

7. REȚELE ELECTRICE TRIFAZATE

7.1. REȚELE ELECTRICE TRIFAZATE IN REGIM PERMANENT SINUSOIDAL

7.1.1. Rețea trifazată. Sistem trifazat de tensiuni și curenți

Ansamblul format din „m” circuite electrice monofazate în care acționează „m” tensiuni electromotoare de aceeași frecvență, dar cu faze inițiale diferite se numește rețea electrică polifazată. Sistemele electroenergetice sunt constituite din rețele electrice trifazate ($m=3$).

Tensiunile, respectiv curenții, din rețeaua trifazată constituie sistemul trifazat de tensiuni, respectiv sistemul trifazat de curenți. Dacă valorile efective (sau amplitudinile) tensiunilor trifazate sunt egale și dacă defazajele dintre oricare două tensiuni succesive sunt egale cu ($\frac{2\pi}{3}$ radiani – 120°), atunci sistemul

trifazat de tensiuni este simetric, altfel sistemul trifazat este nesimetric.

Producerea t.e.m. trifazate în centralele electrice se realizează cu ajutorul generatoarelor sincrone trifazate.

Valorile momentane (instantanee) ale tensiunilor trifazate simetrice se exprimă cu relațiile:

$$\begin{aligned} u_1 &= U_{1m} \sin \omega t \\ u_2 &= U_{2m} \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ u_3 &= U_{3m} \sin(\omega t - 2 \cdot 2\pi/3) \end{aligned} \quad (7.7.1)$$

$$u_3 = U_{3m} \sin(\omega t - 2 \cdot 2\pi/3)$$

unde $U_{1m} = U_{2m} = U_{3m}$ (sau ca valori efective $U_1 = U_2 = U_3$).

Reprezentarea liniară și fazorială a tensiunilor sistemului trifazat este arată în fig. 7.1.1.

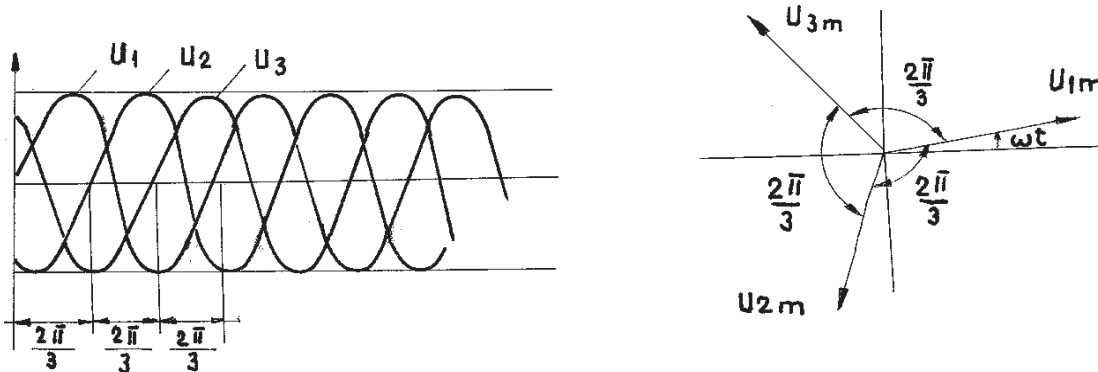


Fig. 7.1.1

Utilizând scrierea în complex simplificată și considerând tensiunea U_1 situată pe axa reală (fig. 7.1.2), cele trei tensiuni trifazate simetrice se exprimă prin relațiile:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= U_1 e^{j0} = U_1 \\ \underline{U}_2 &= U_2 e^{-j\frac{2\pi}{3}} \\ \underline{U}_3 &= U_3 e^{j\frac{2\pi}{3}} = U_3 e^{-j\frac{4\pi}{3}} \end{aligned} \quad (7.1.2)$$

$$\underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_3 = 0 \quad (7.1.3)$$

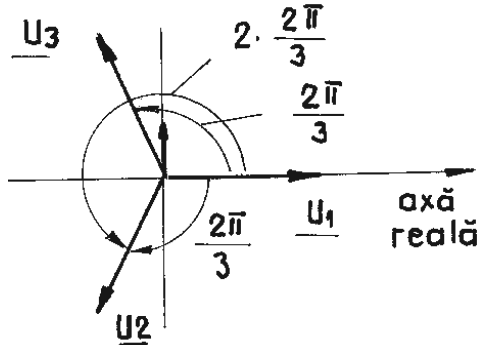


Fig. 7.1.2

Un receptor sau, în general, un consumator trifazat este echilibrat atunci când impedanțele pe cele trei faze sunt egale. În caz contrar, receptorul trifazat este neechilibrat.

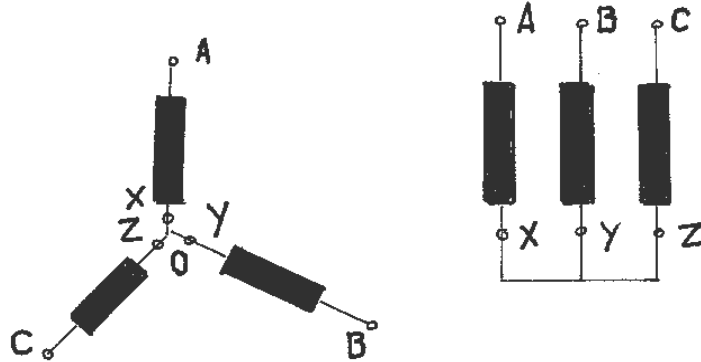
7.1.2. Conexiunea fazelor

a. **Conexiunea in stea** a celor trei faze ale generatorului (sau a receptorului) se realizeaza legând impreuna sfârșitul x, y, z ca in fig. 7.1.3.

Punctul in care se unesc cele trei faze se numeste punctul nul.

Fig. 7.1.3

b. **Conexiunea triunghi** a celor trei faze ale generatorului (sau receptorului) se realizeaza legând impreuna sfârșitul primei faze cu inceputul fazei a doua etc., cf. fig. 7.1.4.



La conexiunea triunghi nu exista punct de nul.

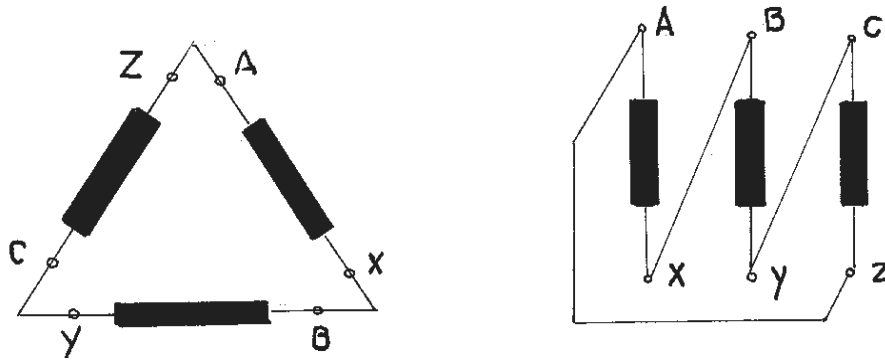


Fig. 7.1.4

7.1.3. Tensiunile si curentii la conexiunile stea si triunghi a fazelor

Atât la conexiunea stea, cât si la conexiunea triunghi a fazelor sursei sau receptorului intervin urmatoarele tensiuni si curenti:

- **Tensiunea de faza** este egala cu diferenta de potential între inceputul si sfârșitul fazei respective.
 - **Tensiunea de linie** este egala cu diferenta de potential între inceputurile a doua faze. Ea apare între conductoarele (fazele) liniei de transport de energie.
 - **Curentul de faza** este curentul care circula prin infasurarea unei faze a sursei sau prin impedanta care formeaza o faza a receptorului.
 - **Curentul de linie** este curentul care circula prin conductoarele liniei de transport între sursa si receptor.
 - **Curentul din conductorul de nul** intervine numai in cazul conexiunilor in stea.
- Aceste tensiuni si curenti sunt diferite la conexiunea in stea fata de conexiunea in triunghi.

7.1.3.1. Tensiunile si curentii la conexiunea stea

Se considera un receptor trifazat cu impedantele $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3$ conectat in stea, alimentat de la o sursa cu conexiunea fazelor, de asemenea, in stea (fig. 7.1.5).

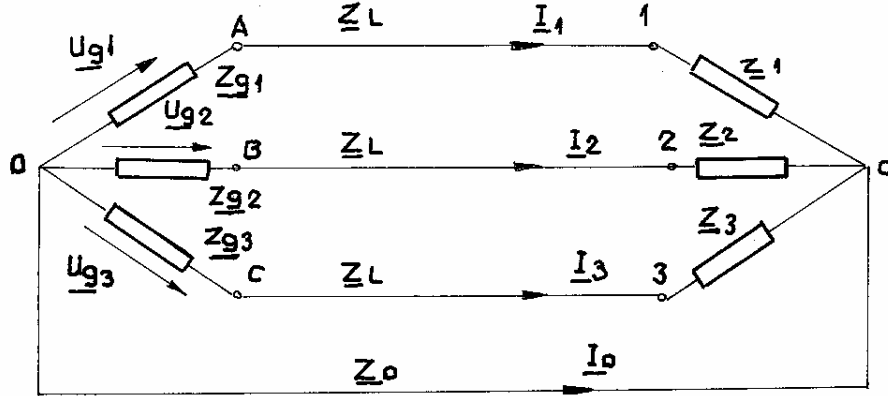


Fig. 7.1.5

Linia de transport este prevazuta cu patru conductoare, trei pentru cele trei faze si al patrulea, conductorul de nul care uneste intre ele, punctele de nul 0 si 0' de la sursa la receptor.

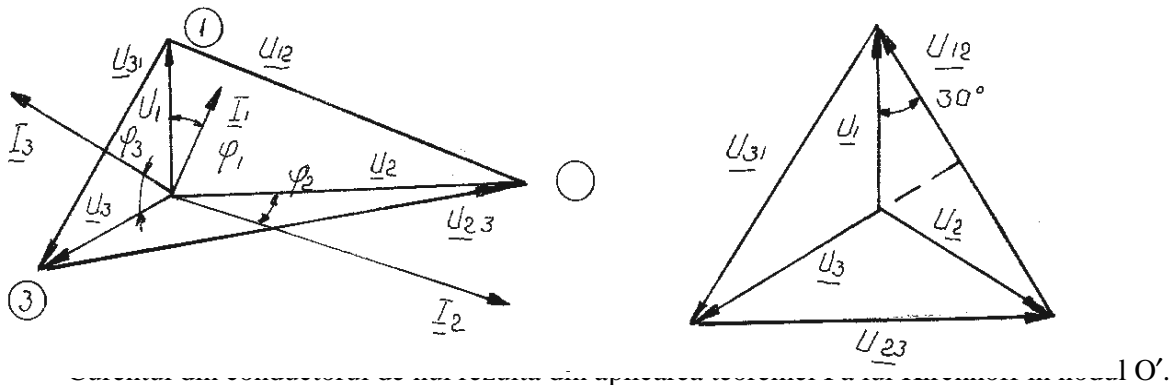
Tensiunile de faza la receptor sunt:

$$\underline{U}_1 = \underline{V}_1 - \underline{V}'_0; \quad \underline{U}_2 = \underline{V}_2 - \underline{V}'_0; \quad \underline{U}_3 = \underline{V}_3 - \underline{V}'_0 \quad (7.1.4)$$

Reprezentând in planul complex aceste trei tensiuni de faza, ele formeaza o stea simetrica sau nesimetrica, dupa cum tensiunile sunt simetrice sau nesimetrice. Curentii de faza care circula prin impedantele $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3$ ale receptorului sunt:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_1}; \quad \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_2}; \quad \underline{I}_3 = \frac{\underline{U}_3}{\underline{Z}_3} \quad (7.1.5)$$

In fig. 7.1.6 sunt reprezentate tensiunile de faza si curentii de faza in caz de nesimetrie (a) si simetrie (b).



$$\underline{I}_0 = -(\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3) = -\left(\frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_1} + \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_2} + \frac{\underline{U}_3}{\underline{Z}_3}\right) \quad (7.1.6)$$

Daca tensiunile de faza sunt simetrice, adica

$\underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_3 = 0$ si sistemul este chilibrat, adica $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z}_3$, rezulta:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 = \underline{I}_3, \quad \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0$$

Tensiunile de linie la receptor vor fi:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{12} &= \underline{V}_1 - \underline{V}_2 = (\underline{V}_1 - \underline{V}'_0) - (\underline{V}_2 - \underline{V}'_0) = \underline{U}_1 - \underline{U}_2 \\ \underline{U}_{23} &= \underline{V}_2 - \underline{V}_3 = (\underline{V}_2 - \underline{V}'_0) - (\underline{V}_3 - \underline{V}'_0) = \underline{U}_2 - \underline{U}_3 \end{aligned} \quad (7.1.7)$$

$$\underline{U}_{31} - \underline{V}_3 - \underline{V}_1 = (\underline{V}_3 - \underline{V}'_0) - (\underline{V}_1 - \underline{V}'_0) = \underline{U}_3 - \underline{U}_1$$

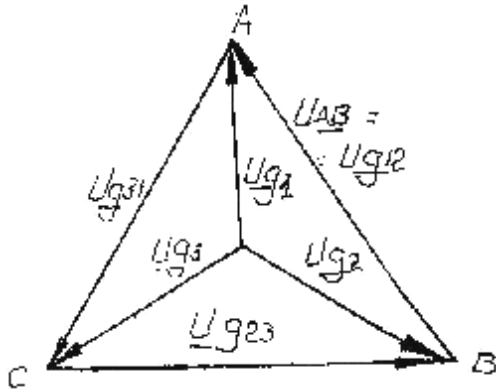
De unde se observa ca suma tensiunilor de linie este nula:

$$\underline{U}_{12} + \underline{U}_{23} + \underline{U}_{31} = 0 \quad (7.1.8)$$

Relatia (7.1.8) arata ca cele trei tensiuni de linie \underline{U}_{12} , \underline{U}_{23} , \underline{U}_{31} formeaza in planul complex un triunghi inchis oarecare daca tensiunile sunt nesimetrice si unul echilateral, daca tensiunile sunt simetrice.

In cazul tensiunilor de linie si faza simetrice avem $\frac{\underline{U}_{12}}{2} = U_1 \cos 30^\circ$, adică $U_{12} = \sqrt{3}U_1$

$$\text{sau } U_1 = \frac{\sqrt{3}}{2}U_f \quad (7.1.9)$$



unde $U_l = \sqrt{3}U_f$ este tensiunea de linie si u_f tensiunea de fază. Valorile acestor tensiuni la rețelele electrice de distribuție de joasă tensiune sunt: $U_f = 220V$ si $U_l = 380V$.

Curentul de linie este egal cu curentul de fază (fig. 7.1.5).

In ceea ce priveste t.e.m. induse pe fază la generator \underline{U}_{g1} , \underline{U}_{g2} , \underline{U}_{g3} , acestea, prin construcția generatorului, sunt simetrice si formeaza steaua din fig. 7.1.7.

Fig. 7.1.7

Tensiunile electromotoare de linie definite prin relațiile:

$$\underline{U}_{g12} = \underline{U}_{g1} - \underline{U}_{g2}; \quad (7.1.10)$$

$$\underline{U}_{g23} = \underline{U}_{g2} - \underline{U}_{g3};$$

$$\underline{U}_{g31} = \underline{U}_{g3} - \underline{U}_{g1};$$

sunt, de asemenea simetrice si formeaza un triunghi echilateral indiferent daca, consumatorul este echilibrat sau nu. Se stabilește legătura dintre tensiunile la receptor si t.e.m. induse la generator. Pe baza schemei din fig. 7.1.5, avem:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{12} &= \underline{V}_1 - \underline{V}_2 = (\underline{V}_1 - \underline{V}_0) - (\underline{V}_2 - \underline{V}_0) = \\ &= [\underline{U}_{g1} - \underline{I}_1(\underline{Z}_{g1} + \underline{Z}_L)] - [\underline{U}_{g2} - \underline{I}_2(\underline{Z}_{g2} + \underline{Z}_L)] \\ \underline{U}_{23} &= \underline{V}_2 - \underline{V}_3 = (\underline{V}_2 - \underline{V}_0) - (\underline{V}_3 - \underline{V}_0) = \\ &= [\underline{U}_{g2} - \underline{I}_2(\underline{Z}_{g2} + \underline{Z}_L)] - [\underline{U}_{g3} - \underline{I}_3(\underline{Z}_{g3} + \underline{Z}_L)] \\ \underline{U}_{31} &= \underline{V}_3 - \underline{V}_1 = (\underline{V}_3 - \underline{V}_0) - (\underline{V}_1 - \underline{V}_0) = \\ &= [\underline{U}_{g3} - \underline{I}_3(\underline{Z}_{g3} + \underline{Z}_L)] - [\underline{U}_{g1} - \underline{I}_1(\underline{Z}_{g1} + \underline{Z}_L)] \end{aligned} \quad (7.1.11)$$

unde \underline{Z}_{g1} , \underline{Z}_{g2} , \underline{Z}_{g3} sunt impedanțele pe fază la generator, iar \underline{Z}_L este impedanța conductoarelor liniei de transport, aceleași pentru toate cele trei faze.

Produsele $\underline{I}_1(\underline{Z}_{g1} + \underline{Z}_L)$; $\underline{I}_2(\underline{Z}_{g2} + \underline{Z}_L)$; $\underline{I}_3(\underline{Z}_{g3} + \underline{Z}_L)$ reprezintă caderile de tensiune pe cele trei faze ale generatorului si liniei de transport, care, in general, sunt mici si pot fi neglijate, iar relațiile (7.1.11) devin:

$$\underline{U}_{12} \approx \underline{U}_{g1} - \underline{U}_{g2} = \underline{U}_{g12}$$

$$\underline{U}_{23} \approx \underline{U}_{g2} - \underline{U}_{g3} = \underline{U}_{g23}$$

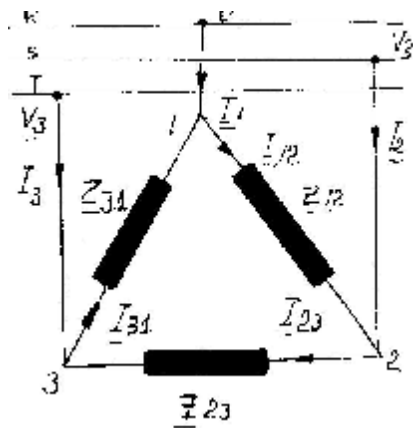
$$\underline{U}_{31} \approx \underline{U}_{g3} - \underline{U}_{g1} = \underline{U}_{g31}$$

$$(7.1.12)$$

Prin urmare, făcând aproximarea de mai sus, indiferent dacă receptorul este echilibrat sau dezechilibrat, tensiunile de linie la receptor sunt simetrice si formeaza un triunghi echilateral. In practica se poate accepta ca tensiunile de linie la receptor sunt simetrice.

7.1.3.2. Tensiunile si curentii la conexiunea triunghi

Se considera un receptor trifazat cu impedanțele \underline{Z}_{12} , \underline{Z}_{23} , \underline{Z}_{31} conectate in triunghi si alimentat de la o rețea de c.a. (fig. 7.1.8).



Tensiunile de faza sunt egale cu tensiunile de linie, dar curenții de linie $\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_3$ și curenții de faza $\underline{I}_{12}, \underline{I}_{23}, \underline{I}_{31}$ sunt diferiți. Curenții de faza se calculează:

Fig. 7.1.8

$$\underline{I}_{12} = \frac{\underline{U}_{12}}{\underline{Z}_{12}}; \underline{I}_{23} = \frac{\underline{U}_{23}}{\underline{Z}_{23}}; \underline{I}_{31} = \frac{\underline{U}_{31}}{\underline{Z}_{31}}$$

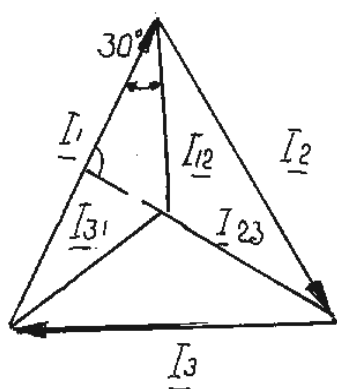
Între curenții de linie și cei de faza există relațiile:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{12} - \underline{I}_{31}; \underline{I}_2 = \underline{I}_{23} - \underline{I}_{12}; \underline{I}_3 = \underline{I}_{31} - \underline{I}_{23} \quad (7.1.14)$$

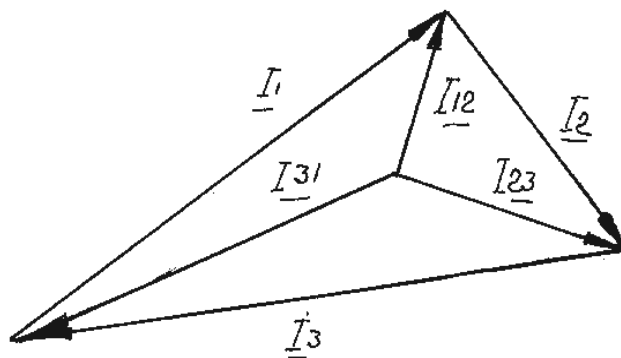
Având în vedere relațiile (7.1.14), întotdeauna suma curenților de linie este nulă, formând împreună un triunghi:

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0 \quad (7.1.15)$$

Dacă tensiunile de linie sunt simetrice și receptorul este echilibrat ($\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{23} = \underline{Z}_{31}$) triunghiul curenților de linie este echilateral, iar curenții de faza formează o stea simetrică (fig. 7.1.9.a).



a)



b)

Fig. 7.1.9

Legătura dintre curenții de linie și cei de faza se exprimă prin relația $\frac{I_1}{2} = I_{12} \cos 30^\circ$, adică

$$I_1 = \sqrt{3} I_{12} \text{ sau}$$

$$I_1 = \sqrt{3} I_f \quad (7.1.16)$$

În caz de simetrie, la conexiunea triunghi, curentul de linie I_L este de $\sqrt{3}$ ori mai mare decât curentul de faza I_f .

În caz de nesimetrie, sau dezechilibru, curenții la conexiunea triunghi sunt nesimetrice (fig. 7.1.9.b).