7.2.2. CALCULUL RETELELOR TRIFAZATE NESIMETRICE

7.2.2.1. Metoda componentelor simetrice

Calculul unor regimuri de avarie nesimetrice care apar in timpul functionarii sistemelor trifazate (scurtcircuite, intreruperi de faza s.a.) sau al unor regimuri nesimetrice create intentionat (pornirea sau reglarea turatiei la motoarele asincrone trifazate) este o operatiune complicata, necesitând rezolvarea unor sisteme de ecuatii cu un numar mare de necunoscute.

Pentru a simplifica ecuatiile si schemele echivalente corespunzatoare s-au elaborat metode de calcul utilizând noi necunoscute, auxiliare, numite componente simetrice.

La baza metodei componentelor simetrice sta teorema lui Fortescue care arata ca: descompunerea oricarui sistem trifazat, ordonat, de marimi sinusoidale in trei sisteme componente simetrice, unul homopolar, unul direct si unul invers, este unica si totdeauna posibila (fig. 7.2.6).

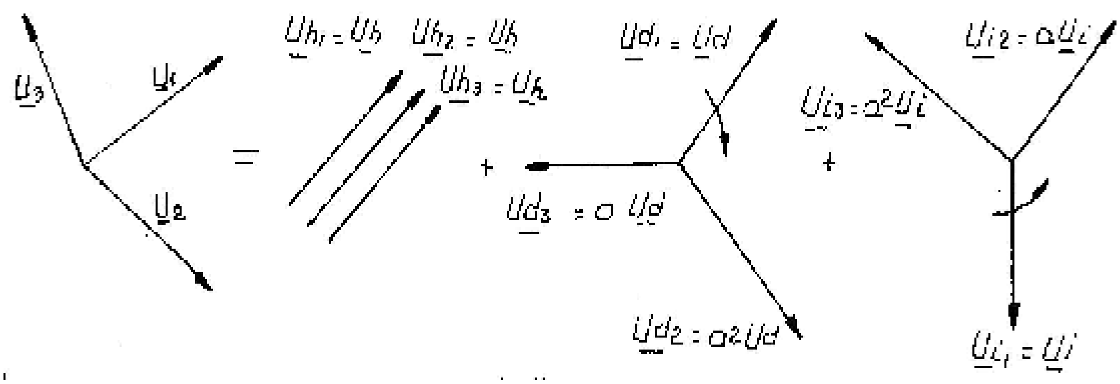


Fig. 7.2.6

Sistemul omopolar (sau homopolar) este constituit din trei marimi sinusoidale in faza si cu amplitudini egale.

Descompunerea unui sistem ordonat nesimetric ($\underline{U}_1$, $\underline{U}_2$, $\underline{U}_3$) in sistemele sale componente simetrice este definita in complex de urmatoarele relatii intre marimile acestor sisteme;

$$\begin{aligned}\underline{U}_1&=\underline{U}_{h1}+\underline{U}_{d1}+\underline{U}_{i1}\\ \underline{U}_2&=\underline{U}_{h2}+\underline{U}_{d2}+\underline{U}_{i2}\\ \underline{U}_3&=\underline{U}_{h3}+\underline{U}_{d3}+\underline{U}_{i3}\end{aligned} \qquad (7.2.18)$$

Aceasta descompunere este unica si totdeauna posibila, deoarece determinantul sistemului este diferit de zero:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{vmatrix} = j3\sqrt{3} \neq 0$$

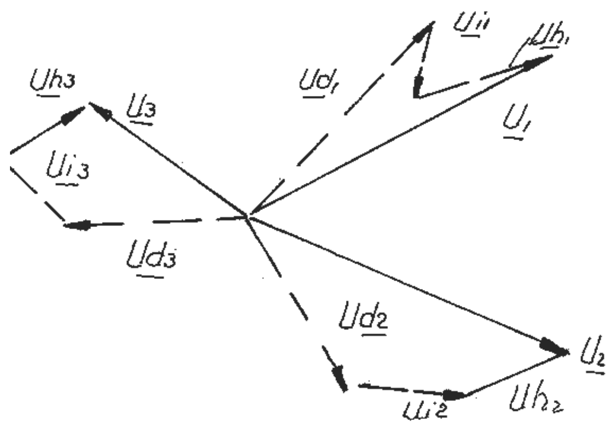


Fig. 7.2.7

Operatiile grafice corespunzatoare relatiilor (7.2.18) sunt ilustrate in fig. (7.2.7).

Cele trei marimi ale fiecaruia dintre sistemele componente simetrice, se pot exprima, cu ajutorul operatorului $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$, in functie de marimea fazei 1 a sistemului respectiv, numita marime fundamentala a sistemului, sub forma:

$\underline{U}_{h1}=\underline{U}_h$; $\underline{U}_{h2}=\underline{U}_h$; $\underline{U}_{h3}=\underline{U}_h$ (7.2.19)

$\underline{U}_{d1}=\underline{U}_d$; $\underline{U}_{d2}=a^2\underline{U}_d$; $\underline{U}_{d3}=a\underline{U}_d$ (7.2.20)

$\underline{U}_{i1}=\underline{U}_i$; $\underline{U}_{i2}=a\underline{U}_i$; $\underline{U}_{i3}=a^2\underline{U}_i$ (7.2.21)

Marimile fundamentale $\underline{U}_h$, $\underline{U}_d$, $\underline{U}_i$ se numesc, respectiv: componenta omopolara, componenta directa si componenta inversa a sistemului trifazat de marimi nesimetrice dat ($\underline{U}_1$, $\underline{U}_2$, $\underline{U}_3$).

In aceste conditii relatiile (7.2.18) se pot exprima:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_h+\underline{U}_d+\underline{U}_i \\ \underline{U}_2 &= \underline{U}_h+a^2\underline{U}_d+a\underline{U}_i \\ \underline{U}_3 &= \underline{U}_h+a\underline{U}_d+a^2\underline{U}_i \end{aligned} \qquad (7.2.22)$$

Sau matricial $[\underline{U}]=[\underline{T}][\underline{U}s]$ (7.2.23)

cu notatiile:

$$[\underline{U}]=\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \end{bmatrix}; \quad [\underline{U}_s]=\begin{bmatrix} \underline{U}_h \\ \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \end{bmatrix}; \quad [\underline{T}]=\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \qquad (7.2.24)$$

in care $[\underline{U}]$ este matricea coloana a marimilor sistemului trifazat nesimetric; $[\underline{U}s]$, matricea coloana a componentelor simetrice, iar $[\underline{T}]$ este matricea de transformare.

7.2.2.1.1. Determinarea componentelor simetrice

a) Determinarea analitica

Rezolvând sistemul de ecuatii (7.2.18) si (7.2.23) in raport cu componentele simetrice ($\underline{U}_h$, $\underline{U}_d$, $\underline{U}_i$) rezulta:

$$[\underline{U}_s]=[\underline{T}]^{-1}[\underline{U}] \qquad (7.2.25)$$

unde matricea inversa $[\underline{T}]^{-1}=\frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$

Din (7.2.25) se obtin:

$\underline{U}_h = \frac{1}{3}(\underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_3)$

$\underline{U}_d = \frac{1}{3}(\underline{U}_1 + a\underline{U2} + a^2\underline{U}_3)$ (7.2.26)

$\underline{U}_i = \frac{1}{3}(\underline{U}_1 + a^2\underline{U}_2 + a\underline{U}_3)$

b) Proprietati ale componentelor simetrice

1. Din prima ecuatie a sistemului (7.2.26) se vede ca daca suma algebrica a marimilor sistemului trifazat nesimetric este nula exista numai doua sisteme componente simetrice si anume: unul direct si altul invers. Aceasta duce la concluzia:

– sistemul tensiunilor de linie la orice tip de receptor nu are componenta omopolara;

– siatemul trifazat cu neutrul izolat are componenta omopolara a curentului nula.

2. Se pot stabili relatii intre componentele simetrice de linie si de faza pentru tensiuni si curenti.

Astfel cu: $\underline{U}_{12} = \underline{U}_1 - \underline{U}_2$; $\underline{U}_{23} = \underline{U}_2 - \underline{U}_3$; $\underline{U}_{31} = \underline{U}_3 - \underline{U}_1$

componentele simetrice ale tensiunilor din (7.2.26) rezulta:

$$\underline{U}_{ld} = \frac{1}{3}\left[(\underline{U}_1 - \underline{U}_2) + a(\underline{U}_2 - \underline{U}_3) + a^2(\underline{U}_3 - \underline{U}_1)\right] \quad (7.2.27)$$

$$\underline{U}_{li} = \frac{1}{3}\left[(\underline{U}_1 - \underline{U}_2) + a^2(\underline{U}_2 - \underline{U}_3) + a(\underline{U}_3 - \underline{U}_1)\right] \quad (7.2.28)$$

Exprimând $\underline{U}_1$, $\underline{U}_2$, $\underline{U}_3$, in functie de componentele lor simetrice, cu relatia (7.2.18) rezulta:

$$\underline{U}_{ld} = (1 - a^2)\underline{U}_d = \sqrt{3}e^{j\frac{\pi}{6}}\underline{U}_d \quad (7.2.29)$$

$$\underline{U}_{li} = (1 - a)\underline{U}_i = \sqrt{3}e^{-j\frac{\pi}{6}}\underline{U}_i \quad (7.2.30)$$

Relatiile de mai sus se pot pune sub forma:

$$\underline{U}_d = \frac{1}{\sqrt{3}}\underline{U}_{ld}e^{-j\frac{\pi}{6}}; \quad \underline{U}_i = \frac{1}{\sqrt{3}}\underline{U}_{li}e^{j\frac{\pi}{6}} \quad (7.2.31)$$

cu valorile efective:

$$U_d = \frac{U_{ld}}{\sqrt{3}}; \quad U_i = \frac{U_{li}}{\sqrt{3}} \quad (7.2.32)$$

care exprima relatiile dintre componentele simetrice directe si inverse ale tensiunilor de faza si de linie la un circuit trifazat cu conexiunea in stea.

Pentru un receptor având conexiunea in triunghi

$$I_{ld} = \sqrt{3}\,I_d; \quad I_{li} = \sqrt{3}Ii \quad (7.2.33)$$

Obs. Intr-un sistem trifazat cu fir neutru, curentul I_N contine numai componenta omopolara multiplicata cu 3.

$$I_N = 3I_h \quad (7.2.34)$$

3. Nesimetria unui sistem de marimi trifazice se apreciaza prin parametrii:

– gradul de disimetrie (ε_i) definit ca raportul valorilor efective ale componentei inverse si a celei directe

$$\varepsilon_i = \frac{U_i}{U_d} \quad (7.2.35)$$

– gradul de asimetrie (ε_h) definit ca raportul valorilor efective ale componentei omopolare si a celei directe

$$\varepsilon_h = \frac{U_h}{U_d} \tag{7.2.36}$$

Practic, un sistem de tensiuni sau de curenti este considerat simetric atunci când valorile lui ε_i si ε_h sunt sub 5%.

7.2.2.1.2. Utilizarea metodei componentelor simetrice la calculul circuitelor trifazate echilibrate alimentate cu tensiuni nesimetrice

Studiul regimurilor nesimetrice din circuitele trifazate liniare cu ajutorul metodei componentelor simetrice, se face pe baza teoremei superpozitiei. Se studiaza separat fiecare din regimurile corespunzatoare câte unuia din sistemele componente simetrice si apoi se suprapun efectele lor având in vedere ca in orice circuit echilibrat sistemele componente simetrice de succesiune directa, inversa si omopolara sunt independente intre ele.

a) Receptor trifazat echilibrat in stea, cu fir neutru, fara cuplaje mutuale

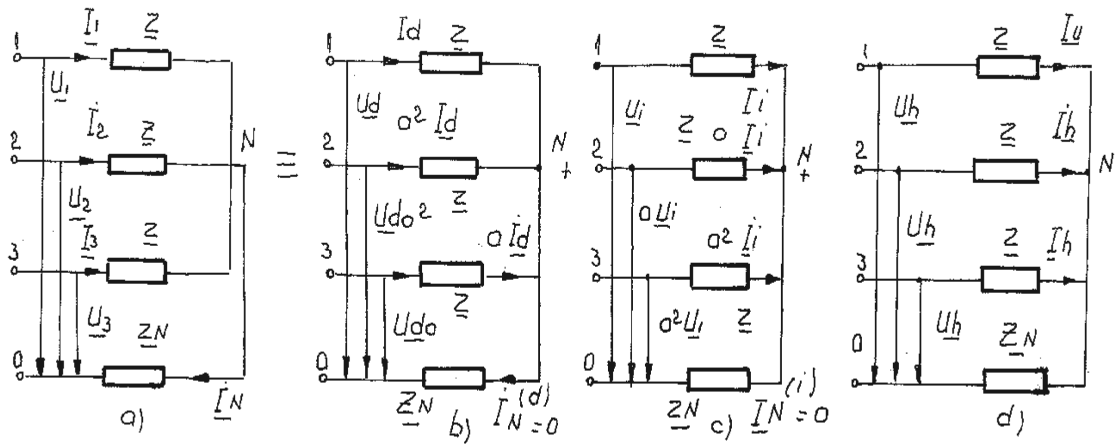


Fig. 7.2.8

Descompunând sistemul de tensiuni in trei sisteme componente trifazate simetrice, aplicarea teoremei superpozitiei conduce la studierea regimurilor simetrice: directe (fig. 7.2.8.b), inverse (fig. 7.2.8.c) si omopolare (fig. 7.2.8.d).

Pentru cele trei scheme, tensiunea primei faze a retelei de alimentare se exprima prin relatiile:

$$\underline{U}_d=\underline{Z}\underline{I}_d;\quad \underline{U}_i=\underline{Z}\underline{I}_i;\quad \underline{U}_h=(\underline{Z}+3\underline{Z}_N)\underline{I}_h \tag{7.2.37}$$

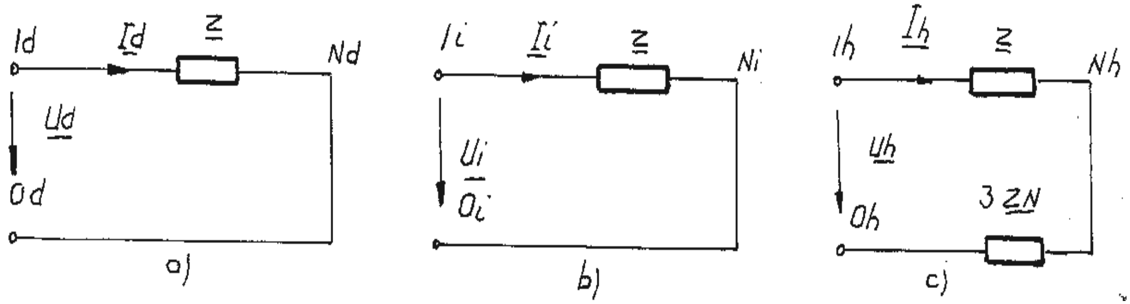


Fig. 7.2.9

Acestor trei relatii le corespund schemele echivalente monofilare de succesiune directa, inversa si omopolara cf. fig. 7.2.9.

Se determina $\underline{U}_d$, $\underline{U}_i$, $\underline{U}_h$ conform relatiilor (7.2.26).

Impedantele din cele trei sisteme, au valorile:

$\underline{Z}_d=\underline{Z}$; $\underline{Z}_i=\underline{Z}$; $\underline{Z}_h=\underline{Z}+3\underline{Z}_N$ (7.2.38)

si se numesc impedanta directa, impedanta inversa si omopolara.

Se calculeaza apoi cu relatiile (7.2.18) caderile de tensiune si curentii nesimetrici in functie de componentele simetrice.

$\underline{I}_d=\underline{U}_d/\underline{Z}$; $\underline{I}_i=\underline{U}_i/\underline{Z}$; $\underline{I}_h=\underline{U}_h/\underline{Z}+3\underline{Z}_N \Rightarrow \underline{I}_1=\underline{I}_h+\underline{I}_d+\underline{I}_i$ etc.

7.2.2.1.3. Utilizarea metodei componentelor simetrice la calculul circuitelor trifazate dezechilibrate alimentate cu tensiuni nesimetrice

Un sistem simetric sau nesimetric de tensiuni aplicat unui circuit dezechilibrat stabileste curenti nesimetrici. Componentele simetrice de succesiune directa, inversa si omopolara nu sunt independente si ca urmare relatiile dintre ele fiind complicate, nu se pot stabili scheme monofazate ca in cazul circuitelor echilibrate.

7.2.2.1.4. Calculul unor regimuri de avarie nesimetrice ale retelelor trifazate

Principalele avarii in retelele trifazate care produc regimuri nesimetrice sunt intreruperile de faza si scurtcircuitele (cu sau fara punere la pamânt). Intreruperile pot fi: monofazate, bifazate sau trifazate prin receptoare trifazate cu impedante statice infinite sau nule. Scurtcircuitele pot fi monofazate, bifazate (fara sau cu punere la pamânt) si trifazate (fara punerea la pamânt sau punere). Ca si intre ruperile de faza, scurtcircuitele se modeleaza cu impedante statice si infinite.

Avariile pot interveni si combinat.

Exemple:

a) Scurtcircuit net sau cu arc pe faza 1 si intreruperea fazelor 2 si 3.

Reteaua se compune din partea echilibrata (Re) si un receptor trifazat dezechilibrat de impedante: $\underline{Z}_1=0$; $\underline{Z}_2=\underline{Z}_3=\infty$ (fig. 7.2.10.a).

Ecuatiile de lucru:

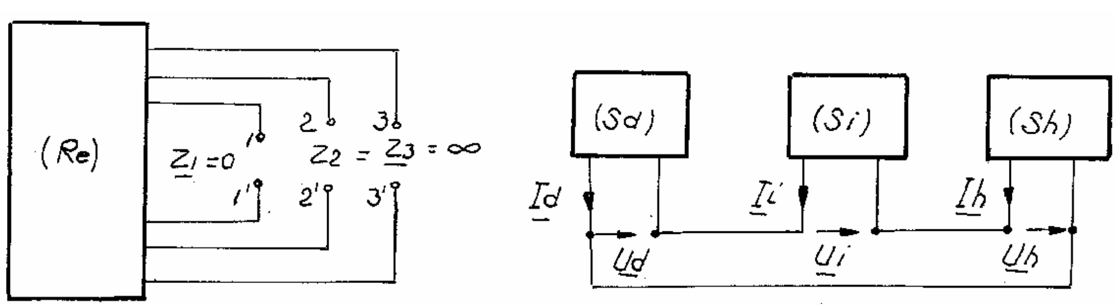
$\underline{U}_1=0$, $\underline{I}_2=\underline{I}_3=0$ (7.2.39)

Cu relatiile (7.2.22) se deduc relatiile dintre componente

$\underline{U}_d+\underline{U}_i+\underline{U}_h=0$ (7.2.40)

$a^2\underline{I}_d+a\underline{I}_i+\underline{I}_h=0$

$a\underline{I}_d+a^2\underline{I}_i+\underline{I}_h=0$ (7.2.41)



a) b)

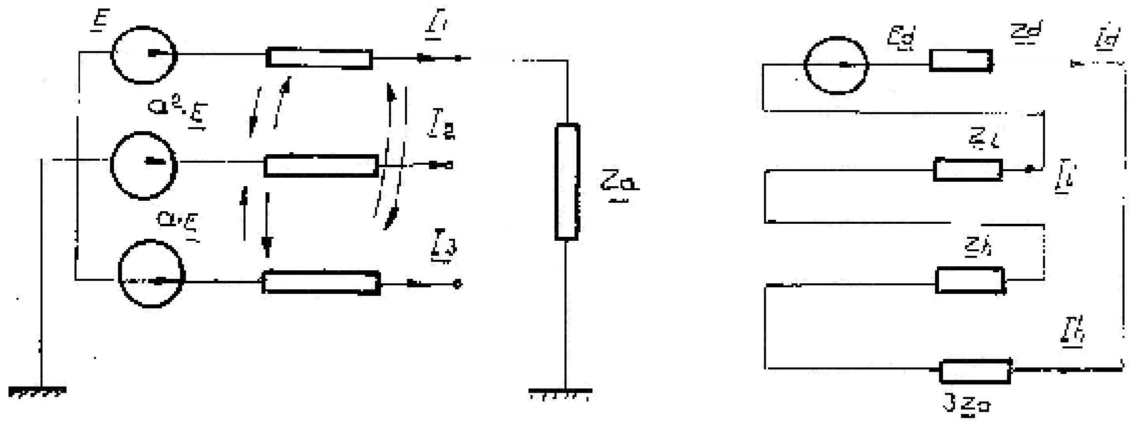
Fig. 7.2.10

Din relatiile (7.2.41) rezulta:

$\underline{I}_d=\underline{I}_i=\underline{I}_h$ (7.2.42)

Pentru a satisface aceasta ultima ecuatie, se leaga in serie schemele de succesiune directa (S_d), inversa (S_i) si omopolara (S_h) si in conformitate cu rel. (7.2.40) se scutcircuiteaza bornele (fig. 7.2.10.b).

Daca scurtcircuitul monofazat cu arc este la bornele unui generator trifazat cu t.e.m. de faza simetrice: $\underline{E}=\underline{E}_d$; $\underline{E}_i=\underline{E}_h=0$ si impedantele dinamice: $\underline{Z}_d$, $\underline{Z}_i$, $\underline{Z}_h$ (fig. 7.2.11.a).



a) b)

Fig. 7.2.11

notând cu $\underline{Z}_a$ impedanta arcului, receptorul trifazat dezechilibrat echivalent scurtcircuitului are impedantele statice.

$\underline{Z}_1=0$; $\underline{Z}_2=\underline{Z}_3=\infty$; $\underline{Z}_N=\underline{Z}_a$.

Schema monofazata directa (S_d) contine generatorul de t.e.m. $\underline{E}$ in serie cu impedanta $\underline{Z}_d$; schema inversa (S_i) contine numai impedanta Z_i, iar schema omopolara (S_h) are conectate in serie impedantele $\underline{Z}_h$ si $3\underline{Z}_a$ (fig. 7.2.11.b).

Ecuatiilor de functionare de forma $\underline{U}_1=\underline{Z}_a\underline{I}_1$; $\underline{I}_2=\underline{I}_3=0$ le corespund ecuatiile cu componente simetrice:

$\underline{U}_d+\underline{U}_i+\underline{U}_h=\underline{Z}_a(\underline{I}_d+\underline{I}_i+\underline{I}_h)$: dar $\underline{I}_d=\underline{I}_i=\underline{I}_h$.

de unde:

$$\underline{I}_d=\underline{I}_i=\underline{I}_h=\frac{\underline{U}_d+\underline{U}_i+\underline{U}_h}{3\underline{Z}_a} \qquad (7.2.43)$$

Cum schemele monofilare se leaga in serie (fig. 7.2.11.b) rezulta

$$\underline{I}_d=\underline{I}_i=\underline{I}_h=\frac{\underline{E}_d}{\underline{Z}_d+\underline{Z}_i+\underline{Z}_h+3\underline{Z}_a} \qquad (7.2.44)$$

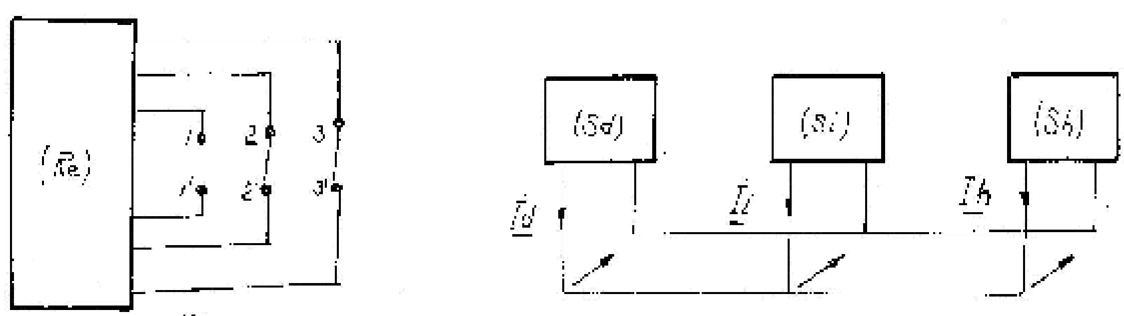
Cu relatia (7.2.22) curentul de scurtcircuit este:

$$\underline{I}_{1sc}=\underline{I}_d+\underline{I}_i+\underline{I}_h=\frac{3\underline{E}_d}{\underline{Z}_d+\underline{Z}_i+\underline{Z}_h+3\underline{Z}_a} \qquad (7.2.45)$$

curentii $\underline{I}_2$, $\underline{I}_3$, fiind nuli.

Curentul de scurtcircuit in cazul punerii nete la pamânt se obtine cu relatiile (7.2.45) facând $\underline{Z}_a=0$.

b) Scurtcircuit net bifazat izolat si intreruperea unei faze



a) b)

Fig. 7.2.12

Se considera scurtcircuit in fazele 2 si 3, fara punere la pamânt si faza 1 intrerupta. Reteaua se compune din partea echilibrata (Re) si din receptorul trifazat dezechilibrat care modeleaza avaria, cu impedantele: $\underline{Z}_i=\infty$; $\underline{Z}_2=\underline{Z}_3=0$ (fig. 7.2.12.a).

Ecuatiile au formele:

$$\underline{I}_1=0,\ \underline{U}_2=\underline{U}_3=0 \tag{7.2.46}$$

carora le corespund ecuatiile intre componentele simetrice.

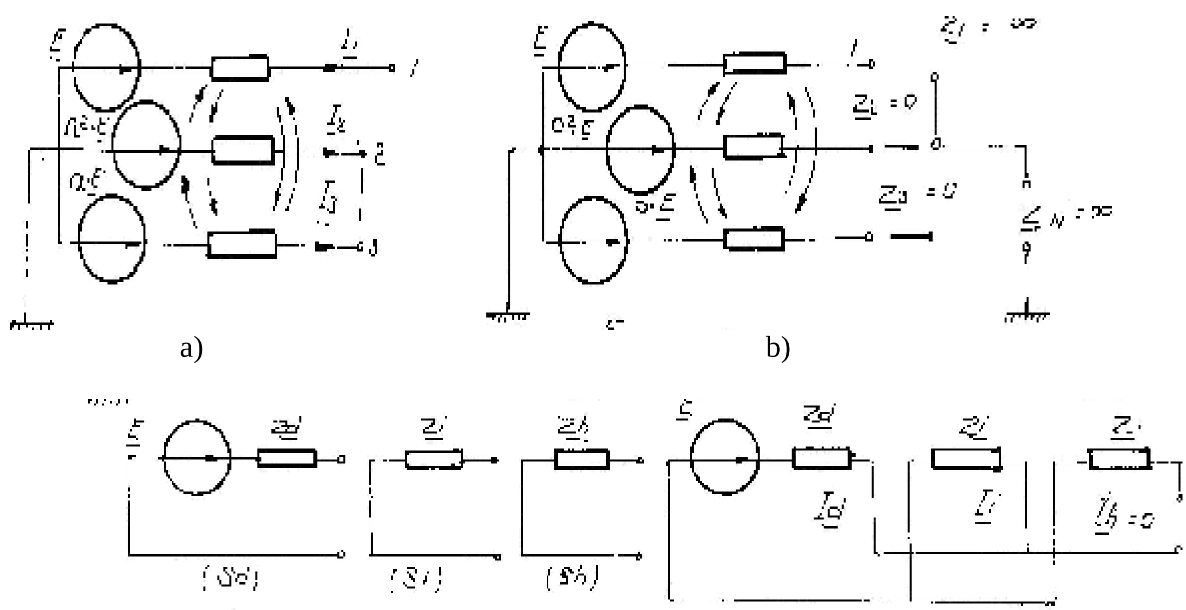
$$\underline{I}_d+\underline{I}_i+\underline{I}_h=0 \tag{7.2.47}$$

$$\underline{U}_d=\underline{U}_i=\underline{U}_h \tag{7.2.48}$$

satisfacute in cazul legarii in paralela schemelor (fig. 7.2.12.b).

Se considera scurtcircuitul ca fiind la bornele unui generator trifazat cu t.e.m. simetrice: $\underline{E}=\underline{E}_d$ (fig. 7.2.13.a), receptorul trifazat echivalent avariei având impedantele $\underline{Z}_1=\infty$; $\underline{Z}_2=\underline{Z}_3=0$, $\underline{Z}_N=\infty$ (fig. 7.2.13.b).

Schemele monofazate (S_d), (S_i), (S_h) sunt redate in fig. 7.2.13.c si se conecteaza in paralel (fig. 7.2.13.d) conform ecuatiilor (7.2.46÷7.2.48), de unde:



a) b) c) d)

Fig. 7.2.13

$$\underline{I}_d=-\underline{I}_i=\frac{\underline{E}}{\underline{Z}_d+\underline{Z}_i}\ ;\ \underline{I}_h=0 \tag{7.2.49}$$

Conform relatiilor de forma (7.2.22) rezulta:

$\underline{I}_1=\underline{I}_d+\underline{I}_i=0.$

$$\underline{I}_2=-\underline{I}_3=(a^2-a)\underline{I}_d=-j\frac{\sqrt{3}\underline{E}}{\underline{Z}_d+\underline{Z}_i} \tag{7.2.50}$$