.c. (Ω/km)	Reactanța inductivă (Ω/km)	Puterea inductivă echivalentă (mW)
	25/4	6/1	6,8	1,202	1,202048	0,01222	0,00280
	35/6	6/1	8,1	0,830	0,830108	0,01271	0,00330
	50/8	6/1	9,6	0,594	0,594197	0,01309	0,00390
	70/12	26/7	11,6	0,487	0,48714	0,01380	0,00571
	95/15	26/7	13,4	0,321	0,32126	0,01330	0,00542
	120/21	26/7	15,7	0,236	0,23635	0,01330	0,00435
	150/25	26/7	17,3	0,193	0,19343	0,01330	0,00709
	185/32	26/7	19,2	0,157	0,15752	0,01330	0,00776
	240/40	26/7	21,7	0,122	0,12288	0,01330	0,00877
	300/50	26/7	24,2	0,098	0,09884	0,01330	0,00979
	400/75	26/7	28,2	0,074	0,07308	0,01196	0,01164
	450/75	63/19	29,25	0,066	0,06523	0,01330	0,01184

U - U E L O Z

PARAMETRII LINIILOR ELECTRICE AERIENE DE 20 : 400 kV

Tipul de stlp	Cantitatea de stlp	Felul stlpului	Secțiunea conductorului mm ²	Numărul de conductori pe stlp	Rezistența Ω/km			Reactanța Inductoare Ω/km		Re-part xg/x ₀	Admisinea capacitivă 10 ⁻⁶ s/km	
					r ₁	r ₂	r ₃	x ₁	x ₂		y ₁	y ₂
1	2	3	4	3	6	7	8	9	10	11	12	
	1	beton comprimut	3X205 OIAI	1	0,630	0,975	0,365	1,596	4,372	3,012	1,30	
	1	beton comprimut	3X230 OIAI	1	0,384	0,739	0,334	1,593	4,472	3,102	1,398	
	1	beton comprimut	3X270 OIAI	1	0,437	0,592	0,343	1,573	4,592	3,209	1,420	
	1	beton comprimut	3X295 OIAI	1	0,321	0,466	0,334	1,563	4,683	3,291	1,436	
	1		3X150 OIAI+70 OI	1	0,193	0,493	0,401	1,349	3,383	2,787	1,889	
	1		3X185 OIAI+70 OI	1	0,157	0,345	0,304	1,342	3,404	2,834	1,908	
	1	beton	3X240 OIAI+70 OI	1	0,122	0,334	0,386	1,334	3,452	2,892	1,935	
	1		3X300 OIAI+70 OI	1	0,090	0,310	0,380	1,327	3,486	2,945	1,959	

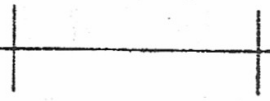
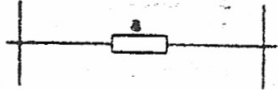
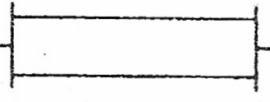
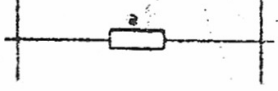
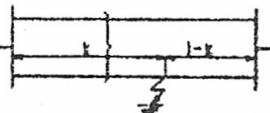
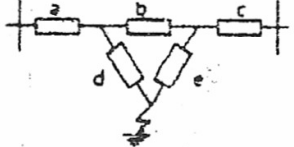
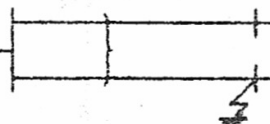
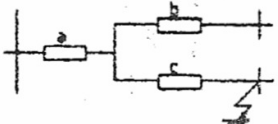
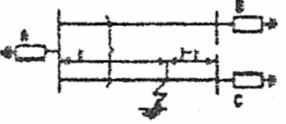
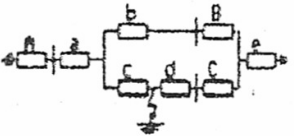
Anexa 9 (continuare)

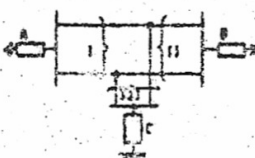
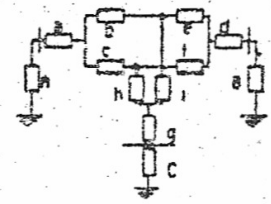
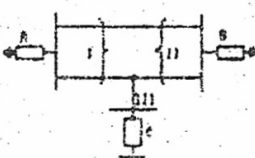
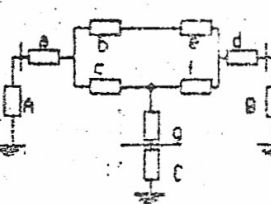
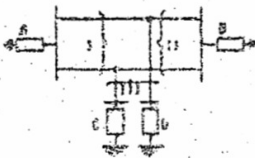
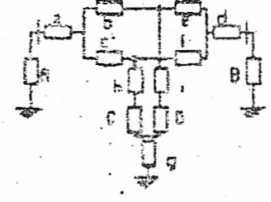
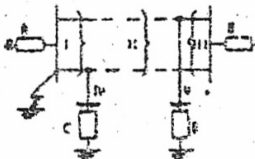
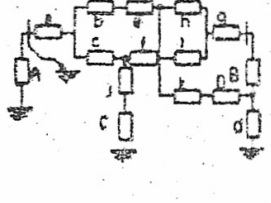
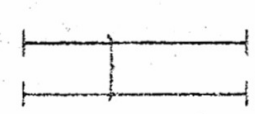
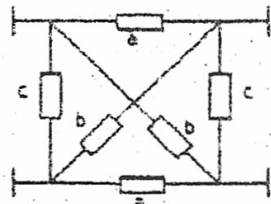
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	110 d.s.	metallic	2X3X150 OIAI +70 OI	2	0,097	0,297	0,211	1,116	5,284	5,345	2,633
			2X3X185 OIAI +70 OI	2	0,079	0,278	0,208	1,113	5,351	5,413	2,654
			2X3X185 OIAI +95 OI	2	0,079	0,294	0,208	1,095	5,284	5,453	2,652
			2X3X240 OIAI +70 OI	2	0,061	0,261	0,204	1,109	5,433	5,539	2,679
			2X3X300 OIAI +70 OI	3	0,069	0,249	0,201	1,106	5,308	5,637	2,702
	220	metallic	3X450 OIAI + 2X160/95 OIAI	1	0,067	0,175	0,404	0,768	1,90	2,779	2,168
			3X450 OIAI +2X95 OI	1	0,066	0,147	0,406	1,166	2,871	2,770	2,157
	220 d.s.	metallic	2X3X450 OIAI +160/95 OIAI	2	0,033	0,155	0,208	0,775	3,788	5,441	3,013
			2X3X450 OIAI +95 OI	2	0,033	0,209	0,230	1,004	4,909	5,439	3,004

Anexa 9 (continuare)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	400	metallic	$3 \times 3 \times 450 \text{ OIAI}$ $- 2 \times 160/95 \text{ OIAI}$	1	0,034	0,137	0,330	0,482	2,060	3,478	2,731
	400	metallic	$3 \times 3 \times 300 \text{ OIAI}$ $+ 2 \times 160/95 \text{ OIAI}$	1	0,034	0,137	0,328	0,486	2,21	3,022	2,947
	400	metallic	$3 \times 2 \times 450 \text{ OIAI}$ $- 2 \times 160/95 \text{ OIAI}$	1	0,034	0,138	0,326	0,473	2,07	3,304	4,725
	400 d.c.	metallic	$2 \times 3 (2 \times 450 \text{ OIAI})$ $+ 160/95 \text{ OIAI}$	2	0,017	0,134	0,166	0,762	4,373	0,828	3,422
			$2 \times 3 (3 \times 300 \text{ OIAI})$ $\div 160/95 \text{ OIAI}$	2	0,017	0,134	0,155	0,744	4,80	7,64	3,69

SCHEME HOMOPOLARE PENTRU LINII ELECTRICE AERIENE

Nr. crt.	Tipul liniei	Schema echivalentă homopolară	Relații de calcul ale elementelor schemei echivalente	Valori aproximative
1			$a = X_1$	-Linii fără conductor de protecție: $X_1 = 3,5 \cdot X_0$ -Linii cu conductor de protecție Ol: $X_1 = 3 \cdot X_0$ -Linii cu conductor de protecție OLAI: $X_1 = 2 \cdot X_0$
2			$a = X_1$	-Linii fără conductor de protecție: $X_1 = 5,5 \cdot X_0$ -Linii cu conductor de protecție Ol: $X_1 = 4,7 \cdot X_0$ -Linii cu conductor de protecție OLAI: $X_1 = 3 \cdot X_0$
3			$a = k \cdot X_{m1}$ $b = (1-k) \cdot X_{m1}$ $c = X_1 \cdot X_{m1}$ $d = k \cdot (X_1 \cdot X_{m1})$ $e = (1-k) \cdot (X_1 \cdot X_{m1})$	-Linii cu conductor de protecție Ol: $X_{m1} = 1,7 \cdot X_0$ $X_1 \cdot X_{m1} = 1,3 \cdot X_0$
4			$a = X_{m1}$ $b = c = X_1 \cdot X_{m1}$	Idem
5			$a = k \cdot X_{m1}$ $b = X_1 \cdot X_{m1}$ $c = k \cdot (X_1 \cdot X_{m1})$ $d = (1-k) \cdot (X_1 \cdot X_{m1})$ $e = (1-k) \cdot X_{m1}$ $e = (1-k) \cdot (X_1 \cdot X_{m1})$	Idem

Nr. crt.	Tipul liniei	Schema echivalentă homopolară	Relații de calcul ale elementelor schemei echivalente	Valori aproximative
6			$a = X_{mb}$ $b = c = (X_b - X_{max})/l$ $d = X_{mb}$ $e = f = (X_b - X_{max})/n$ $g = X_{mb}$ $h = i = (X_b - X_{max})/m$	-Linii cu conductor de protecție OL: $X_{mb} = 1,7 \cdot X_d$ $X_b - X_{mb} = 1,3 \cdot X_d$
7			$a = X_{mb}$ $b = c = (X_b - X_{max})/l$ $d = X_{mb}$ $e = f = (X_b - X_{max})/n$ $g = X_{mb}$	Idem
8			$a = X_{mb}$ $b = c = (X_b - X_{max})/l$ $d = X_{mb}$ $e = f = (X_b - X_{max})/n$ $g = X_{mb}$ $h = i = (X_b - X_{max})/m$	Idem
9			$a = X_{mb}$ $b = c = (X_b - X_{max})/l$ $d = X_{mb}$ $e = f = (X_b - X_{max})/n$ $g = X_{mb}$ $h = i = (X_b - X_{max})/m$ $j = X_{mb}$ $k = X_{mb}$	Idem
10			$a = \frac{X_b^2 - X_{mb}^2}{X_b}$ $b = -c = \frac{X_b^2 - X_{mb}^2}{X_b}$	-Linii cu conductor de protecție OL: $X_{mb} = 1,7 \cdot X_d$ $X_b = 3 \cdot X_d$

VALORILE MEDII ALE PARAMETRILOR CARACTERISTICI PENTRU ELEMENTELE
CE INTERVIN ÎN SCHEMA DE SUCCESIUNE DIRECTĂ

A. GENERATOARE

Elementul	Valoarea reacției (%)		
	x'_d	x''_d	x_d
Turbogeneratoare: ≤ 25 MW	12,5	19	170
30+100 MW	14,5	22	165
100+300 MW	19,5	27	165
Hidrogeneratoare: cu inf. de amortizare	20,0	35	115
fără inf. de amortizare	27,0	27	115
Compensatoare și motoare sincrone	20,0	35	160

B. TRANSFORMATOARE

cu două înfășurări:	U_k	x_k	x''_k	x'_k
6+20 kV	4+6	—	—	—
35 kV	7,5	—	—	—
110 kV	10,5	—	—	—
220 kV	10,5	—	—	—

C. LINII AERIENE

Tensiunea (kV)	Secțiunea (mm ²)	R (Ω /km)	X (Ω /km)	$Y_c \times 10^{-6}$ (S/km)
110	3×150 OIAI	0,198	0,4	2,8
	3×185 OIAI	0,160	0,4	2,84
	3×240 OIAI	0,124	0,4	2,9
	3×300 OIAI	0,100	0,4	2,97
	3×450 OIAI	0,071	0,42	2,9
220	3×400 OIAI	0,078	0,41	2,7
	3×450 OIAI	0,071	0,42	2,9
400	3 (2×450) OIAI	0,0325	0,334	3,465

D. CABLURI DE ÎNALTĂ TENSIUNE

Tensiunea (kV)	Secțiunea (mm ²)	R (Ω/km)	X (Ω/km)	Y _C × 10 ⁻⁴ (S/km)
110	3 x 170 Cu Pirelli	0,135	0,22	103,6
	3 x 240 Cu	0,078	0,19	-
	3 x 300 Cu	0,062	0,18	-
	3 x 400 Cu Pirelli	0,063	0,11	-
	3 x 400	0,05	0,17	122,0
	3 x 400 (Cu Anglia)	0,04483	0,093	127,0
	3 x 500 Al	0,0605	0,095	163,0
	3 x 750 Pirelli	0,0392	-	-

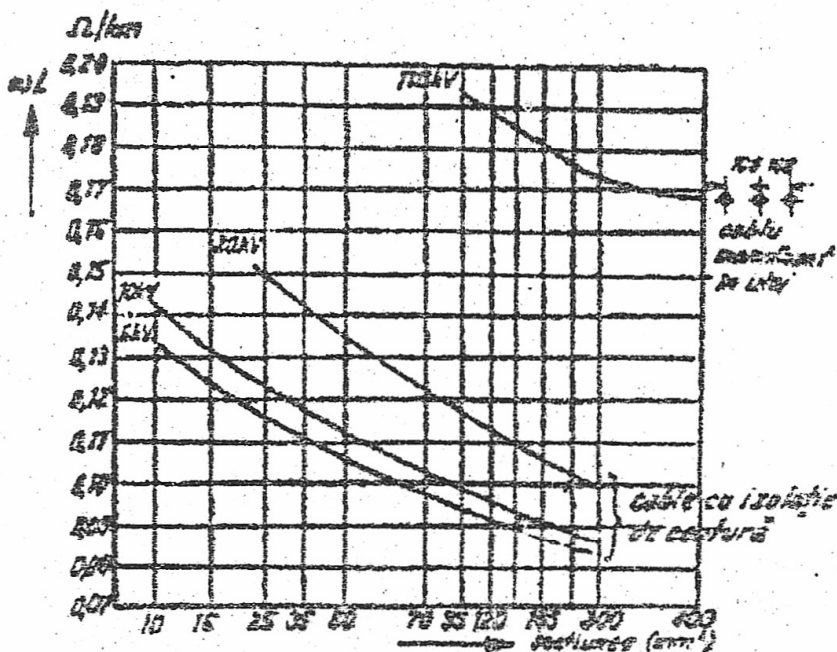
E. CABLURI DE MEDIE TENSIUNE (6, 10 și 20 kV) ÎN MANTA

Secțiunea (mm ²)	R (Ω/km)		X (Ω/km)		
	Cu	Al	6 kV	10 kV	20 kV
3 x 95	0,188	0,306	0,093	0,098	0,117
3 x 120	0,149	0,241	0,091	0,095	0,112
3 x 150	0,119	0,194	0,088	0,092	0,109
3 x 185	0,097	0,155	0,086	0,090	0,106

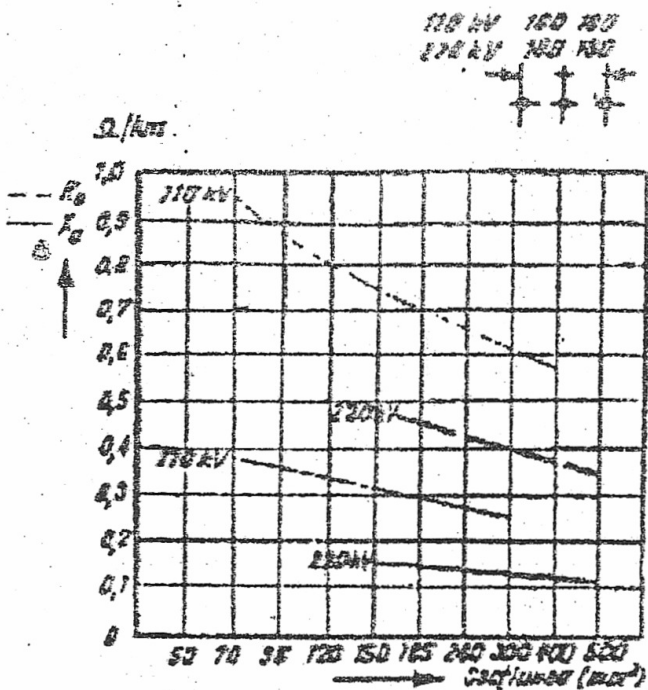
VALORILE MEDII PENTRU PARAMETRII CARACTERISTICI
AI CABLURILOR DE 6 : 220 kV

Secțiune mm ²	Cu	Al
10	1,79	3,03
16	1,121	1,90
25	0,722	1,22
35	0,518	0,874
50	0,366	0,615
70	0,265	0,443
95	0,200	0,331
120	0,167	0,265
150	0,131	0,214
185	0,103	0,176
240	0,087	0,138
300	0,072	0,113

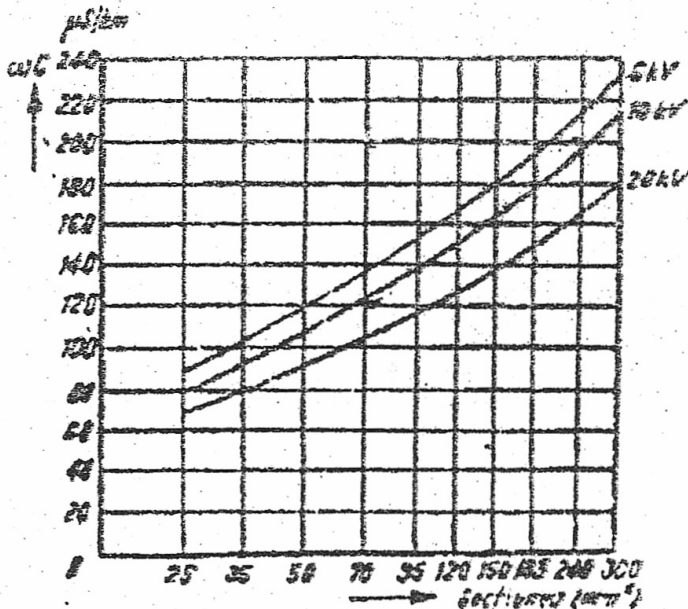
REZISTENȚA CONDUCTOARELOR
DE CU ȘI AL LA 20° C ÎN Ω/km



REACTANȚA INDUCTIVĂ



REACTANȚA INDUCTIVĂ HOMOPOLARĂ
A CABLURILOR CU ULEI 110, 220 kV



SUSCEPTANȚA CAPACITIVĂ DIRECTĂ
(DE FUNCȚIONARE)

TABELE DE DECREMENT ALE MULTIPLULUI CURENTULUI NOMINAL $(K = \frac{I}{I_N})$

$$(I''_K = K_0 I_N; I_0 = K_{0,1} I_N; I_K = K_{\infty} I_N)$$

o) Turbogeneratoare cu reglaj automat al tensiunii									
X este	0	0,1	0,2	∞	X este	0	0,1	0,2	∞
0,1	11.	6,84	5,9	2,59	0,5	2,02	1,75	1,66	1,83
0,11	10	6,3	5,43	2,83	0,51	1,99	1,71	1,63	1,81
0,12	8,5	5,75	5,1	2,5	0,52	1,93	1,69	1,6	1,79
0,13	8	5,5	4,8	2,79	0,53	1,9	1,66	1,58	1,775
0,14	7,4	5,23	4,6	2,75	0,54	1,87	1,63	1,53	1,76
0,15	6,8	5	4,35	2,71	0,55	1,82	1,5	1,52	1,73
0,16	6,4	4,82	4,2	2,68	0,56	1,78	1,57	1,5	1,71
0,17	6	4,55	4	2,62	0,57	1,73	1,53	1,49	1,695
0,18	5,6	4,35	3,8	2,6	0,58	1,71	1,52	1,46	1,69
0,19	5,4	4,25	3,7	2,59	0,59	1,69	1,5	1,43	1,665
0,2	5	4	3,5	2,57	0,6	1,67	1,48	1,42	1,66
0,21	4,8	3,85	3,35	2,53	0,61	1,63	1,46	1,40	1,63
0,22	4,6	3,7	3,25	2,5	0,62	1,6	1,44	1,39	1,61
0,23	4,3	3,52	3,13	2,49	0,63	1,58	1,42	1,37	1,60
0,24	4,1	3,4	3,	2,46	0,64	1,54	1,40	1,35	1,59
0,25	3,95	3,29	2,97	2,43	0,65	1,53	1,39	1,33	1,575
0,26	3,86	3,2	2,91	2,41	0,66	1,5	1,37	1,31	1,565
0,27	3,75	3,1	2,82	2,39	0,67	1,49	1,35	1,30	1,535
0,28	3,6	2,98	2,72	2,38	0,68	1,48	1,33	1,28	1,52
0,29	3,48	2,9	2,64	2,35	0,69	1,45	1,31	1,27	1,515
0,3	3,36	2,77	2,56	2,3	0,7	1,43	1,30	1,26	1,5
0,31	3,22	2,68	2,5	2,28	0,71	1,41	1,28	1,24	1,49
0,32	3,13	2,61	2,42	2,26	0,72	1,395	1,26	1,22	1,475
0,33	3,02	2,54	2,38	2,22	0,73	1,38	1,25	1,20	1,465
0,34	2,97	2,49	2,3	2,2	0,74	1,37	1,23	1,19	1,43
0,35	2,9	2,43	2,25	2,18	0,75	1,35	1,22	1,18	1,435
0,36	2,81	2,38	2,2	2,16	0,76	1,33	1,20	1,17	1,42
0,37	2,75	2,32	2,18	2,13	0,77	1,315	1,19	1,16	1,415
0,38	2,7	2,28	2,12	2,1	0,78	1,3	1,18	1,14	1,4
0,39	2,61	2,23	2,08	2,08	0,79	1,29	1,17	1,13	1,395
0,4	2,54	2,17	2,03	2,06	0,8	1,28	1,16	1,11	1,38
0,41	2,48	2,12	1,98	2,02	0,81	1,26	1,14	1,09	1,36
0,42	2,41	2,06	1,93	2	0,82	1,235	1,12	1,08	1,34
0,43	2,35	2,01	1,9	1,95	0,83	1,22	1,11	1,07	1,33
0,44	2,3	1,98	1,86	1,96	0,84	1,205	1,10	1,06	1,32
0,45	2,26	1,93	1,82	1,93	0,85	1,2	1,09	1,05	1,315
0,46	2,19	1,89	1,79	1,9	0,86	1,19	1,08	1,04	1,31
0,47	2,15	1,86	1,75	1,89	0,87	1,17	1,07	1,03	1,295
0,48	2,1	1,82	1,71	1,87	0,88	1,16	1,06	1,02	1,285
0,49	2,05	1,78	1,68	1,85	0,89	1,14	1,04	1,01	1,282

X calc	0	0,1	0,2	∞	X calc	0	0,1	0,2	∞
0,9	1,13	1,03	1	1,27	1,3	0,77	0,72	0,719	0,848
0,91	1,115	1,02	0,99	1,248	1,31	0,763	0,716	0,712	0,842
0,92	1,1	1,01	0,98	1,23	1,32	0,76	0,713	0,707	0,836
0,93	1,08	1,0	0,97	1,225	1,33	0,755	0,709	0,702	0,83
0,94	1,07	0,98	0,96	1,219	1,34	0,75	0,704	0,697	0,824
0,95	1,06	0,97	0,956	1,024	1,35	0,74	0,7	0,694	0,818
0,96	1,05	0,96	0,95	1,198	1,36	0,735	0,695	0,69	0,812
0,97	1,04	0,95	0,945	1,19	1,37	0,73	0,692	0,688	0,805
0,98	1,03	0,94	0,938	1,179	1,38	0,725	0,688	0,684	0,796
0,99	1,02	0,93	0,927	1,168	1,39	0,72	0,684	0,68	0,792
1,0	1	0,92	0,918	1,16	1,4	0,715	0,68	0,676	0,788
1,01	0,995	0,909	0,903	1,148	1,41	0,71	0,676	0,673	0,783
1,02	0,99	0,899	0,895	1,124	1,42	0,705	0,673	0,669	0,778
1,03	0,985	0,892	0,89	1,112	1,43	0,7	0,669	0,663	0,773
1,04	0,98	0,884	0,88	1,1	1,44	0,695	0,663	0,658	0,768
1,05	0,97	0,877	0,87	1,088	1,45	0,69	0,658	0,655	0,763
1,06	0,96	0,871	0,869	1,076	1,46	0,685	0,655	0,65	0,758
1,07	0,95	0,865	0,861	1,064	1,47	0,68	0,65	0,644	0,753
1,08	0,94	0,859	0,855	1,052	1,48	0,675	0,644	0,638	0,748
1,09	0,93	0,852	0,848	1,04	1,49	0,67	0,638	0,635	0,742
1,1	0,92	0,845	0,84	1,03	1,5	0,665	0,635	0,63	0,735
1,11	0,9	0,839	0,834	1,02	1,51	0,66	0,63	0,625	0,73
1,12	0,885	0,833	0,83	1,01	1,52	0,658	0,625	0,62	0,725
1,13	0,88	0,826	0,822	1,0	1,53	0,655	0,62	0,616	0,72
1,14	0,87	0,82	0,816	0,99	1,54	0,65	0,616	0,612	0,715
1,15	0,865	0,813	0,81	0,98	1,55	0,648	0,612	0,608	0,71
1,16	0,86	0,806	0,802	0,97	1,56	0,645	0,608	0,604	0,705
1,17	0,85	0,8	0,797	0,96	1,57	0,64	0,604	0,6	0,7
1,18	0,84	0,793	0,79	0,95	1,58	0,635	0,6	0,596	0,698
1,19	0,835	0,787	0,785	0,94	1,59	0,63	0,596	0,592	0,688
1,2	0,83	0,78	0,777	0,935	1,6	0,628	0,592	0,589	0,681
1,21	0,82	0,774	0,77	0,926	1,61	0,625	0,589	0,586	0,677
1,22	0,815	0,768	0,764	0,917	1,62	0,622	0,586	0,581	0,673
1,23	0,81	0,762	0,758	0,908	1,63	0,62	0,581	0,578	0,669
1,24	0,8	0,756	0,751	0,899	1,64	0,615	0,578	0,575	0,665
1,25	0,795	0,75	0,745	0,89	1,65	0,61	0,575	0,572	0,661
1,26	0,79	0,744	0,739	0,882	1,66	0,605	0,572	0,569	0,657
1,27	0,785	0,738	0,734	0,874	1,67	0,6	0,569	0,566	0,653
1,28	0,78	0,732	0,729	0,86	1,68	0,598	0,566	0,563	0,649
1,29	0,775	0,726	0,724	0,856	1,69	0,595	0,563	0,56	0,645

X calc	0	0,1	0,2	∞	X calc	0	0,1	0,2	∞
1,7	0,593	0,56	0,553	0,64	2,1	0,478	0,451	0,453	0,502
1,71	0,59	0,558	0,556	0,636	2,11	0,475	0,455	0,451	0,500
1,72	0,585	0,556	0,552	0,632	2,12	0,473	0,449	0,449	0,498
1,73	0,58	0,552	0,548	0,628	2,13	0,471	0,453	0,447	0,496
1,74	0,575	0,548	0,542	0,624	2,14	0,469	0,447	0,445	0,494
1,75	0,57	0,542	0,538	0,62	2,15	0,466	0,445	0,443	0,492
1,76	0,569	0,538	0,533	0,616	2,16	0,462	0,443	0,441	0,490
1,77	0,564	0,533	0,529	0,612	2,17	0,46	0,441	0,439	0,488
1,78	0,562	0,529	0,525	0,608	2,18	0,458	0,439	0,437	0,486
1,79	0,56	0,525	0,522	0,604	2,19	0,457	0,437	0,435	0,483
1,8	0,558	0,522	0,52	0,6	2,2	0,455	0,435	0,433	0,481
1,81	0,556	0,52	0,518	0,596	2,21	0,453	0,433	0,431	0,479
1,82	0,553	0,518	0,516	0,592	2,22	0,451	0,431	0,429	0,477
1,83	0,55	0,516	0,515	0,588	2,23	0,449	0,429	0,427	0,475
1,84	0,548	0,515	0,513	0,584	2,24	0,447	0,427	0,425	0,473
1,85	0,545	0,513	0,511	0,581	2,25	0,445	0,425	0,423	0,471
1,86	0,54	0,511	0,508	0,577	2,26	0,443	0,423	0,421	0,469
1,87	0,538	0,508	0,505	0,573	2,27	0,441	0,421	0,42	0,467
1,88	0,535	0,505	0,503	0,569	2,28	0,439	0,42	0,418	0,465
1,89	0,532	0,503	0,5	0,565	2,29	0,437	0,419	0,416	0,462
1,9	0,53	0,5	0,498	0,562	2,3	0,435	0,416	0,415	0,459
1,91	0,529	0,498	0,496	0,559	2,31	0,434	0,415	0,414	0,458
1,92	0,528	0,496	0,494	0,555	2,32	0,432	0,414	0,412	0,456
1,93	0,527	0,494	0,492	0,552	2,33	0,43	0,412	0,411	0,454
1,94	0,525	0,492	0,49	0,548	2,34	0,428	0,411	0,41	0,452
1,95	0,522	0,49	0,488	0,545	2,35	0,426	0,41	0,408	0,450
1,96	0,52	0,488	0,486	0,542	2,36	0,424	0,408	0,406	0,448
1,97	0,518	0,486	0,484	0,538	2,37	0,422	0,406	0,404	0,446
1,98	0,515	0,484	0,482	0,534	2,38	0,42	0,404	0,402	0,444
1,99	0,51	0,482	0,48	0,531	2,39	0,418	0,402	0,4	0,442
2,0	0,505	0,48	0,478	0,528	2,4	0,416	0,4	0,399	0,440
2,01	0,502	0,478	0,476	0,525	2,41	0,414	0,399	0,398	0,438
2,02	0,5	0,476	0,473	0,523	2,42	0,412	0,398	0,397	0,437
2,03	0,498	0,473	0,47	0,52	2,43	0,411	0,397	0,396	0,435
2,04	0,494	0,47	0,468	0,518	2,44	0,41	0,396	0,394	0,434
2,05	0,49	0,468	0,465	0,515	2,45	0,408	0,394	0,393	0,432
2,06	0,488	0,465	0,463	0,512	2,46	0,406	0,393	0,392	0,431
2,07	0,484	0,463	0,46	0,509	2,47	0,405	0,392	0,391	0,429
2,08	0,481	0,46	0,458	0,506	2,48	0,404	0,391	0,39	0,427
2,09	0,479	0,458	0,455	0,504	2,49	0,402	0,39	0,388	0,425

X calc	0	0,1	0,2	∞	X calc	0	0,1	0,2	∞
2,5	0,4	0,388	0,387	0,424	2,8	0,366	0,348	0,347	0,378
2,51	0,398	0,387	0,385	0,423	2,81	0,363	0,347	0,346	0,376
2,52	0,397	0,385	0,384	0,421	2,82	0,361	0,346	0,345	0,375
2,53	0,396	0,384	0,382	0,419	2,83	0,359	0,345	0,343	0,374
2,54	0,395	0,382	0,38	0,417	2,84	0,357	0,343	0,341	0,371
2,55	0,394	0,38	0,379	0,415	2,85	0,355	0,341	0,339	0,372
2,56	0,393	0,379	0,377	0,413	2,86	0,352	0,339	0,337	0,369
2,57	0,391	0,377	0,375	0,41	2,87	0,35	0,337	0,335	0,367
2,58	0,389	0,375	0,374	0,409	2,88	0,347	0,335	0,334	0,366
2,59	0,387	0,374	0,372	0,407	2,89	0,344	0,334	0,332	0,364
2,6	0,385	0,372	0,371	0,405					
2,61	0,384	0,371	0,37	0,403					
2,62	0,383	0,37	0,369	0,402					
2,63	0,382	0,369	0,368	0,400	2,9	0,342	0,332	0,331	0,362
2,64	0,381	0,368	0,367	0,399	2,91	0,341	0,331	0,33	0,36
2,65	0,379	0,367	0,366	0,397	2,92	0,34	0,33	0,329	0,358
2,66	0,377	0,366	0,364	0,396	2,93	0,339	0,329	0,328	0,357
2,67	0,375	0,364	0,363	0,394	2,94	0,338	0,328	0,327	0,356
2,68	0,373	0,363	0,362	0,493	2,95	0,337	0,327	0,326	0,355
2,69	0,372	0,362	0,36	0,491	2,96	0,337	0,326	0,325	0,354
2,7	0,371	0,36	0,359	0,39	2,97	0,366	0,325	0,324	0,353
2,71	0,37	0,359	0,358	0,389	2,98	0,335	0,324	0,323	0,352
2,72	0,37	0,358	0,357	0,388	2,99	0,334	0,323	0,322	0,351
2,73	0,369	0,357	0,356	0,386					
2,74	0,369	0,356	0,354	0,385	3,0	0,332	0,332	0,321	0,350
2,75	0,368	0,354	0,353	0,384					
2,76	0,368	0,353	0,352	0,383					
2,77	0,366	0,353	0,351	0,381					
2,78	0,367	0,351	0,349	0,38					
2,79	0,366	0,35	0,348	0,379					

b) Hidrogeneratoare cu reglaj al tensiunii și infăzurări de amortizare

0,2	—	—	—	—	0,3	4,81	3,67	3,43	3,21
0,21	—	—	—	—	0,31	4,6	3,55	3,3	3,17
0,22	—	—	—	—	0,32	4,42	3,45	3,2	3,1
0,23	—	—	—	—	0,33	4,27	3,22	3,12	3,05
0,24	—	—	—	—	0,34	4,08	3,2	3,03	3,0
0,25	6,3	4,37	4,0	3,48	0,35	3,9	3,1	2,93	2,95
0,26	5,9	4,25	3,9	3,42	0,36	3,73	3,0	2,83	2,9
0,27	5,6	4,1	3,8	3,39	0,37	3,6	2,92	2,76	2,86
0,28	5,35	3,97	3,7	3,32	0,38	3,49	2,81	2,7	2,82
0,29	5,12	3,81	3,52	3,28	0,39	3,39	2,76	2,62	2,78

X scale	0	0,1	0,2	∞	X scale	0	0,1	0,2	∞
0,4	3,25	2,69	2,53	2,74	0,6	1,405	1,3	1,27	1,45
0,41	3,15	2,61	2,48	2,7	0,61	1,39	1,29	1,25	1,585
0,42	3,05	2,52	2,41	2,65	0,62	1,375	1,28	1,235	1,57
0,43	2,93	2,43	2,37	2,6	0,63	1,36	1,255	1,22	1,55
0,44	2,87	2,42	2,32	2,55	0,64	1,33	1,245	1,205	1,53
0,45	2,79	2,33	2,27	2,51	0,65	1,303	1,22	1,19	1,515
0,46	2,72	2,31	2,22	2,485	0,66	1,295	1,203	1,18	1,495
0,47	2,65	2,27	2,18	2,46	0,67	1,28	1,198	1,17	1,48
0,48	2,6	2,22	2,13	2,425	0,68	1,27	1,18	1,16	1,47
0,49	2,51	2,16	2,08	2,39	0,69	1,255	1,17	1,15	1,46
0,5	2,45	2,11	2,04	2,36	0,9	1,235	1,155	1,135	1,145
0,51	2,4	2,08	2,01	2,32	0,91	1,22	1,145	1,12	1,425
0,52	2,36	2,03	1,97	2,3	0,92	1,203	1,135	1,1	1,41
0,53	2,3	2,0	1,93	2,27	0,93	1,195	1,12	1,09	1,4
0,54	2,24	1,97	1,9	2,235	0,94	1,17	1,105	1,08	1,39
0,55	2,19	1,91	1,86	2,2	0,95	1,16	1,09	1,065	1,37
0,56	2,13	1,875	1,81	2,18	0,96	1,145	1,08	1,05	1,36
0,57	2,1	1,83	1,78	2,14	0,97	1,13	1,07	1,04	1,34
0,58	2,06	1,8	1,745	2,12	0,98	1,12	1,06	1,03	1,325
0,59	2,015	1,77	1,72	2,09	0,99	1,105	1,04	1,02	1,31
0,6	1,97	1,74	1,69	2,06	1,0	1,098	1,03	1,01	1,3
0,61	1,93	1,71	1,67	2,03	1,01	1,088	1,021	1,001	1,29
0,62	1,88	1,68	1,63	2,0	1,02	1,078	1,012	0,992	1,28
0,63	1,85	1,65	1,61	1,99	1,03	1,065	1,003	0,983	1,27
0,64	1,82	1,62	1,59	1,96	1,04	1,054	0,994	0,974	1,26
0,65	1,785	1,59	1,56	1,92	1,05	1,044	0,985	0,965	1,25
0,66	1,75	1,57	1,53	1,895	1,06	1,033	0,976	0,956	1,24
0,67	1,72	1,54	1,505	1,88	1,07	1,023	0,967	0,947	1,23
0,68	1,69	1,52	1,495	1,85	1,08	1,011	0,958	0,938	1,22
0,69	1,665	1,5	1,48	1,82	1,09	1,0	0,949	0,929	1,21
0,7	1,63	1,48	1,455	1,8	1,1	0,99	0,94	0,92	1,2
0,71	1,6	1,46	1,435	1,785	1,11	0,982	0,932	0,911	1,188
0,72	1,585	1,44	1,41	1,735	1,12	0,974	0,925	0,903	1,173
0,73	1,56	1,425	1,395	1,72	1,13	0,966	0,917	0,895	1,164
0,74	1,525	1,405	1,38	1,775	1,14	0,958	0,91	0,886	1,152
0,75	1,5	1,39	1,36	1,695	1,15	0,95	0,902	0,877	1,14
0,76	1,485	1,37	1,335	1,68	1,16	0,942	0,895	0,869	1,128
0,77	1,47	1,35	1,32	1,66	1,17	0,934	0,887	0,86	1,116
0,78	1,45	1,33	1,3	1,64	1,18	0,926	0,88	0,852	1,104
0,79	1,425	1,31	1,285	1,62	1,19	0,918	0,872	0,843	1,092

X calc	0	0,1	0,2	∞	X calc	0	0,1	0,2	∞
1,2	0,91	0,865	0,835	1,08	1,6	0,655	0,655	0,635	0,75
1,21	0,902	0,859	0,828	1,068	1,61	0,661	0,652	0,631	0,745
1,22	0,894	0,853	0,821	1,058	1,62	0,657	0,648	0,627	0,74
1,23	0,886	0,847	0,815	1,048	1,63	0,652	0,644	0,623	0,735
1,24	0,878	0,841	0,809	1,03	1,64	0,648	0,64	0,619	0,73
1,25	0,87	0,835	0,802	1,018	1,65	0,643	0,637	0,615	0,725
1,26	0,862	0,829	0,795	1,008	1,66	0,639	0,634	0,611	0,72
1,27	0,854	0,823	0,789	0,993	1,67	0,634	0,63	0,607	0,715
1,28	0,846	0,817	0,783	0,98	1,68	0,63	0,627	0,603	0,71
1,29	0,838	0,811	0,776	0,968	1,69	0,625	0,623	0,599	0,705
1,3	0,832	0,806	0,77	0,955	1,7	0,621	0,62	0,595	0,7
1,31	0,826	0,798	0,765	0,945	1,71	0,618	0,616	0,591	0,696
1,32	0,819	0,792	0,76	0,938	1,72	0,614	0,612	0,588	0,692
1,33	0,812	0,785	0,755	0,929	1,73	0,610	0,609	0,584	0,688
1,34	0,806	0,78	0,75	0,921	1,74	0,606	0,606	0,581	0,684
1,35	0,798	0,774	0,745	0,912	1,75	0,602	0,602	0,577	0,68
1,36	0,791	0,768	0,74	0,904	1,76	0,598	0,599	0,574	0,676
1,37	0,784	0,762	0,735	0,895	1,77	0,594	0,595	0,57	0,672
1,38	0,777	0,756	0,73	0,887	1,78	0,59	0,592	0,567	0,668
1,39	0,77	0,751	0,725	0,878	1,79	0,586	0,588	0,563	0,664
1,4	0,763	0,745	0,72	0,87	1,8	0,582	0,595	0,56	0,66
1,41	0,758	0,74	0,715	0,863	1,81	0,579	0,582	0,557	0,654
1,42	0,752	0,735	0,711	0,857	1,82	0,576	0,579	0,554	0,649
1,43	0,746	0,73	0,706	0,85	1,83	0,573	0,576	0,551	0,643
1,44	0,741	0,725	0,702	0,844	1,84	0,57	0,572	0,548	0,638
1,45	0,736	0,72	0,697	0,837	1,85	0,567	0,569	0,545	0,632
1,46	0,731	0,716	0,693	0,831	1,86	0,564	0,566	0,542	0,627
1,47	0,726	0,712	0,688	0,824	1,87	0,562	0,563	0,539	0,621
1,48	0,721	0,708	0,684	0,818	1,88	0,56	0,56	0,536	0,616
1,49	0,715	0,705	0,679	0,811	1,89	0,557	0,557	0,533	0,611
1,5	0,71	0,704	0,675	0,805	1,9	0,555	0,555	0,53	0,605
1,51	0,705	0,7	0,671	0,803	1,91	0,553	0,553	0,528	0,603
1,52	0,699	0,695	0,667	0,795	1,92	0,55	0,55	0,525	0,601
1,53	0,694	0,69	0,663	0,789	1,93	0,547	0,547	0,522	0,599
1,54	0,692	0,685	0,659	0,78	1,94	0,543	0,543	0,52	0,597
1,55	0,687	0,68	0,655	0,778	1,95	0,54	0,54	0,517	0,595
1,56	0,683	0,685	0,651	0,772	1,96	0,537	0,537	0,515	0,593
1,57	0,678	0,67	0,647	0,767	1,97	0,534	0,534	0,512	0,591
1,58	0,674	0,665	0,643	0,761	1,98	0,531	0,531	0,51	0,589
1,59	0,669	0,66	0,639	0,756	1,99	0,528	0,528	0,507	0,587

X calc	0	0.1	0.2	0.3	K calc	0	0.1	0.2	0.3
2.0	0.525	0.525	0.505	0.585	2.40	0.434	0.404	0.42	0.47
2.01	0.522	0.523	0.503	0.581	2.41	0.432	0.403	0.416	0.468
2.02	0.519	0.521	0.501	0.577	2.42	0.429	0.403	0.417	0.466
2.03	0.517	0.519	0.499	0.574	2.43	0.428	0.406	0.415	0.464
2.04	0.514	0.517	0.495	0.573	2.44	0.426	0.404	0.414	0.462
2.05	0.511	0.515	0.492	0.57	2.45	0.425	0.403	0.413	0.461
2.06	0.509	0.513	0.489	0.567	2.46	0.423	0.401	0.411	0.458
2.07	0.506	0.511	0.486	0.564	2.47	0.422	0.429	0.41	0.456
2.08	0.503	0.509	0.483	0.561	2.48	0.421	0.428	0.408	0.454
2.09	0.5	0.507	0.48	0.558	2.49	0.42	0.426	0.406	0.452
2.1	0.496	0.505	0.478	0.555	2.5	0.418	0.425	0.405	0.45
2.11	0.495	0.501	0.476	0.552	2.51	0.416	0.423	0.403	0.448
2.12	0.493	0.497	0.474	0.549	2.52	0.414	0.421	0.401	0.446
2.13	0.491	0.494	0.472	0.546	2.53	0.412	0.419	0.399	0.444
2.14	0.488	0.492	0.47	0.543	2.54	0.411	0.417	0.397	0.442
2.15	0.486	0.489	0.468	0.54	2.55	0.41	0.416	0.395	0.44
2.16	0.484	0.488	0.466	0.537	2.56	0.408	0.414	0.394	0.438
2.17	0.482	0.486	0.464	0.534	2.57	0.406	0.412	0.392	0.436
2.18	0.479	0.484	0.462	0.531	2.58	0.404	0.41	0.39	0.434
2.19	0.477	0.482	0.46	0.528	2.59	0.402	0.409	0.389	0.432
2.2	0.475	0.48	0.458	0.525	2.6	0.4	0.406	0.387	0.43
2.21	0.472	0.478	0.456	0.523	2.61	0.398	0.407	0.385	0.428
2.22	0.47	0.476	0.454	0.52	2.62	0.396	0.402	0.384	0.426
2.23	0.468	0.474	0.452	0.517	2.63	0.394	0.4	0.383	0.424
2.24	0.466	0.472	0.45	0.513	2.64	0.392	0.399	0.381	0.422
2.25	0.464	0.47	0.448	0.51	2.65	0.39	0.397	0.38	0.421
2.26	0.462	0.468	0.446	0.507	2.66	0.388	0.396	0.378	0.419
2.27	0.459	0.466	0.444	0.504	2.67	0.386	0.394	0.377	0.417
2.28	0.457	0.464	0.442	0.501	2.68	0.385	0.393	0.375	0.416
2.29	0.455	0.462	0.44	0.498	2.69	0.383	0.391	0.374	0.414
2.3	0.453	0.46	0.438	0.495	2.7	0.383	0.39	0.372	0.413
2.31	0.451	0.458	0.436	0.492	2.71	0.381	0.389	0.37	0.411
2.32	0.449	0.456	0.434	0.489	2.72	0.38	0.388	0.368	0.409
2.33	0.447	0.454	0.432	0.487	2.73	0.378	0.387	0.367	0.407
2.34	0.445	0.452	0.43	0.484	2.74	0.377	0.385	0.365	0.405
2.35	0.443	0.45	0.429	0.482	2.75	0.375	0.383	0.365	0.403
2.36	0.441	0.448	0.427	0.479	2.76	0.374	0.381	0.364	0.401
2.37	0.439	0.446	0.425	0.477	2.77	0.372	0.38	0.362	0.4
2.38	0.437	0.444	0.423	0.475	2.78	0.371	0.379	0.361	0.399
2.39	0.435	0.442	0.421	0.472	2.79	0.37	0.378	0.36	0.397

Anexa 13 (continuare)

X calc	0	0,1	0,2	∞	X calc	0	0,1	0,2	∞
2,8	0,368	0,377	0,359	0,396	2,9	0,352	0,363	0,345	0,38
2,81	0,366	0,376	0,356	0,394	2,91	0,351	0,362	0,344	0,378
2,82	0,365	0,375	0,354	0,392	2,92	0,35	0,36	0,343	0,377
2,83	0,364	0,374	0,353	0,39	2,93	0,349	0,358	0,342	0,376
2,84	0,362	0,372	0,352	0,389	2,94	0,348	0,357	0,341	0,375
2,85	0,361	0,371	0,35	0,387	2,95	0,347	0,356	0,34	0,374
2,86	0,359	0,369	0,349	0,386	2,96	0,346	0,355	0,339	0,373
2,87	0,357	0,368	0,348	0,384	2,97	0,345	0,354	0,338	0,372
2,88	0,355	0,366	0,347	0,383	2,98	0,344	0,353	0,357	0,37
2,89	0,353	0,365	0,346	0,381	2,99	0,343	0,351	0,336	0,369
					3,0	0,342	0,35	0,335	0,368

CALCULUL CURENȚILOR DE SCURTCIRCUIT ÎNTR-O REȚEA DE ÎNALTĂ TENSIUNE (SURSA DEPARTE DE LOCUL DE SCURTCIRCUIT)

În figura A.1 se prezintă schema rețelei de înaltă tensiune pentru calculul curentului de scurtcircuit trifazat în punctele K_1 , K_2 și K_3 . În tabelul A.1 sunt prezentați parametrii elementelor acestei scheme.

În figura A.2 este reprezentată schema de secvență directă a rețelei pentru calculul scurtcircuitului în punctul K_1 .

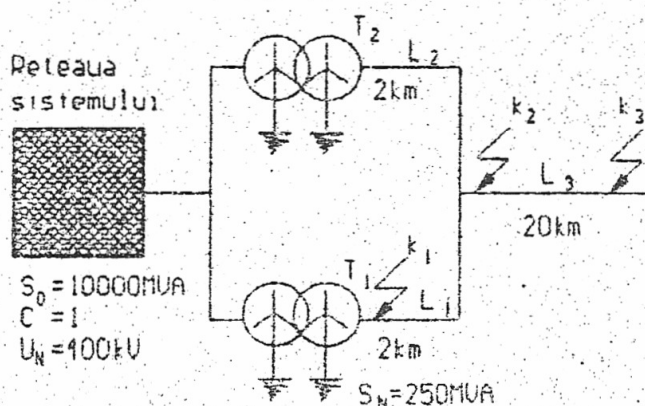


Fig. A.1. Schema unei rețele de ÎT. Calculul scurtcircuitului în punctele K_1 , K_2 , K_3 .

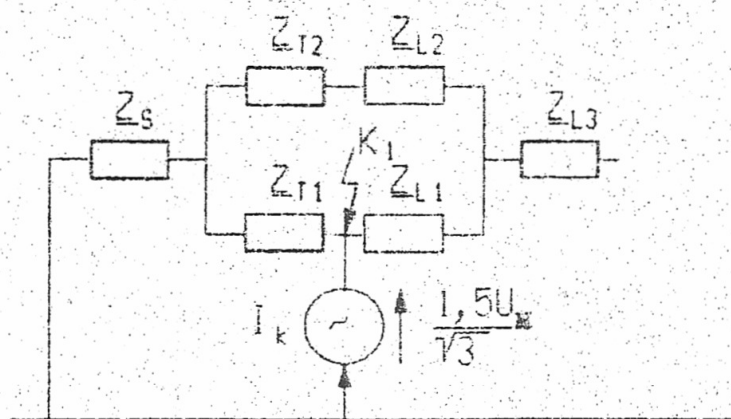


Fig. A.2. Schema de secvență directă pentru scurtcircuit în punctul K_1 .

Scurtcircuit în punctul K_1

Curentul de scurtcircuit trifazat la $t = 0$ pentru $c = 1,1$ este:

$$I''_k = \frac{c U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_k}$$

$$Z_{k1} = Z_s + \frac{Z_{T1}(Z_{T2} + Z_{L1} + Z_{L2})}{2Z_{T1} + Z_{L1} + Z_{L2}} = (0,34 + j 5,72) \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k1} = \frac{1,1 \cdot 110}{\sqrt{3} \sqrt{0,34^2 + 5,72^2}} = \frac{1,1 \cdot 110}{\sqrt{3} \cdot 5,73} = 12,21 \text{ kA}$$

Calculul curentului de șoc

Deoarece calculul lui Z_k în complex este laborios, se preferă metoda uzuală a raportului impedanței determinat pe ansamblul rețelei sau, pentru mai multă acuratețe, metoda frecvenței echivalente.

- *Metoda raportului impedanței la locul de scurtcircuit*

Pentru o impedanță de scurtcircuit $Z_k = R_k + j \cdot X_k$ se calculează raportul:

$$\frac{R_k}{X_k} = \frac{0,34}{5,72} = 0,059$$

Din curba $\chi = f(R/X)$, (fig. 5), rezultă $\chi_b = 1,92$.

Se verifică $1,15 \cdot 1,92 = 2,2 > 2$, deci se ia valoarea 2.

$$I_{\text{șoc}} = 1,15 \cdot \chi_b \cdot \sqrt{2} \cdot I''_k = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 12,19 = 34,48 \text{ kA}$$

Valoarea se confirmă și pentru determinarea ca sumă a aporturilor pe ramuri.

- *Metoda frecvenței echivalente de 20 Hz*

Impedanța Z_k calculată mai sus este echivalentă unei surse cu $f = 50$ Hz.

Calculul impedanței corespunzătoare unei surse de 20 Hz se face în mod similar. Se obține:

$$Z_{sc} = (0,12 + j 0,48) \Omega$$

$$Z_{L1c} = (0,32 + j 0,34) \Omega' = Z_{L2c}$$

$$Z_{kc} = Z_{sc} + \frac{Z_{Tc}(Z_{Tc} + Z_{L1c} + Z_{L2c})}{2Z_{Tc} + Z_{L1c} + Z_{L2c}} = 0,335 + j 2,29$$

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \cdot \frac{f_c}{f_n} = \frac{0,335}{2,29} \cdot \frac{20}{50} = 0,0585$$

Din curba $\chi = f(R/X)$, rezultă: $\chi_{bc} = 1,93$.

Se verifică: $1,15 \cdot 1,93 = 2,22 > 2$, deci se ia valoarea 2.

$$I_{\text{șoc}} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 12,19 = 34,48 \text{ kA.}$$

Curentul de rupere și curentul de scurtcircuit stabilizat la scurtcircuit trifazat în orice punct nu trebuie calculați, întrucât sunt egali cu componenta inițială a curentului de scurtcircuit și cu I''_k .

Scurtcircuit trifazat în punctul K_2 :

$$Z_{k2} = Z_s + \frac{Z_T + Z_{L1}}{2} = 0,37 + j5,75 \Omega$$

$$I''_{k2} = \frac{c U_N}{\sqrt{3} Z_{k2}} = \frac{1,1 \cdot 110}{\sqrt{3} \sqrt{0,37^2 + 5,75^2}} = \frac{1,1 \cdot 110}{\sqrt{3} \cdot 5,75} = 12,14 \text{ kA}$$

Calculul curentului de șoc

- *Metoda raportului impedanței la locul de scurtcircuit:*

$$\frac{R}{X} = \frac{0,37}{5,75} = 0,064, \text{ rezultă } \chi_b = 1,92$$

Se verifică $1,92 \cdot 1,15 = 2,2 > 2$, deci se ia valoarea 2:

$$I_{\text{șoc}} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 12,12 = 34,28 \text{ kA.}$$

- *Metoda frecvenței echivalente:*

$$Z_c = (0,356 + j2,3) \Omega$$

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \cdot \frac{f_c}{f_n} = \frac{0,365}{2,3} \cdot \frac{20}{50} = 0,064, \text{ rezultă } \chi_b = 1,92$$

$$I_{\text{șoc}} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 12,12 = 34,28 \text{ kA.}$$

Raportul R/X între ramuri este același:

$$\frac{R_T + R_{L1}}{X_T + X_{L1}} = \frac{0,17 + 0,32}{3,29 + 0,34} = 0,258$$

și valoarea totală obținută este aceeași cu cea determinată prin impedanța echivalentă:

Scurtcircuit trifazat în punctul K_3 :

$$Z_{k3} = Z_s + \frac{Z_T + Z_{L1}}{2} + Z_{L3} = 3,52 + j 14,22$$

$$I''_{k3} = \frac{c U_N}{\sqrt{3} Z_{K3}} = \frac{1,1 \cdot 110}{\sqrt{3} \sqrt{3,52^2 + 14,22^2}} = \frac{1,1 \cdot 110}{\sqrt{3} 14,65} \approx 4,7 \text{ kA}$$

Calculul curentului de șoc

- *Metoda raportului impedanței la locul de scurtcircuit:*

$$\frac{R}{X} = \frac{3,52}{14,22} = 0,248, \text{ rezultă } \chi_b = 1,48$$

Se verifică: $1,15 \cdot 1,48 = 1,4 < 2$, deci se mențin valorile:

$$I_{\text{șoc}} = 1,15 \cdot 1,48 \cdot \sqrt{2} \cdot 4,77 = 11,48 \text{ kA.}$$

- *Metoda frecvenței echivalente:*

$$Z_c = (3,52 + j 5,69) \Omega$$

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \cdot \frac{f_c}{f_n} = \frac{3,52}{5,69} \cdot \frac{20}{50} = 0,248, \text{ rezultă } \chi_b = 1,48$$

$$I_{\text{șoc}} = 1,15 \cdot 1,48 \cdot \sqrt{2} \cdot 4,77 = 11,48 \text{ kA.}$$

Calculul curenților de scurtcircuit I''_k și $I_{\text{șoc}}$ pentru un scurtcircuit monofazat în punctele K_1, K_2, K_3

Scurtcircuit în punctul K_1

Schemele echivalente de secvență directă, inversă și homopolară, pentru un scurtcircuit în punctul K_1 pentru un scurtcircuit monofazat, sunt prezentate în figura A.3.

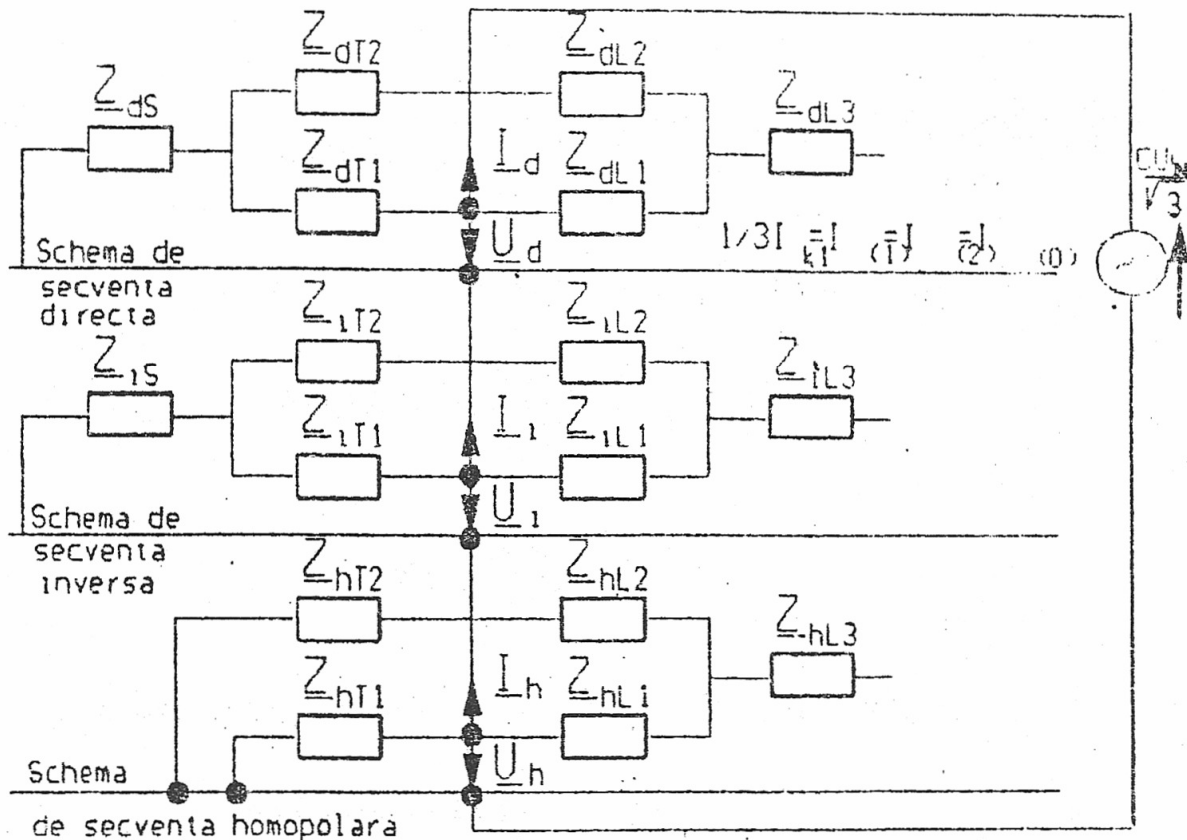


Fig. A.3. Schemele echivalente de secvență directă, inversă și homopolară pentru un scurtcircuit în punctul K_1 :

$$Z_h = \frac{Z_{hT}(Z_{hT} + Z_{hL1} + Z_{hL2})}{2Z_{hT} + Z_{hL1} + Z_{hL2}} = (0,3 + 4,83) \Omega$$

$$Z_d = Z_i = 0,34 + j 5,72$$

$$Z_d + Z_i + Z_h = 2(0,34 + j 5,72) + 0,3 + j 4,83 = 0,98 + j 16,27$$

$$I_{k1}^{(1)} = \frac{\sqrt{3} U_N}{|2Z_d + Z_h|} = \frac{\sqrt{3} \cdot 11 \cdot 110}{\sqrt{0,98^2 + 16,27^2}} = 12,86 \text{ kA}$$

$$\frac{I_{k1}^{(1)}}{I_{k1}^{(3)}} = \frac{12,86}{12,21} = 1,05, \text{ ceea ce se explică prin: } \frac{|Z_h|}{|Z_d|} < 1$$

Curentul de șoc se calculează cu aceeași valoare a lui χ (1,92), ca și la scurtcircuitul trifazat:

$$I_{\text{șoc}} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 12,86 = 36,37 \text{ kA}$$

Scurtcircuit monofazat în punctul K₂:

$$Z_d = Z_1 = (0,37 + j 5,75) \Omega$$

$$Z_h = \frac{Z_T + Z_{L1}}{2} = (0,4 + j 4,96) \Omega$$

$$Z_{k2} = 2(0,37 + j 5,75) + (0,4 + j 4,96) = 1,14 + j 16,46$$

$$I_{k2}^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 110}{\sqrt{1,14^2 + 16,46^2}} = 12,73 \text{ kA}$$

$$\frac{I_{k1}^{(1)}}{I_{k2}^{(3)}} = \frac{12,73}{12,12} = 1,05$$

$\chi_b = 1,92$ cu $1,15 \cdot 1,92 = 2,2 > 2$, deci se ia valoarea 2.

$$I_{soc} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 12,73 = 36,01 \text{ kA.}$$

Scurtcircuit monofazat în punctul K₃:

$$Z_h = \frac{Z_T + Z_{L1}}{2} + Z_{L3} = (9,85 + j 30,31) \Omega$$

$$Z_d = Z_1 = 3,52 + j 14,22$$

$$Z_k = 2(3,52 + j 14,22) + (9,85 + j 30,31) = 16,89 + j 58,75 \Omega$$

$$I_{k3}^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 110}{\sqrt{16,89^2 + 58,75^2}} = 3,43 \text{ kA}$$

$$\frac{I_{k3}^{(1)}}{I_{k3}^{(3)}} = \frac{3,43}{4,77} = 0,7, \text{ se explică prin } \frac{|Z_h|}{|Z|} > 1$$

$$\chi_b = 1,48$$

$$I_{soc} = 1,15 \cdot 1,48 \cdot \sqrt{2} \cdot 3,43 = 8,26 \text{ kA}$$

Locul de scurtcircuit	$Z_d = Z_i$ [Ω]	Z_h [Ω]	$I_k^{(3)}$ [kA]	I_{soc3} [kA]	$I_k^{(1)}$ [kA]	I_{soc1} [kA]	$I_k^{(1)} / I_k^{(3)}$
K_1	0,34+ j 5,72	0,3+j4,83	12,21	34,48	12,86	36,37	1,05
K_2	0,37+j5,75	0,4+j4,96	12,12	34,28	12,73	36,01	1,05
K_3	3,52+j14,22	9,85+j30,31	4,77	11,48	3,43	8,26	0,72

Calculul parametrilor elementelor schemei din figura A.1

Echipamentul	Datele nominale ale echipamentelor	Datele și ecuațiile pentru calculul lui Z_{d1} și Z_{d2}	$Z_d = Z_i$ [Ω]	Z_h [Ω]
RETEAUA SISTEMULUI	$U_N = 400 \text{ kV}$ $C = 1$ $S_0 = 10000 \text{ MVA}$ $R_S = 0,1 \cdot X_S$ $X_S = 0,995 \cdot Z_S$	$Z_{d1} = \frac{CU_N^2}{S_0} \cdot 1$ $X_{d1} = 0,995 \cdot Z_{d1}$ $R_{d1} = 0,1 \cdot X_{d1}$	$1 \cdot 400^2 = 1$ $Z_{d1} = \frac{10000}{(400/121)^2} = 1,21$ $Z_{d2} = 0,12 + j1,21$	
TRANSFORMATOARE T1, T2	$S_N = 250 \text{ MVA}$ $U_{1T} = 400 \text{ kV}$ $U_{2T} = 121 \text{ kV}$ $u_{sc} = 17\%$ $P_{sc} = 850 \text{ kW}$ D Y _n -5	$X_{d1} = \frac{u_{sc}^2 U_N^2}{100 S_N}$ $R_{d1} = \frac{P_{sc} C}{3I_N^2} = P_{sc} \left(\frac{U_N}{S_N} \right)^2$	$17 \cdot 110^2 = 8,23$ $X_{d1} = \frac{100 \cdot 250}{110} = 250$ $R_{d1} = 850 \cdot \left(\frac{110}{250} \right)^2 = 0,17$ $Z_{d1} = 0,17 + j8,23$	$Z_h = 0,17 + j0,823$
LINII L1, L2	LEA, L = 2 km secțiune 3x185 mm ² fir de gardă de oțel-aluminiu, $Z_0 = 0,1576 + j0,4235$	$Z_{d1,1} = Z_{d1,2} = L \cdot Z_0$ $X_{d1,1} = X_{d1,2} = 2$ $X_{d2,1} = X_{d2,2} = 2$ $R_{d1,1} = R_{d1,2} = 2$ $R_{d2,1} = R_{d2,2} = 2$	$X_{d1,1} = X_{d1,2} = 2 \cdot 0,4235 = 0,847$ $R_{d1,1} = R_{d1,2} = 2 \cdot 0,1576 = 0,315$ $Z_{d1,1} = Z_{d1,2} = 0,315 + j0,847$	$X_{d1,1} = X_{d1,2} = 1,69$ $R_{d1,1} = R_{d1,2} = 0,63$ $Z_{d1,1} = Z_{d1,2} = 0,63 + j1,69$
L3	LEA, L = 20 km secțiune 3x185 mm ² fir de gardă de oțel $Z_0 = 0,1576 + j0,4235$	$Z_{d1,3} = L \cdot Z_0$ $X_{d1,3} = 2$ $X_{d2,3} = 2$ $R_{d1,3} = 2$ $R_{d2,3} = 2$	$X_{d1,3} = 20 \cdot 0,4235 = 8,47$ $R_{d1,3} = 20 \cdot 0,1576 = 3,15$ $Z_{d1,3} = 3,15 + j8,47$	$X_{d1,3} = 25,41$ $R_{d1,3} = 9,45$ $Z_{d1,3} = 9,45 + j25,41$

CALCULUL CURENȚILOR DE SCURT-CIRCUIT ÎNTR-O REȚEA DE MT. INFLUENȚA MOTOARELOR ASINCRONE

În figura A.4 este reprezentată o rețea de MT 20/6 kV. Calculele se efectuează cu și fără influența motoarelor asincrone.

Stația 20/6 kV este echipată cu două transformatoare de 10 MVA fiecare, racordate prin câte două cabluri de 20 kV cu secțiunea $3 \times 240 \text{ mm}^2$.

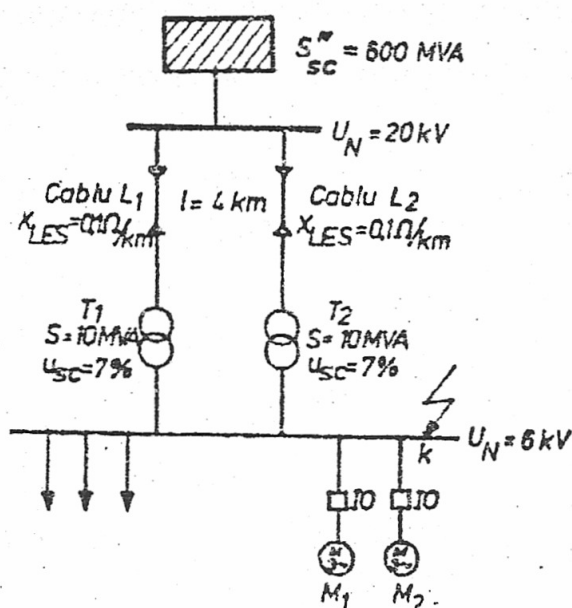


Fig. A.4. Schema unei rețele de medie tensiune cu motoare asincrone racordate la 6 kV.

Deoarece rezistența de scurtcircuit este mică în raport cu reactanța ($R_k < 0,3X_k$), este suficient de exact să se calculeze numai reactanța de scurtcircuit a echipamentelor și reactanța de scurtcircuit X_k la locul de scurtcircuit K.

În continuare se calculează curentul de scurtcircuit I''_k în unități absolute și în unități relative.

Calculul în unități absolute

În tabelul A.3 sunt prezentate reactanțele de scurtcircuit X_k ale elementelor rețelei din figura A.4. Dacă cele două întreruptoare IO_1 și IO_2 sunt deschise, la scurtcircuit în punctul K nu intervine aportul celor două motoare M_1 și M_2 .

Curentul de scurtcircuit trifazat, fără influența motoarelor asincrone M_1 și M_2 , pentru o valoare a lui $c = 1,1$ este calculat cu expresia:

$$I''_k = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3 \cdot 0,232}} = 16,44 \text{ kA.}$$

În concordanță cu calculul curenților de scurtcircuit trifazat alimentat din surse independente (nebuclate), curentul total la locul de defect se obține prin însumarea aporturilor parțiale ale surselor:

$$I''_k = I''_k \text{ (fără motoare)} + I''_{KM1} + I''_{KM2}$$

Tabelul A.3

Calculul în unități absolute al parametrilor elementelor schemei A.4
(fără influența motoarelor M_1 și M_2)

Element de rețea	Formule și calcul	Reactanțe $X[\Omega]$
Aport sistem	$X_s = \frac{c \cdot U_N^2}{S''_{sc}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{U_{IT}}{U_{JT}}\right)^2} =$ $= \frac{1,1 \cdot 20^2}{600} \cdot \frac{1}{(20/6,3)^2} =$	0,073
Cablu L_1	$X_{L1} = X'_{L1} \cdot l \cdot \frac{1}{\left(\frac{U_{IT}}{U_{JT}}\right)^2} =$ $= 0,1 \times 4 \times \frac{1}{(20/6,3)^2} =$	0,04
Transformator T_1	$(X_T - Z_T)$ $X_{T1} = \frac{U_{sc}}{100} \cdot \frac{U_{JT}^2}{S_{T1}} = \frac{7}{100} \cdot \frac{6,3^2}{10} =$	0,278
$L_1 + T_1$	$X_{L1} + X_{T1} = X_{L2} + X_{T2}$	0,318
$(L_1 + T_1) (L_2 + T_2)$ paralel	$\frac{1}{2} (X_{L1} + X_{T1})$	0,159
Reactanța de scurt-circuit	$X_k = X_s + \frac{1}{2} (X_{L1} + X_{T1})$	0,232

• Curenții parțiali de scurtcircuit $I''_{k M1}$ și $I''_{k M2}$ (întreruptoarele sunt închise), respectiv reactanțele de scurtcircuit ale motoarelor, sunt calculate cu formulele:

• *Motorul M1:*

$$Z_{M1} = \frac{1}{I_p / I_N} \frac{U^2_N}{S_N} = \frac{1}{5} \cdot \frac{6^2}{5,303} = 1,3577 \Omega,$$

în care:

$$S_N = \frac{P_N}{\eta \cos \phi} = \frac{4480}{0,88 \times 0,96} = 5303 \text{ kVA} = 5,303 \text{ MVA}$$

• *Motorul M2 (echivalent al celor trei motoare identice):*

$$Z_{M2} = \frac{1}{3} \frac{1}{5,6} \frac{6^2}{1,595} = 1,343 \Omega,$$

în care:

$$S_N = \frac{1250}{0,82 \cdot 0,956} = 1595 \text{ kVA} = 1,595 \text{ MVA}$$

Pentru calculul componentei inițiale a curentului de scurtcircuit, fără aportul motoarelor asincrone, în tabelul A.4 sunt prezentate reactanțele de scurtcircuit ale elementelor, exprimate în unități relative.

Tabelul A.4

Calculul în unități relative al parametrilor elementelor schemei din figura A.4

Element de rețea	Formule și calcul	Reactanțe [u.r.]
1	2	3
Aport sistem	$X_s^* = \frac{c U^2_N}{S_{sc}^*} \cdot \frac{1}{\left(\frac{U_{IT}}{U_{JT}}\right)^2} =$ $= \frac{1,1 \cdot 1^2}{\frac{600}{1000}} \cdot \frac{1}{0,9524^2} =$	2,02

Tabelul A.4 (continuare)

1	2	3
Cablu L1	$X_{L1}^* = X_{L1} \cdot I \cdot \frac{S_b}{U_{IT}^2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{U_{IT}}{U_{JT}}\right)^2} =$ $= 0,1 \cdot 4 \cdot \frac{1000}{20^2} \cdot \frac{1}{0,9524^2} =$	1,1025
Transformator T1	$(X_T^* = Z_T^*)$ $X_{T1}^* = \frac{U_{sc}}{100} \frac{U_{JT}}{S_{T1}} \frac{S_b}{U_b^2} =$ $= \frac{7}{100} \frac{6,3^2}{10} \frac{1000}{6^2} =$	7,7175
L1 + T1	$X_{L1}^* + X_{T1}^* = X_{L2}^* + X_{T2}^*$	8,82
(L1 + T1) (L2 + T2) paralel	$\frac{1}{2} (X_{L1}^* + X_{T1}^*)$	4,41
Reactanța de scurtcircuit	$X_K^* = X_s^* + \frac{1}{2} (X_{L1}^* + X_{T1}^*)$	6,43

Astfel:

$$I_{K(fără M_1 și M_2)}^* = \frac{c U_N^*}{\sqrt{3} X_K^*} = \frac{1,1 \cdot 1}{\sqrt{3} \cdot 6,43} = 0,099$$

Curentul de scurtcircuit (în kA) se calculează cu formula:

$$I_{K(fără M_1 și M_2)} = I_{K(fără M_1 și M_2)}^* \cdot \frac{S_b}{U_b} = 0,099 \cdot \frac{1000}{6} = 16,5 \text{ kA.}$$

Reactanțele de scurtcircuit, în unități relative, ale motoarelor asincrone sunt:

Motorul M_1 :

$$Z_{M1}^* = \frac{1}{I_p / I_N} \frac{U_N^2 S_b}{S_N U_b^2} = \frac{1}{I_p / I_N} \frac{S_b}{S_N} = \frac{1}{5} \frac{1000}{5,303} = 37,71$$

Motorul M_2 :

$$Z_{M2}^* = \frac{1}{3} \frac{1}{I_P / I_N} \frac{S_b}{S_N} = \frac{1}{3} \frac{1}{5,6} \frac{1000}{1,595} = 37,32.$$

Curenții parțiali de scurtcircuit se calculează cu formula:

$$I_{KM1}^{**} = \frac{1,1U^*}{\sqrt{3} Z_{M1}^*} = \frac{1,1 \cdot 1}{\sqrt{3} \cdot 37,71} = 0,01686 \rightarrow 2,81 \text{ kA}$$

$$I_{KM2}^{**} = \frac{1,1U^*}{\sqrt{3} Z_{M2}^*} = \frac{1,1 \cdot 1}{\sqrt{3} \cdot 37,32} = 0,017 \rightarrow 2,84 \text{ kA.}$$

Curenții de scurtcircuit parțiali sunt:

$$I_{KM1}'' = \frac{c U_N}{\sqrt{3} Z_{M1}} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 1,357} = 2,81 \text{ kA}$$

$$I_{KM2}'' = \frac{c U_N}{\sqrt{3} Z_{M2}} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 1,343} = 2,84 \text{ kA}$$

Curentul de scurtcircuit în punctul K, incluzând influența motoarelor, este:

$$I_k'' = I_k'' \text{ (fără motoare)} + I_{KM1}'' + I_{KM2}'' = 16,44 + 2,81 + 2,84 = 22,09 \text{ kA}$$

Aportul motoarelor asincrone mărește curentul de scurtcircuit cu 30% față de valoarea fără motoare:

$$S_k'' = \sqrt{3} U_N \cdot I_k'' = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 22,09 = 229,6 \text{ MVA.}$$

Pentru calculul aportului la scurtcircuit al rețelei este valabilă relația:

$$I_{Ks} = I_{rs} = I_{Ks}'' = 16,44 \text{ kA.}$$

Pentru calculul curentului de rupere al motoarelor pentru un timp de rupere $i_{min} = 0,1 \text{ s}$ se găsesc din curbele respective valorile lui μ și q (fig. 11 și 16) astfel:

$$Cu: \frac{I_{KM1}}{I_{NM1}} = \frac{I_{KM1}''}{\frac{S_N}{\sqrt{3} U_N}} = \frac{2,81}{\frac{5,3}{\sqrt{3} \cdot 6}} = 5,51; \text{ rezultă } \mu_{M1} = 0,75;$$

$$\text{Și: } \frac{I''_{KM2}}{I_{NM2}} = \frac{2,84}{\frac{1,6 \cdot 3}{\sqrt{3} \cdot 6}} = 6,15; \mu_{M2} = 0,74.$$

În funcție de putere nominală, pe fiecare pereche de poli din curbe rezultă:

pentru $M_1; P = 2,24 \text{ MW}$ rezultă $q_{M1} = 0,69$;

pentru $M_2; P = 1,25 \text{ MW}$ rezultă $q_{M2} = 0,6$.

Curentul trifazat de rupere al fiecărui motor se calculează astfel:

$$I_{rM1} = \mu_{M1} q_{M1} I''_{KM1} = 0,75 \cdot 0,69 \cdot 2,81 = 1,45 \text{ kA};$$

$$I_{rM2} = \mu_{M2} q_{M2} I''_{KM2} = 0,74 \cdot 0,6 \cdot 2,84 = 1,26 \text{ kA}.$$

Curentul de scurtcircuit trifazat la rupere devine:

$$I_r = I_{rs} + I_{rM1} + I_{rM2} = 16,44 + 1,45 + 1,26 = 19,15 \text{ kA},$$

față de valoarea de 16,44 kA, fără aportul motoarelor.

Calculul în unități relative

Pentru calculul în unități relative se aleg două mărimi de referință la care se raportează toate celelalte. Pentru exemplul prezentat anterior aceste mărimi pot fi:

$$U_b = U_N \text{ și } S_b = 1000 \text{ MVA}$$

Mărimile, exprimate în unități relative și notate cu *, sunt definite după cum urmează:

$$U^* = U/U_b; I^* = I U_b / S_b; Z^* = Z S_b / U_b^2; S^* = S / S_b.$$

În cazul în care raportul de transformare al transformatoarelor diferă de cel nominal, acesta se poate exprima în unități relative astfel:

$$\frac{U_{JT}}{U_{JT}} \cdot \frac{U_{NJT}}{U_{NIT}} = \frac{20}{6,3} \cdot \frac{6}{20} = 0,9524.$$

CALCULUL CURENȚILOR ÎN CAZUL UNUI SCURT-CIRCUIT APROAPE DE GENERATOR

Curenții de scurtcircuit în punctele $K_1 - K_4$ din figura A.5 sunt calculați ca în anexa 15.

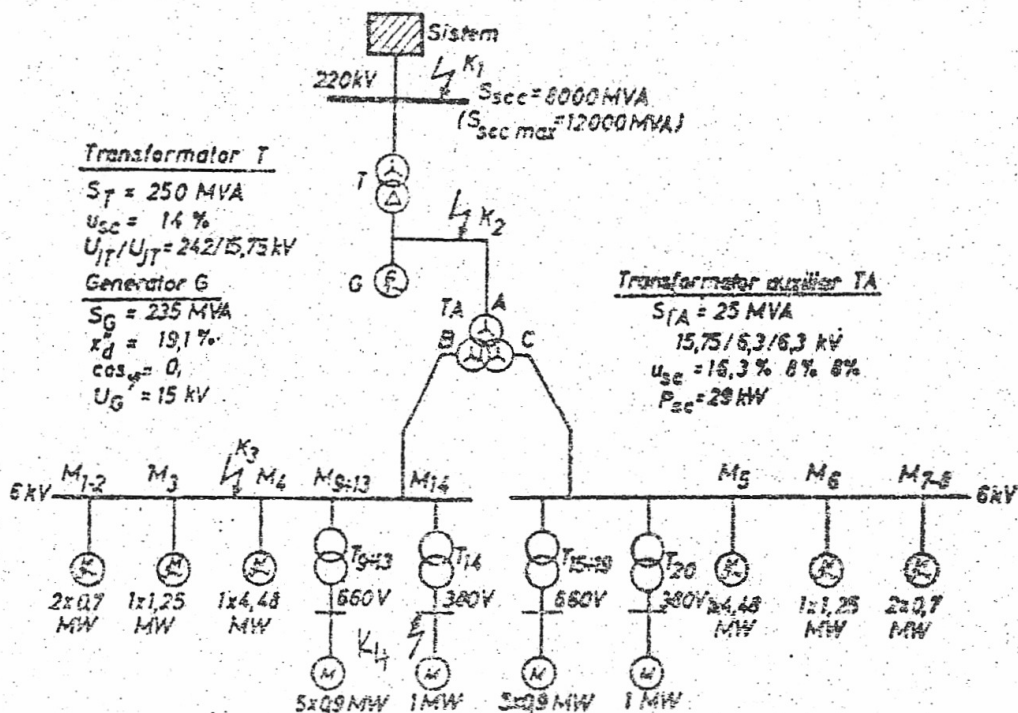


Fig. A.5. Schema unei rețele cu bloc generator - transformator și bară de servicii proprii.

Un generator este conectat bloc la un sistem de 220 kV cu o putere de scurtcircuit la $t = 0$ de $S_{sc} = 8000$ MVA.

Transformatorul de servicii proprii de la bornele generatorului este cu trei înfășurări, alimentând două sisteme de bare cu $U_N = 6$ kV.

Influența motoarelor asincrone asupra curentului de scurtcircuit se ia în considerare când se calculează scurtcircuiturile în punctele K_2 , K_3 și K_4 . Motoarele asincrone racordate la joasă tensiune pot fi considerate ca grupuri de motoare.

IMPEDANȚELE DE SCURT-CIRCUIT ALE ECHIPAMENTELOR

În tabelul A.5 sunt prezentate datele nominale ale echipamentelor, reactanțele de scurtcircuit ale acestora și formulele cu care se calculează.

Pentru calculul curenților de scurtcircuit în punctele K_2 și K_3 se ia valoarea maximă a puterii de scurtcircuit S_{sc} , estimată în funcție de dezvoltarea în perspectivă a sistemului energetic.

Calculul parametrilor elementelor schemei A.3

Echipamentul	Datele nominale ale echipamentului	Datele și ecuațiile pentru calculul lui	$Z_d = Z_i$ [Ω]	Z_h [Ω]
		Z_d și Z_h		
1	2	3	4	5
Rețeaua sistemului S	$U_N = 220$ kV; $c = 1,1$; $S_{SC} = 8000$ MVA	$Z_s = \frac{cU_N^2}{S_{SC}}$ $R_s = 0,1 X_s$ $X_s = 0,995 Z_s$ $Z_{TIT} = \frac{U_{SC} U_N^2}{100 S_N}$	$Z_s = \frac{1,1 \cdot 220^2}{8000} = 6,655$ $Z_s = 0,6622 + j 6,622$ $Z_{TIT} = \frac{14 \cdot 242^2}{100 \cdot 250} = 32,8$ $R_{TJT} = \frac{0,52 \cdot 242^2}{250^2} = 0,487$	
Transformator T	$S_N = 250$ MVA $U_1/U_J = 242/15$ kV	$R_{TIT} =$ $= \frac{\Delta P_{SC}}{3I_N^2} = \frac{\Delta P_{SC} U_N^2}{S_N^2}$ $X_{TIT} = \sqrt{Z_{TIT}^2 - R_{TIT}^2}$ $X_{TJT rap} =$ $= X_T \frac{1}{(U_1/U_J)^2}$ $Z_{TK} = K_T Z_{TJT}$	$X_{TIT} =$ $= \sqrt{32,8^2 - 0,487^2} = 32,8$ $Z_{TJT} = 0,47 + j 32,8$ $X_{TJT rap} =$ $= 32,8 \frac{1}{(242/15)^2} = 0,126$ $R_{TJT rap} = 0,0019$	

Tabelul A.5 (continuare)

1	2	3	4	5
<p>TA</p>	<p> $U_{sc} = 14 \%$ $P_{sc} = 520 \text{ kW}$ $S_N = 25 \text{ MVA } U_1/U_J/U_J =$ $= 15,75/6,3/6,3 \text{ kV}$ $U_{sc} = 8 \%, 8\%, 16 \%$ $\Delta P_{sc AB} = \Delta P_{sc AC} = 72 \text{ kW}$ $\Delta P_{sc BC} = 145 \text{ kW}$ </p>		<p> $Z_{TJT \text{ rap}} = 0,0019 + j0,126$ $Z_{TK} = 1,1 (0,0019 + j0,126)$ $Z_{AB} = \frac{8 \cdot 15,75^2}{100 \cdot 25} = 0,794$ $Z_{AC} = Z_{AB} = 0,794$ $Z_{BC} = \frac{16 \cdot 15,75^2}{100 \cdot 25} = 1,588$ $R_{AB} = R_{AC} = 0,072 \cdot$ $\frac{15,75^2}{25^2} = 0,0286$ $R_{BC} = 0,145 \cdot$ $\frac{15,75^2}{25^2} = 0,0576$ $X_{AB} = X_{AC} =$ $= \sqrt{0,794^2 - 0,0286^2} = 0,793$ </p>	

Tabelul A.5 (continuare)

1	2	3	4	5
<p>T 9 ÷ 13 T 15 ÷ 19</p>	<p>$S_N = 2,5 \text{ MVA}$ $U_i/U_j = 6,3/0,69 \text{ kV}$ $U_{sc} = 6 \% \Delta P_{sc} = 23,5 \text{ kW}$</p>	<p>$Z_A = \frac{1}{2}(Z_{AB} + Z_{AC} - Z_{BC})$ $Z_B = \frac{1}{2}(Z_{BC} + Z_{AB} - Z_{AC})$ $Z_C = \frac{1}{2}(Z_{AC} + Z_{BC} - Z_{AB})$ $Z_{rep, JT} = Z \frac{1}{(U_i/U_j)^2}$</p>	<p>$Z_{AB} = Z_{AC} = 0,0286 + j0,793$ $X_{BC} = \sqrt{1,588^2 - 0,0576^2} = 1,587$ $Z_{BC} = 0,0576 + j1,587$ $Z_A = \frac{1}{2}(-0,004 - j0,03) = -0,0002 - j0,015 = 0$ $Z_B = \frac{1}{3}(0,0576 + j1,616) = 0,0288 + j0,808$ $Z_C = \frac{1}{2}(0,0576 + j1,616) = 0,0288 + j0,808$ $Z_{BJT} = Z_{CJT} = 0,0046 + j0,1293$ $Z_{AJT} = 0$ $Z_{T9+13} = \frac{6}{100} \cdot \frac{6,3^2}{2,5} = 0,953$ $R_{T9+13} = \frac{0,0235 \times 6,3^2}{2,5^2} = 0,149$</p>	

Tabelul A.5 (continuare)

0	1	2	3	4
<p>T 14 T 20</p>	<p>$S_N = 1,6 \text{ MVA}$ $U/U_j = 6,3/0,4 \text{ kV}$ $u_{sc} = 6\% \Delta P_{sc} = 16,5 \text{ kW}$</p>		<p>$X_{T9+13} =$ $= \sqrt{0,953^2 - 0,149^2} = 0,886$ $Z_{T9+13} = 0,149 + j0,886$ $Z_{T9+13 \text{ rap}} = 0,0018 + j0,0106$ $Z_{T14} = \frac{6 \cdot 6,3^2}{100 \cdot 1,6} = 1,488$ $R_{T14} = \frac{0,0165 \times 16,3^2}{1,6^2} =$ $= 0,256$ $X_{T14} =$ $= \sqrt{1,488^2 - 0,256^2} = 1,466$ $Z_{T14} = 0,256 + j1,466$ $Z_{T14 \text{ rap}} = 0,001 + j0,006$ $Z_G = 0,191 \frac{15^2}{235} (0,05 + j) =$ $= 0,009 + j0,183$</p>	
<p>Generator G</p>	<p>$S_G = 235 \text{ MVA};$ $U_G = 15 \text{ kV}$ $X_d'' = 19,1\%;$ $\cos \phi = 0,85$</p>	<p>$R_G = 0,05 X_d'$ $Z_G = R_G + j X_d'' =$ $= X_d'' (0,05 + j) =$ $= X_d'' \frac{U_G^2}{S_G} (0,05 + j)$</p>		

Tabelul A.5 (continuare)

1	2	3	4	5
		$K_G = \frac{c}{1 + X_d' \sin \phi}$ $Z_{GK} = K_G Z_G$ $K_{GT \text{ rap}} = \left(\frac{U_N / U_G}{U_{JT} / U_{JT}} \right)^2 \cdot \frac{c}{1 + (X_d' - X_T) \sin \phi}$ $Z_{GT} = K_{GT \text{ rap}} \left(\frac{U_{JT}^2}{U_{JT}^2} Z_G + Z_T \right)$	$K_G = \frac{1,1}{1 + 0,191 \times 0,5267} = 0,9991$ $Z_{GK} = 0,9991(0,009 + j0,183) = 0,009 + j0,183$ $\left(\frac{220}{15} \frac{15,75}{242} \right)^2 \cdot \frac{1,1}{1 + (0,191 - 0,14)0,5267} = 0,976$ $0,976 \left(\frac{242}{15,75} \right)^2 (0,009 + j0,183) + (0,487 + j32,8) = 0,976 \cdot (2,125 + j43,2 + 0,487 + j32,8) = 2,55 + j74,18$	

CALCULUL CURENȚILOR DE SCURTCIRCUIT

Scurtcircuit în punctul K_1 . Calculul se efectuează în conformitate cu formulele de la pct. 3.4. Se neglijează aportul motoarelor asincrone (deoarece aportul lor este mai mic de 5%).

Curentul de scurtcircuit trifazat:

$$\mathbf{i}_K'' = \mathbf{i}_{KGT}'' + \mathbf{i}_{KS}''$$

$$\mathbf{i}_{KGT}'' = \frac{1,1U}{\sqrt{3}Z_{GT}} = (0,0648 - j1,884) \text{ kA};$$

$$|\mathbf{i}_{KGT}''| = 1,89 \text{ kA};$$

$$\mathbf{i}_{KS}'' = \frac{S_{sc}}{\sqrt{3}U_n} = \frac{8000}{\sqrt{3} \cdot 220} = 20,99 \text{ kA};$$

$$\mathbf{i}_{KS}'' = \frac{1,1U_N}{\sqrt{3}Z_s} = (2,092 - j20,92) \text{ kA}; |\mathbf{i}_{KS}''| = 21,02 \text{ kA};$$

$$\mathbf{i}_K'' = \mathbf{i}_{KGT}'' + \mathbf{i}_{KS}'' = (2,1568 - j22,804) \text{ kA}; |\mathbf{i}_K''| = 22,91 \text{ kA}.$$

Curentul de șoc:

$$i_{\text{șoc}} = i_{\text{șoc GT}} + i_{\text{șoc S}}$$

Aportul generatorului:

$$R/X = R_{GT} / X_{GT} = 2,55 / 74,18 = 0,0344 \rightarrow \chi_{GT} = 1,9$$

$$i_{\text{șoc GT}} = \chi_{GT} \sqrt{2} i_{KGT}'' = 1,9 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,89 = 5,08 \text{ kA}$$

Aportul sistemului:

$$R_s / X_s = 0,6622 / 6,622 = 0,1; \chi_s = 1,75$$

$$i_{\text{soc } S} = \chi_s \sqrt{2} I_{KS}'' = 1,75\sqrt{2} \cdot 21,02 = 52,02 \text{ kA}$$

$$i_{\text{soc}} = 5,08 + 52,02 = 57,1 \text{ kA}$$

Pentru $t_{\text{min}} = 0,1 \text{ s}$, curentul de declanșare:

$$I_r' = I_{rGT} + I_{rs} = I_{rGT} + I_{KS}''$$

$$I_{rGT} = I_{KGT}''; \mu = \mu_{0,1s} = 0,62 + 0,72 e^{-0,32 I_K'' / I_{NG}} = 0,882$$

$$I_K'' / I_{NG\text{rap}} = I_{KGT}'' / [I_{NG} (U_i / U_j)] = 1,89 / [9,06 / (220 / 15)] = 3,058$$

$$I_{rGT} = 0,882 \cdot 1,89 + 1,67 \text{ kA}$$

$$I_r = 1,67 + 21,02 = 22,69 \text{ kA}$$

Scurtcircuit în punctul K_2 . Valoarea inițială a curentului de scurtcircuit trifazat în punctul K_2 (fără influența motoarelor asincrone) este suma curenților de scurtcircuit I_{KG}'' și I_{KT}'' :

$$I_{KG}'' = \frac{c U_{NG}}{\sqrt{3} Z_{GK}} = 2,56 - j51,97 \text{ kA}; |I_{KG}''| = 52,11 \text{ kA};$$

$$I_{KT}'' = \frac{c U_{NG}}{\sqrt{3} \left(Z_{TK} + \frac{1}{\left(\frac{U_{iG}}{U_{jG}} \right)^2} Z_S \right)} = (1,72 - j56,12) \text{ kA};$$

$$|I_{KT}''| = 56,27 \text{ kA}$$

$$I''_K = I''_{KG} + I''_{KT} = (4,28 - j108,09) \text{ kA} ; |I''_K| = 108,38 \text{ kA}$$

Deoarece $R \ll X$ normal se calculează astfel:

$$I''_{KG} = \frac{c U_G}{\sqrt{3} Z_{GK}} = 52,11 \text{ kA}$$

$$I''_{KT} = \frac{c U_G}{\sqrt{3} Z_{TK} + \frac{1}{\left(\frac{U_l}{U_j}\right)^2} Z_s} = 56,27 \text{ kA}$$

$$I''_K = I''_{KS} + I''_{KT} = 108,38 \text{ kA}$$

și se obține același rezultat.

Utilizând ecuația:

$$I''_K = c \frac{U_G}{\sqrt{3} Z_{GK}} + \frac{1}{Z_{TK} + \frac{1}{\left(\frac{U_l}{U_j}\right)^2} Z_s} = c \frac{U_G}{\sqrt{3} Z_{echiv}}$$

în care Z_{echiv} este:

$$Z_{echiv} = \frac{Z_{GK} \cdot Z_{GK} + \frac{1}{\left(\frac{U_l}{U_j}\right)^2} Z_s}{Z_{GK} + Z_{GK} + \frac{1}{\left(\frac{U_l}{U_j}\right)^2} Z_s} = (0,0024 + j 0,0878) \Omega$$

$$|Z_{echiv}| = 0,022 \Omega$$

Calculând cu Z_{echiv} rezultă:

$$I''_K = \frac{cU_G}{\sqrt{3}|Z_{echiv}|} = \frac{1,1 \cdot 15}{\sqrt{3} \cdot 0,088} = 108,38 \text{ kA,}$$

aceleași cu cel determinat în celelalte două ipoteze.

Calculul în unități relative:

$$I_{soc} = I_{soc G} + I_{soc T},$$

$$\text{unde: } I_{soc G} = \chi_G \sqrt{2} I''_{KG} = 1,86 \sqrt{2} \cdot 52,11 = 137,07 \text{ kA}$$

$$\text{pentru } R_G/X''_d = 0,05 \rightarrow \chi_G = 1,86,$$

$$\text{iar } I_{soc T} = \chi_T \sqrt{2} I''_{KT} = 1,85 \sqrt{2} \cdot 56,27 = 147,22 \text{ kA}$$

$$\text{pentru } R/X = 0,0052/0,17 = 0,0306 \rightarrow \chi_T = 1,85,$$

$$\text{rezultă: } I_{soc} = 284,29 \text{ kA.}$$

Curentul de rupere:

$$I_{ri} = I_{rG} + I_{rT} = I_{rG} + I''_{KT}, \text{ deoarece } I_{rT} = I''_{KT}$$

$$I_{rG} = \mu I''_{KG} \quad I''_{KG}/I_{NG} = 52,11/9,06 = 5,75 \rightarrow \mu_{0,1s} = 0,74$$

$$I_{rG} = 0,74 \cdot 52,11 = 38,56 \text{ kA}$$

$$I_r = 38,56 + 56,27 = 94,83 \text{ kA}$$

Întrucât în punctul K_2 nu există întreruptor care să rupă întregul curent, poate prezenta interes numai aportul prin transformator, pentru întreruptorul respectiv $I_r = I''_{KT}$.

Aportul motoarelor asincrone la valoarea curentului de scurtcircuit se poate calcula cu valorile impedanțelor din tabelele A.6, A.7, raportate la 15 kV:

$$Z_{M1-4} = (0,097 + j 0,809) \Omega = Z_{M5-8}$$

$$Z_{M+T 9-13} = (0,48 + j 1,25) \Omega = Z_{M+T 15-19}$$

$$Z_{M+T 14} = (2,266 + j 6,23) \Omega = Z_{M+T 20}$$

$$Z_{MB} = Z_{MC} = (0,105 + j 0,462) \Omega$$

Tabelul A.6

**Caracteristicile motoarelor asincrone racordate la joasă
tensiune și transformatoarelor MT/JT**

UM				
1	2	3	4	
Transformator		nr.9+13; 15+19	nr. 14; 20	
S_{NI}	MVA	2,5	1,6	
U_i	kV	6,3	6,3	
U_j	kV	0,69	0,4	
U_{sc}	%	6	6	
P_{sc}	kW	23,5	16,5	
Motoare				
P_M	MW	0,9	1,0	
U_N	kV	0,66	0,38	
$\cos \phi \cdot \eta$		$0,8 \cdot 0,9 = 0,72$	0,72	
I_p/i_N		5	5	
R_M/X_M		0,42	0,42	
X_M		1,3	1,3	
$S_M = P_M/\cos \phi \cdot \eta$	kVA	1,25	1,39	
Z_T	Ω	0,953	1,488	
R_T	Ω	0,149	0,256	
X_T	Ω	0,886	1,466	
Z_M	Ω	0,0697	0,0206	
$R_M=0,42 X_M$	Ω	0,027	0,0081	

Tabelul A. 6 (continuare)

1	2	3	4
$X_M = 0,922 Z_M$	Ω	0,0643	0,0192
$I''_{KM} (U_N = 0,66 \text{ kV}; 0,38 \text{ kV};$ $c = 1,05)$	kA	5,74	11,8
$Z_{M \text{ rap}} = Z_M (U_i/U_j)^2$	Ω	5,813	5,111
$R_{M \text{ rap}} = R_M (U_i/U_j)^2$	Ω	2,252	2,010
$X_{M \text{ rap}} = X_M (U_i/U_j)^2$	Ω	5,363	4,764
$R_T + R_{M \text{ rap}}$	Ω	2,401	2,266
$X_T + X_{M \text{ rap}}$	Ω	6,249	6,23
$Z_T + Z_{M \text{ rap}}$	Ω	6,766	6,599
$I''_{KT} (U_N = 6,3 \text{ kV}; c = 1,1)$		0,592	0,607

$$Z_{MB \text{ rap}} = \left(\frac{U_{iTA}}{U_{jTA}} \right)^2 Z_{MB} = (0,656 + j 2,89) \Omega = Z_{MC}$$

$$Z_{M-TA} = Z_A + \frac{(Z_B + Z_{MB \text{ rap}})(Z_C + Z_{MC \text{ rap}})}{Z_B + Z_C + Z_{MB \text{ rap}} + Z_{MC \text{ rap}}} = (0,331 + j 1,509) \Omega$$

$$I''_{KM-TA} = \frac{c U_{NG}}{\sqrt{3} |Z_{M-TA}|} = \frac{1,1 \cdot 15,75}{\sqrt{3} \cdot 1,545} = 6,48 \text{ kA.}$$

Tabelul A.7

Caracteristicile motoarelor asincrone racordate la bara de 6 kV

UM				
1	2	3	4	5
		nr. 1, 2; 7; 8	nr. 3; 6	nr. 4; 5
P_N	MW	0,7	1,25	4,48
nr. unități	buc.	4	2	2

Tabelul A.7 (continuare)

1	2	3	4	5
U_N	kV	6	6	6
$\cos \phi$		0,85	0,82	0,88
η		0,945	0,956	0,96
I_p/I_N		5,1	5,6	5
perechi poli p		3	2	3
$S_N = P_N/\cos \phi \cdot \eta$	MVA	0,87	1,59	5,303
$I_N = S_N/(\sqrt{3} U_N)$	kA	0,084	0,153	0,511
$I''_K/I_N(cI_p/I_N)$		5,61	6,16	5,5
$m = P_N/P$	MW	0,23	0,63	1,49
R_M/X_M		0,15	0,15	0,10
X_M		1,65	1,65	1,75
$\mu (t_{\min} = 0,1 \text{ s})$		0,75	0,725	0,74
$q(t_{\min} = 0,1 \text{ s})$		0,6	0,52	0,61
$I''_{KN} = (I''_K/I_T) I_N$	kA	0,47	0,94	2,61
$i_{\text{soc}} = K_M \sqrt{2} I''_{KN}$	kA	1,097	2,193	6,95
$i_{TM} = \mu q I''_{KN}$	kA	0,212	0,354	1,268
$Z_M = \frac{1}{I_p/I_N} \frac{U_N^2}{S_N}$	Ω	8,11	4,403	1,358
X_M	Ω	$0,989Z_M$	$0,989X_M$	$0,995Z_M$
		8,021	3,999	1,351
R_M	Ω	$0,15 X_M$	$0,15X_M$	$0,1X_M$
		1,203	0,6	0,135

Curentul dat de motoarele asincrone la scurtcircuit în punctul K_2 trebuie luat în considerare deoarece acesta mărește cu circa 7% curentul dat de generator și de sistem.

Suma curenților de scurtcircuit va fi:

$$I''_K + I''_{KM-AT} = 108,38 + 6,48 = 114,86 \text{ kA}$$

Curentul de șoc suplimentar și curentul de rupere dați de motoarele asincrone se adaugă calculând $i_{\text{șoc M-AT}}$ și $I_{\text{rM-AT}}$:

$$i_{\text{șoc M-AT}} = \chi \sqrt{2} I_{\text{KM-AT}}'' = 1,7 \sqrt{2} \cdot 6,48 = 15,58 \text{ kA.}$$

Pentru χ s-a luat într-o primă aproximare valoarea de 1,7 (în tabelele A.6 și A.7 χ are fie valoarea 1,65, fie 1,75 pentru motoarele racordate la MT și 1,3 pentru cele racordate la JT).

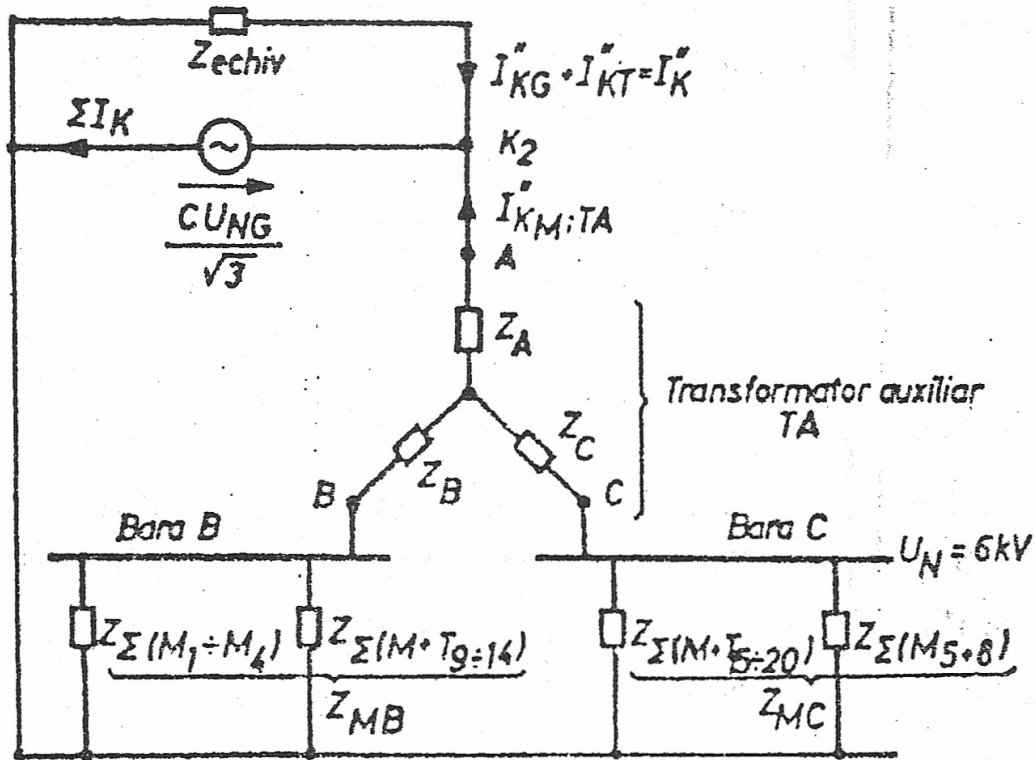


Fig. A.6. Schema de secvență directă pentru calculul aportului la curentul de scurtcircuit al motoarelor racordate la JT și MT (impedanțele racordate la 15 kV - raport 15,75/6,3 kV).

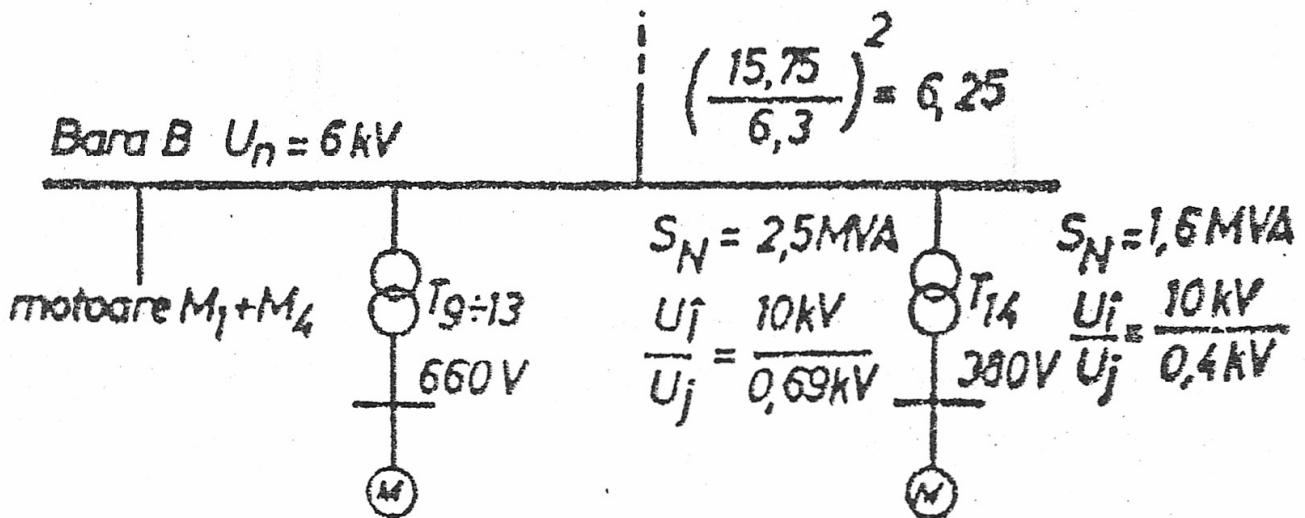


Fig. A.7. Detaliu privind motoarele asincrone conectate la bara de 6 kV în figura A.5.

Când se calculează $I_{\text{șoc}}$ cu metoda frecvenței echivalente, cu impedanțele din tabelele A.5-A.7, găsim $\chi_c = 1,701$ și rezultă:

$$I_{\text{șoc}} = \chi_c \sqrt{2} I''_{\text{KM-AT}} = 1,701 \cdot \sqrt{2} \cdot 6,48 = 15,59 \text{ kA},$$

practic egal cu cel calculat mai sus.

Se poate aproxima că $I_{\text{TM-AT}} = I''_{\text{KM-AT}}$.

Datorită faptului că $I_{\text{RG}} + I_{\text{TM-AT}} < I_{\text{RT}} \rightarrow I_{\text{RT}} = I''_{\text{KT}}$, capacitatea de rupere a întreruptorului dintre generator și transformator poate fi calculată cu $I_{\text{RT}} = 56,27 \text{ kA}$.

Scurtcircuit în punctul K_3 . Valoarea inițială a curentului de scurtcircuit trifazat este dată de suma curenților:

$$I''_{\text{k}} = I''_{\text{KAT}} + I''_{\text{K}\Sigma(\text{M}_1 \dots \text{M}_5)} + I''_{\text{K}\Sigma(\text{M} + \text{T9} - 14)}$$

Calcularea curentului I''_{KTA} (fig. A.8):

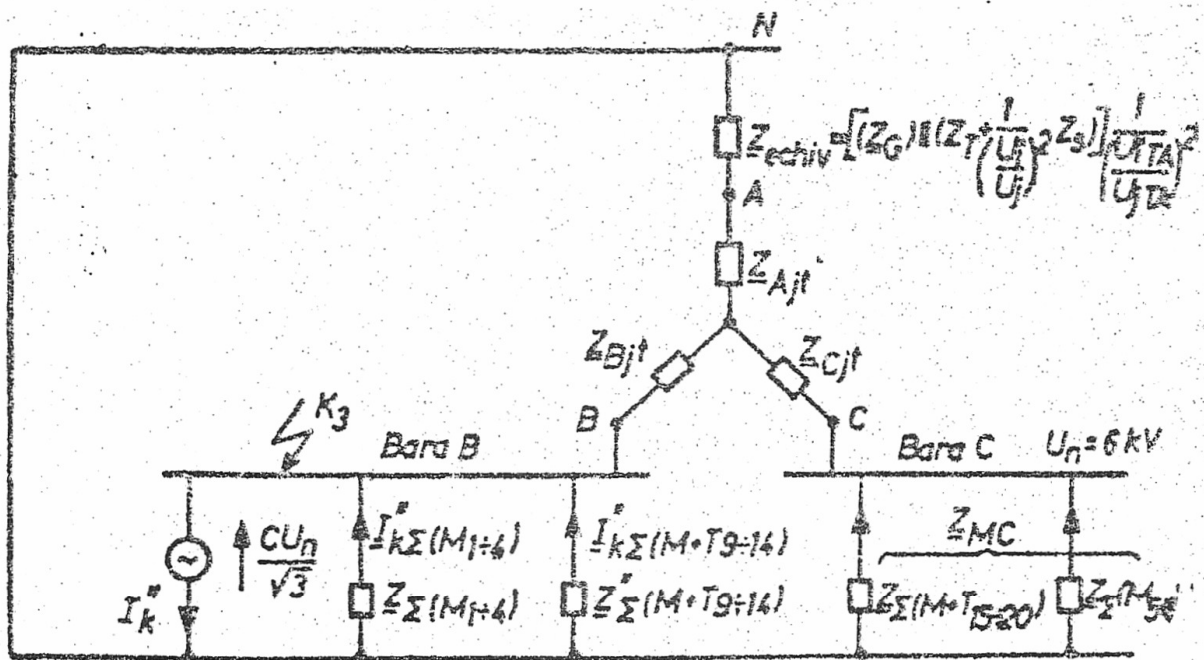


Fig. A.8. Schema reactanțelor de secvență directă pentru calcul curentului de scurtcircuit în punctul K_3 .

$$Z_{\text{KTA}} = Z_{\text{BJT}} + \frac{(Z_{\text{AJT}} + Z_{\text{echiv}})(Z_{\text{CJT}} + Z_{\text{MC}})}{Z_{\text{AJT}} + Z_{\text{CJT}} + Z_{\text{echiv rap}} + Z_{\text{MC}}} = (0,0049 + j0,143) \Omega,$$

$$|Z_{KTA}| = 0,1431 \Omega,$$

$$\text{unde: } Z_{BT} = Z_{cT} = (0,0046 + j 0,1239) \Omega$$

$$Z_{AT} = 0$$

$$Z_{\text{echiv rap}} = (0,0004 + j 0,014) \Omega$$

$$Z_{MC} = Z_{\Sigma(M5-8)} \parallel Z_{\Sigma(M+T15-20)} = (0,105 + j 0,462) \Omega$$

$$I''_{KTA} = \frac{cU_N}{\sqrt{3} Z_{KTA}} = (0,9153 - j 26,71) \text{ kA}$$

$$|I''_{KTA}| = 26,73 \text{ kA}$$

$$\text{\textcircled{S}tiind c\textcircled{a}} I''_{K\Sigma(M1-4)} = (0,558 - j 4,655) \text{ kA}; |I''_{K\Sigma(M1-4)}| = 4,69 \text{ kA \textcircled{e}i}$$

$$I''_{K\Sigma(M+T9-14)} = (1,023 - j 2,663) \text{ kA}; |I''_{K\Sigma(M+T9-14)}| = 2,85 \text{ kA},$$

rezult\textcircled{a}:

$$I''_K = (2,496 - j 34,028) \text{ kA}; |I''_K| = 34,12 \text{ kA}.$$

Deducem puterea de scurtcircuit:

$$S''_K = \sqrt{3} U_n \cdot I''_K = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 34,12 = 354,6 \text{ MVA}.$$

Valorile factorului χ pentru calculul curentului de șoc sunt:

$$\chi_{TA} = 1,02 + 0,98e^{-3(0,0046/0,1293)} = 1,86$$

$$\chi_{(M1-4)} = \frac{i_{\text{șoc}}}{\sqrt{2} I''_{K(M1-4)}} = \frac{10,24}{\sqrt{2} \cdot 4,69} = 1,55$$

$$\chi_{\Sigma(M+T9-14)} = 1,02 + 0,98e^{-3(1,17/3,12)} = 1,35$$

$$i_{\text{șoc}} = 1,15 \chi_{TA} \sqrt{2} I''_{KTA} + \chi_{\Sigma(M1-4)} \sqrt{2} I''_{K\Sigma(M1-4)} + \chi_{\Sigma(M+T9-14)} \sqrt{2} I''_{K\Sigma(M+T9-14)}$$

$$i_{\text{soc}} = 96,58 \text{ kA}$$

cu $1,15 \cdot \chi_{\text{TA}} = 2,14$ (metoda raportului impedanței la locul la defect) și raportul R/X al motoarelor la joasă tensiune, inclusiv transformatoarele lor (tabelul A.6), rezultă valoarea medie:

$$\chi = \frac{i_{\text{soc}}}{\sqrt{2} I_K''} = \frac{96,58}{\sqrt{2} \cdot 34,12} = 1,99$$

Curentul de declanșare calculat anterior arată că valoarea curentului I_{KG}'' este mai mică decât de două ori I_{NG} , astfel încât $I_{\text{rTA}} = I_{\text{KTA}}''$ (departe de generatorul de scurtcircuit):

$$I_{\text{rTA}} = I_{\text{rTA}}''$$

$$I_r = I_{\text{rTA}} + I_{r\Sigma(M1+4)} + I_{r\Sigma(M+T9+14)}$$

$$I_{r\Sigma(M1+4)} = \sum_{i=1}^4 \mu_i q_i I_{\text{KM}i}'' = 4,08 \text{ kA (conform tabelului A.7)}$$

$$I_{r\Sigma(M+T9+14)} = \mu q I_K'' \Sigma(N+T9+14) = 0,77 \cdot 0,342 \cdot 2,85 = 0,75 \text{ kA,}$$

pentru $\mu = 0,77$ ($t_{\text{min}} = 0,1 \text{ s}$) cu $I_K'' / I_M = 5$ și $q = 0,342$, corespunzător puterii motoarelor asincrone de joasă tensiune pe perechi de poli (putere nominală $\leq 0,3 \text{ MW}$ și $p = 2$):

$$I_r = 26,73 + 4,08 + 0,75 = 31,56 \text{ kA (} I_r / I_K'' = 0,92; t_{\text{min}} = 0,1 \text{ s)}$$

Scurtcircuit în punctul K_2 . I_K'' se calculează cu ajutorul schemei din figura A.9:

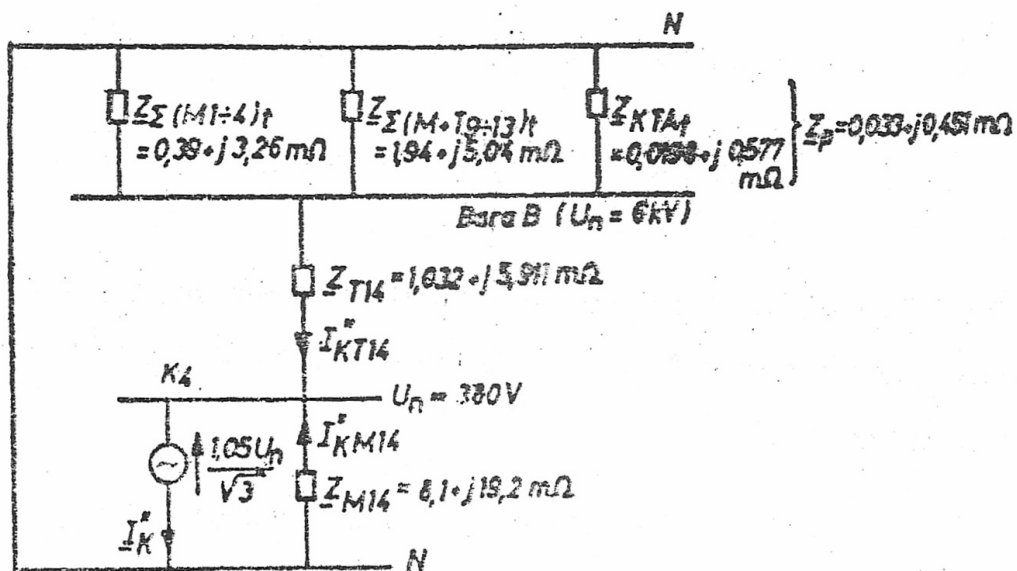


Fig. A.9. Schema de secvență directă pentru calculul curentului de scurtcircuit în punctul K_2 .

$$I_{KT}'' = \frac{c \cdot I_N}{\sqrt{3}(Z_p + Z_{T14})} = (5,88 - j 35,17) \text{ kA}$$

$$|I_{KT}''| = 35,43 \text{ kA}$$

$$I_{KM14}'' = \frac{c U_N}{\sqrt{3} Z_{M20}} = (4,3 - j 10,19) \text{ kA}$$

$$|I_{KM14}''| = 11,06 \text{ kA}$$

$$I_K'' = I_{KT}'' + I_{KM}'' = (10,18 - j 45,36) \text{ kA}; |I_K''| = 46,49 \text{ kA}$$

Calculul curentului de șoc:

$$i_{\text{șoc}} = i_{\text{șoc T14}} + i_{\text{șoc M14}}$$

$$i_{\text{șoc T14}} = \chi \sqrt{2} I_{KT}'', \text{ unde } \chi = f(R/X) = 1,65$$

$$R/X = 1,065/6,372 = 0,167$$

Conform metodei raportului impedanței la locul de defect, este necesar să se ia:

$$1,15 \cdot \chi = 1,15 \cdot 1,65 = 1,9$$

În acest caz, pentru scurtcircuitul la joasă tensiune $\chi = 1,8$.

$$i_{\text{șoc M14}} = \chi_M \sqrt{2} I_{KM}'', \text{ unde } \chi_M = 1,3 \text{ (tabelul A.7);}$$

$$i_{\text{șoc}} = 1,8 \sqrt{2} \cdot 35,43 + 1,3 \sqrt{2} \cdot 11,06 = 110,52 \text{ kA.}$$

Dacă la calculul $i_{\text{șoc T14}}$, impedanța transformatorului de joasă tensiune reprezintă principala parte a sumei $Z_p + Z_{T14}$, se consideră numai raportul R/X al transformatorului pentru determinarea lui χ :

$$R_{T14} / X_{T14} = 1,032 / 5,911 = 0,175,$$

rezultă: $\chi = 1,6$ și un curent de șoc total:

$$i_{\text{șoc}} = 1,6 \sqrt{2} \cdot 35,43 + 1,3 \sqrt{2} \cdot 11,06 = 100,5 \text{ kA, mai mic cu circa 10 \%}$$

BIBLIOGRAFIE

1. Albert Hermina Normativ privind metodologia de calcul al curenților de scurtcircuit în instalațiile electrice - PE 134/1984
2. * * * Draft - Short-circuit current calculation in three phase a.c. system, IEC. Tehnical Committee nr. 73/1988
3. * * * Short-circuit calculation in three-phase a.c. systems. Factors for the calculation of short - circuit currents in three-phase a.c system according to-IEC 909-1/1991-10
4. * * * Leitsatze für Berechnung der Kurzschusströme VDE 0102
5. Ulianov S.A. Regimuri tranzitorii ale sistemelor electrice (traducere din limba rusă)
București, Ed. Tehnică, 1967
6. Clarke E. Analiza circuitelor sistemelor electroenergetice (traducere din limba engleză)
Ed. Tehnică, București
7. Antoniu I.S. Electrotehnica, chestiuni speciale
Ed. Academiei, R.P.R., București, 1958
8. Erenia M, Crișciu H., Analiza asistată de calculator a regimurilor sistemelor
Ungureanu B., Bulac C. electroenergetice, Ed. Tehnică, București, 1985
9. Albert Hermina, Calculul curenților de scurtcircuit (ENERG 8/1989, Ed. Tehnică)
Hüchert Steliana

10.***

Short-circuit current calculation in three phase a.c. systems
International Electrotechnical Commission 73 (secretariat) 56,
january 1993

11.***

Short-circuit currents - Double line-to-earth short-circuit currents
and partial short-circuit currents through earth
Electrotechnical Commission 73 (secretariat) 48, October 1993

Tiparul executat la **Grupul de Studii, Cercetare și Inginerie - GSCI**
Centrul de Informare și Documentare pentru Energetică - CIDE
B-dul Energeticienilor nr.8, sector 3, București, cod 79619
Tel: 3236730/287
Fax: 3211010
Director CIDE: ing. Constantin Trică

Redactor: CODRINA POPA
Tehnoredactor: FLORICA NIȚĂ
Coperta și grafica: NICOLAE STOICESCU