Lucrarea Nr. 7. Circuite trifazate alimentate cu tensiuni nesimetrice

1. Chestiuni teoretice

Un sistem trifazat nesimetric de mărimi sinusoidale se descompune în trei sisteme de mărimi sinusoidale: un sistem de succesiune directă, în care fiecare mărime e defazată înaintea celei care îi succede cu 2π/3; un sistem de succesiune inversă, în care fiecare mărime e defazată în urma celei care îi succede cu 2π/3; un sistem omopolar, în care mărimile au amplitudini egale şi sunt în fază.

Fie $y_1(t)$, $y_2(t)$, $y_3(t)$, sistemul trifazat nesimetric,

$$y_1(t) = \sqrt{2}Y_1 \sin(\omega t + \gamma_1)\,;\ \ y_2(t) = \sqrt{2}Y_2 \sin(\omega t + \gamma_2)\,;\ \ y_3(t) = \sqrt{2}Y_3 \sin(\omega t + \gamma_3)$$

reprezentat în complex (figura 1a):

$$\underline{Y}_1 = \underline{Y}_1 e^{j\gamma_1}\,;\ \underline{Y}_2 = \underline{Y}_2 e^{j\gamma_2}\,;\ \underline{Y}_3 = \underline{Y}_3 e^{j\gamma_3}$$

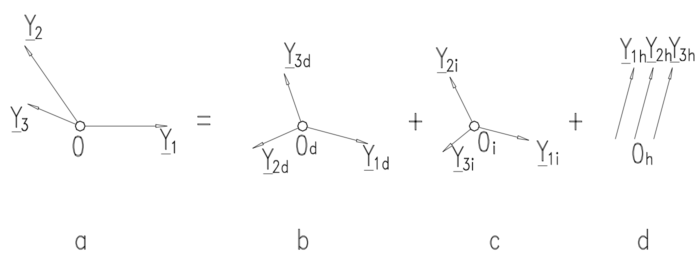


Figura 1a

Se notează cu: $y_{1d}(t)$, $y_{2d}(t)$, $y_{3d}(t)$, sistemul trifazat simetric direct,

$$y_{1d}(t) = \sqrt{2}Y_d \sin(\omega t + \gamma_d)\,;$$
$$y_{2d}(t) = \sqrt{2}Y_d \sin\left(\omega t + \gamma_d - \frac{2\pi}{3}\right);$$
$$y_{3d}(t) = \sqrt{2}Y_d \sin\left(\omega t + \gamma_d - \frac{4\pi}{3}\right)$$

cu: $y_{1i}(t)$, $y_{2i}(t)$, $y_{3i}(t)$, sistemul trifazat simetric invers,

$$y_{1i}(t) = \sqrt{2}Y_i \sin(\omega t + \gamma_i)\,;$$
$$y_{2i}(t) = \sqrt{2}Y_i \sin\left(\omega t + \gamma_i + \frac{2\pi}{3}\right);$$
$$y_{3i}(t) = \sqrt{2}Y_i \sin\left(\omega t + \gamma_i + \frac{4\pi}{3}\right)$$

şi cu: $y_{1h}(t)$, $y_{2h}(t)$, $y_{3h}(t)$, sistemul trifazat simetric homopolar,

$$y_{1h}(t) = \sqrt{2}Y_h \sin(\omega t + \gamma_h)\,;$$
$$y_{2h}(t) = \sqrt{2}Y_h \sin(\omega t + \gamma_h)\,;$$
$$y_{3h}(t) = \sqrt{2}Y_h \sin(\omega t + \gamma_h)$$

cu imaginile în complex (fig.1 b, c, d),

$$\underline{Y}_{1d} = \underline{Y}_d\ ;\ \underline{Y}_{2d} = a^2\underline{Y}_d\ ;\ \underline{Y}_{3d} = a\underline{Y}_d$$
$$\underline{Y}_{1i} = \underline{Y}_i\ ;\ \underline{Y}_{2i} = a\underline{Y}_i\ ;\ \underline{Y}_{3i} = a^2\underline{Y}_i$$
$$\underline{Y}_{1h} = \underline{Y}_h\ ;\ \underline{Y}_{2h} = \underline{Y}_h\ ;\ \underline{Y}_{3h} = \underline{Y}_h$$

În conformitate cu teorema Stokvis - Fortesque, relațiile dintre componentele corespunzătoare ale sistemelor direct, invers şi omopolar sunt:

$$y_1(t) = y_{1d}(t) + y_{1i}(t) + y_{1h}(t);$$
$$y_2(t) = y_{2d}(t) + y_{2i}(t) + y_{2h}(t);$$
$$y_3(t) = y_{3d}(t) + y_{3i}(t) + y_{3h}(t);$$

respectiv în complex:

$$\underline{Y}_1(t) = \underline{Y}_{1d}(t) + \underline{Y}_{1i}(t) + \underline{Y}_{1h}(t);$$
$$\underline{Y}_2(t) = \underline{Y}_{2d}(t) + \underline{Y}_{2i}(t) + \underline{Y}_{2h}(t);$$
$$\underline{Y}_3(t) = \underline{Y}_{3d}(t) + \underline{Y}_{3i}(t) + \underline{Y}_{3h}(t);$$

Cele trei mărimi ale fiecărui sistem direct şi invers se exprimă cu ajutorul operatorului a astfel,

$$Y_{1d} = Y_d \ ; \ Y_{2d} = a^2 Y_d \ ; \ Y_{3d} = aY_d$$

$$Y_{1i} = Y_i \ ; \ Y_{2i} = aY_i \ ; \ Y_{3i} = a^2 Y_i$$

în care fazorii $\underline{Y}_d$, $\underline{Y}_i$ şi $\underline{Y}_h$, se numesc componenta directă, inversă şi omopolară ale sistemului trifazat nesimetric $\underline{Y}_1$, $\underline{Y}_2$ şi $\underline{Y}_3$.

Analiza circuitelor trifazate echilibrate sub tensiuni nesimetrice

Analiza regimurilor nesimetrice din circuitele trifazate liniare cu metoda componentelor simetrice se face pe baza teoremei superpoziției astfel: se consideră separat regimurile stabilite de componentele directe şi inverse şi omopolare ale tensiunilor şi apoi se suprapun răspunsurile corespunzătoare. Circuitele fiind echilibrate şi componentele tensiunilor şi curenților alcătuind sisteme simetrice, este suficient să se calculeze numai pentru una din faze, utilizând scheme monofilare. Se obțin în acest fel schemele de succesiune directă, inversă şi omopolară, iar din superpoziția lor se deduc răspunsurile din rețea.

a. Elementele statice şi dinamice. Se consideră trei elemente identice cuplate magnetic (fig.2, a), la bornele cărora sistemele componentelor de tensiune directe $\underline{U}_d$, $a^2\underline{U}_d$, $a\underline{U}_d$, inverse $\underline{U}_i$, $a\underline{U}_i$, $a^2\underline{U}_I$ şi omopolare $\underline{U}_h$, $\underline{U}_h$, $\underline{U}_h$ stabilesc curenți de succesiune directă $\underline{I}_d$, $a^2\underline{I}_d$, $a\underline{I}_d$ inverse $\underline{I}_i$, $a\underline{I}_i$, $a^2\underline{I}_I$ şi omopolare $\underline{I}_h$, $\underline{I}_h$, $\underline{I}_h$ (figura 2 b, c, d).

Dacă rapoartele dintre fazorii componentelor de tensiune prin fazorii componentelor de curent sunt:

$$\frac{\underline{U}_d}{\underline{I}_d} = \frac{\underline{U}_i}{\underline{I}_i} = \underline{Z} - \underline{Z}_m \ ; \ \frac{\underline{U}_h}{\underline{I}_h} = \underline{Z} + 2\underline{Z}_m$$

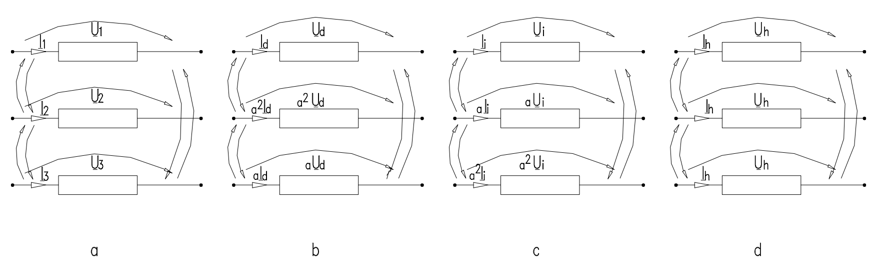


Figura 2

Elementele se numesc statice şi sunt caracterizate de impedanțele complexe statice proprie $\underline{Z}$ şi mutuală $\underline{Z}_m$. Elementele se numesc dinamice dacă rapoartele fazorilor componentelor de tensiune prin fazorii componentelor de curent sunt diferite,

$$\frac{\underline{U}_d}{\underline{I}_d} = \underline{Z}_d \ ; \ \frac{\underline{U}_i}{\underline{I}_i} = \underline{Z}_i \ ; \ \frac{\underline{U}_h}{\underline{I}_h} = \underline{Z}_h$$

şi sunt caracterizate de impedanțele complexe dinamice directă $\underline{Z}_d$, inversă $\underline{Z}_i$ şi omopolară $\underline{Z}_h$.

Rezistoarele, bobinele şi condensatoarele sunt elemente statice. Înfăşurările statoarelor şi rotoarelor maşinilor electrice aflându-se în mişcare relativă nu pot fi caracterizate prin inductivități mutuale statice; de exemplu, inductivitatea mutuală L_{msr} dintre o înfăşurare statorică s şi una rotorică r nu este egală cu inductivitatea

L_{mrs} şi în consecinţă generatoarelor şi motoarelor electrice nu li se aplică teorema reciprocităţii. Un generator electric este caracterizat de tensiunile electromotoare directă $\underline{E}_d$, inversă $\underline{E}_i$ şi omopolară $\underline{E}_h$ şi de impedanţele dinamice $\underline{Z}_d$, $\underline{Z}_i$, $\underline{Z}_h$, iar motorul electric este caracterizat de aceasta din urmă.

Practic, părţile reale ale componentelor dinamice ale maşinilor electrice sunt neglijabile în raport cu părţile imaginare şi impedanţele se pot aproxima prin reactanţele corespunzătoare $\underline{X}_d$, $\underline{X}_i$, $\underline{X}_h$. Reactanţele inversă şi omopolară sunt mai mici decât reactanţa directă şi se dau sub formă de procente în raport cu $\underline{X}_d$.

b. Receptor trifazat echilibrat cu elementele statice, fără cuplaje magnetice, conectat în stea, cu fir neutru. Fie circuitul trifazat echilibrat constituit din trei elemente statice de impedanţe $\underline{Z}$ conectate în stea, cu fir neutru de impedanţă $\underline{Z}_N$ (figura 3), sub tensiuni la borne nesimetrice $\underline{U}_{10}$, $\underline{U}_{20}$, $\underline{U}_{30}$ de componente $\underline{U}_d$, $\underline{U}_i$, şi $\underline{U}_h$.

În conformitate cu teorema superpoziţiei, curenţii $\underline{I}_1$, $\underline{I}_2$, $\underline{I}_3$ şi $\underline{I}_N$, se obţin însumând curenţii care se stabilesc dacă se consideră că la bornele circuitului se aplică tensiunile directe, inverse şi omopolare (figura 3 b, c, d).

În regimurile simetrice direct şi invers, componentele curenţilor $\underline{I}_d$ şi $\underline{I}_I$ prin impedanţele primei faze au expresiile:

$$\underline{I}_d = \frac{\underline{U}_d}{\underline{Z}}\ ;\ \underline{I}_i = \frac{\underline{U}_i}{\underline{Z}}$$

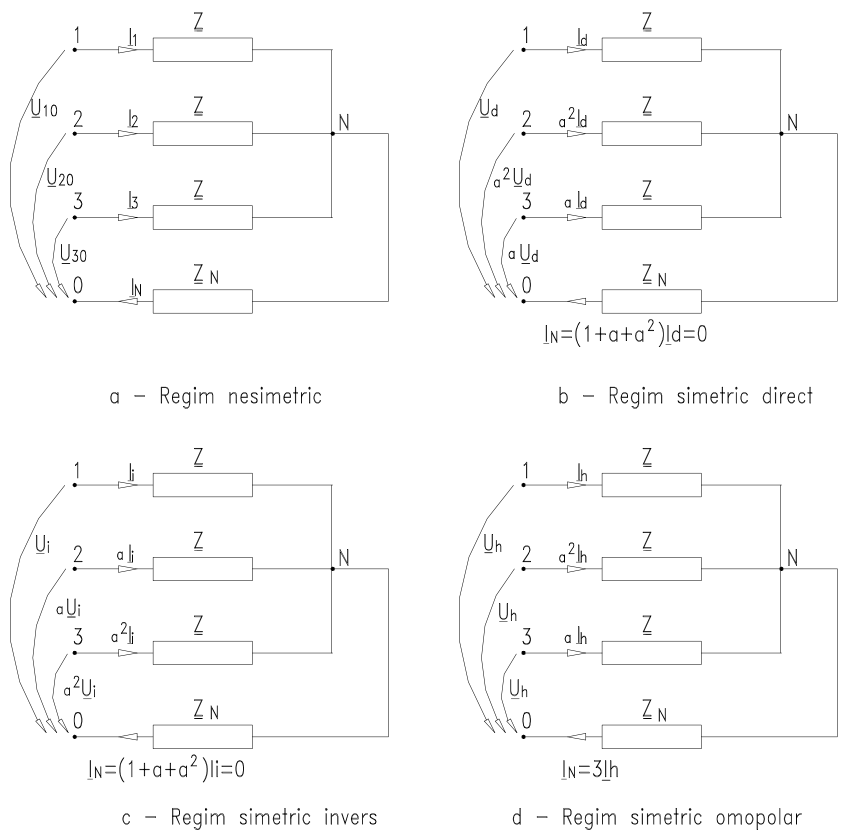


Figura 3

şi curenţii prin firul neutru sunt nuli. Prin impedanţele celorlalte două faze curenţii se obţin multiplicând pe $\underline{I}_d$ şi $\underline{I}_i$ cu a^2,respectiv cu a, prin urmare e suficient să se calculeze numai pentru una din faze. Schemele corespunzătoare reprezentate în figura 3 b, c se numesc schema de succesiune directă S_d, respectiv schema de succesiune inversă S_i.

În regim simetric omopolar (figura 3d), componenta $\underline{I}_h$ se deduce aplicând teorema a doua a lui Kirchhoff circuitului 1No1.

$$\underline{U}_h = \underline{Z}\underline{I}_h + 3\underline{Z}_N\underline{I}_h$$

din care rezultă:

$$\underline{I}_h = \frac{\underline{U}_h}{\underline{Z} + 3\underline{Z}_N}$$

Schema monofilară conține impedanță $\underline{Z}$ şi impedanța firului neutru $\underline{Z}_N$ multiplicată cu 3 şi se numeşte schema de succesiune omopolară S_h

Introducând expresiile lui $\underline{I}_d$, $\underline{I}_i$ şi $\underline{I}_h$, în relațiile dintre componentele corespunzătoare sistemelor direct, invers şi omopolar, se obțin curenții $\underline{I}_1$, $\underline{I}_2$ şi $\underline{I}_3$.

c. Receptor trifazat echilibrat cu elemente statice fără cuplaje magnetice conectate în stea fără fir neutru (figura 4) Se dau tensiunile de linie nesimetrice $\underline{U}_{12}$, $\underline{U}_{23}$ şi $\underline{U}_{31}$ cu componentele simetrice directă $\underline{U}_{ld}$ şi inversă $\underline{U}_{li}$, componenta omopolară $\underline{U}_{lh}$, fiind nulă.

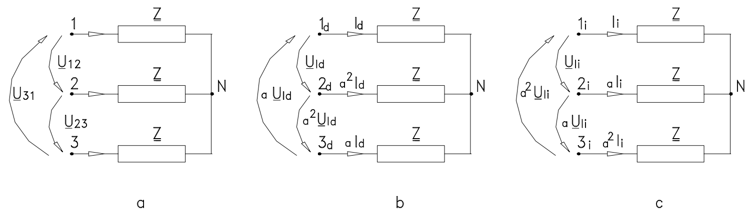


Figura 4

În regim simetric direct componenta directă $\underline{I}_d$ se calculează aplicând a doua teoremă a lui Kirchhoff circuitului $1_dN2_d1_d$,: $\underline{U}_{ld} = \underline{Z}\underline{I}_d - \underline{Z}a^2\underline{I}_d$, din care rezultă:

$$\underline{I}_d = \frac{\underline{U}_{ld}}{(1-a^2)\underline{Z}}$$

Similar, se obține pentru componenta inversă I expresia (figura 4c).

$$\underline{I}_i = \frac{\underline{U}_{li}}{(1-a^2)\underline{Z}}$$

Notând cu $\underline{U}_{fd} = \underline{U}_d$ şi $\underline{U}_{fi} = \underline{U}_i$ componentele de fază corespunzătoare componentelor de linie.

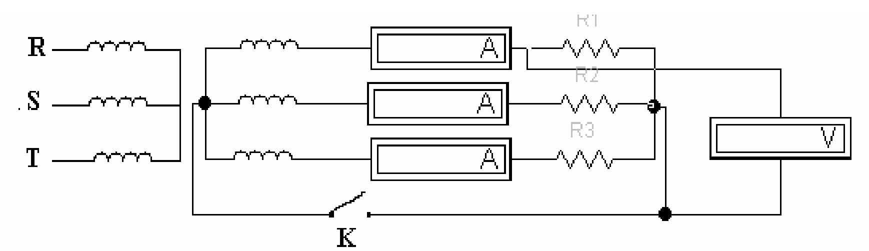
$$\underline{U}_d = \frac{\underline{U}_{ld}}{1-a^2} = \frac{1}{\sqrt{3}} e^{-j\pi/6} \underline{U}_{ld} \ ; \ \underline{U}_i = \frac{\underline{U}_{li}}{1-a^2} = \frac{1}{\sqrt{3}} e^{j\pi/6} \underline{U}_{li}$$

expresiile componentelor directă şi inversă, devin:

$$\underline{I}_d = \frac{\underline{U}_d}{\underline{Z}} \ ; \ \underline{I}_i = \frac{\underline{U}_i}{\underline{Z}}$$

Schemele de succesiune directă S_d şi inversă S_t sunt identice cu schemele corespunzătoare ale receptorului trifazat cu fir neutru (figura 3b, c).

2. Schema de montaj



Se vor determina experimental şi verifica prin simulare numerică următoarele cazuri de funcționare

a) receptor echilibrat cu neutru conectat
b) receptor echilibrat fără conductor de nul

Observații:

Asimetria realizată din transformatorul trifazat se datorează alimentării cu valori diferite ale tensiunilor de fază. Prin simulare numerică se studiază şi consumatorul dezechilibrat.

3. Date experimentale

- Se realizează montajul din figură, receptorul fiind rezistiv echilibrat iar nesimetria se obține din secundarul transformatorului prin alimentarea fazei a doua cu o tensiune redusă (aproximativ jumătate din a fazei 1).
- Se fac două determinări ,cu si fără conductor de nul iar datele se completează în tabelul 1.
- Se dezechilibrează consumatorul şi se efectuează aceleaşi determinări
- Observație In tabelele de mai jos primul rând conține date experimentale iar al doilea datele calculate

Tabelul 1. Receptor echilibrat

	I_1	I_2	I_3	I_0	I_d	I_I	I_h	U_1	U_2	U_3	U_0	U_d	U_i	U_h	R_1	R_2	R_3
1																	
2																	

Tabelul 2. Receptor dezechilibrat

	I_1	I_2	I_3	I_0	I_d	I_I	I_h	U_1	U_2	U_3	U_0	U_d	U_i	U_h	R_1	R_2	R_3
1																	
2																	