
REGIMURI NESIMETRICE ȘI SPECIALE ALE TRANSFORMATOARELOR

Metoda componentelor simetrice

METODA COMPONENTELOR SIMETRICE

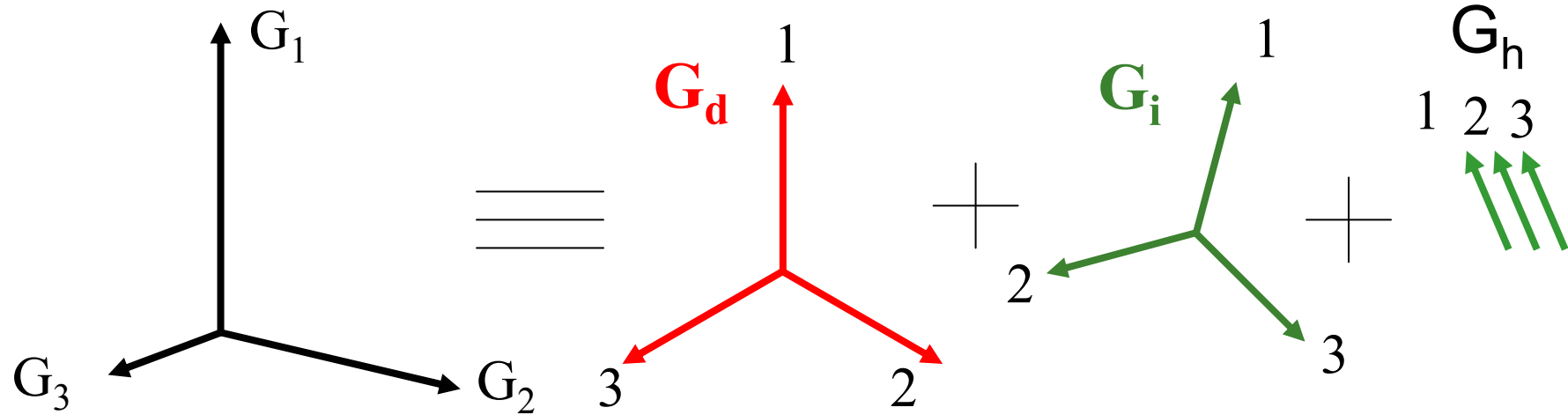
■ Ipoteze:

- circuitul magnetic este liniar,
- se poate aplica principiul superpoziției,
- parametrii mașinii nu variază,
- puterea rețelei este foarte mare,

Un sistem trifazat nesimetric se poate descompune
in 3 sisteme simetrice:

- succesiune directă
 - succesiune inversă
 - homopolară
-

Metoda componentelor simetrice



$$\begin{bmatrix} G_d \\ G_i \\ G_h \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} * \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix}$$

$$a = e^{-j\frac{2\cdot\pi}{3}}$$

Metoda componentelor simetrice

Transformarea inversă:

$$\begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a & a^2 & 1 \\ a^2 & a & 1 \end{vmatrix} * \begin{bmatrix} G_d \\ G_i \\ G_h \end{bmatrix}$$

Gradul de **disimetrie**

$$\varepsilon_d = \frac{G_i}{G_d}$$

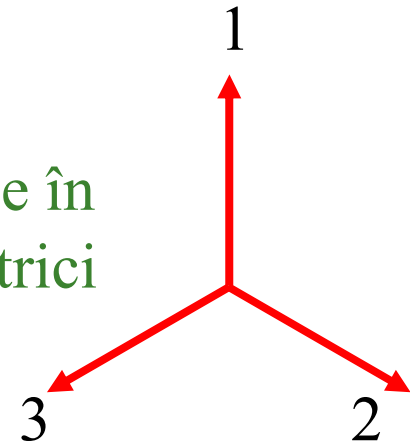
Gradul de **asimetrie**

$$\varepsilon_a = \frac{G_h}{G_d}$$

Regimuri nesimetrice la transformatoare

1. Sarcina este nesimetrică
2. Alimentarea este nesimetrică

Sistem simetric : mărimile de fază sunt egale în amplitudine și defazate cu $2\pi/3$ radiani electrici



Ipoteze suplimentare:

- raportul de transformare este unitar;
 - se neglijează curentul de mers în gol;
-

Comportarea transformatorului la sisteme simetrice

Sistemul simetric trifazat de succesiune directă și inversă

-Tensiunile, curenții, fluxurile sînt simetrice,

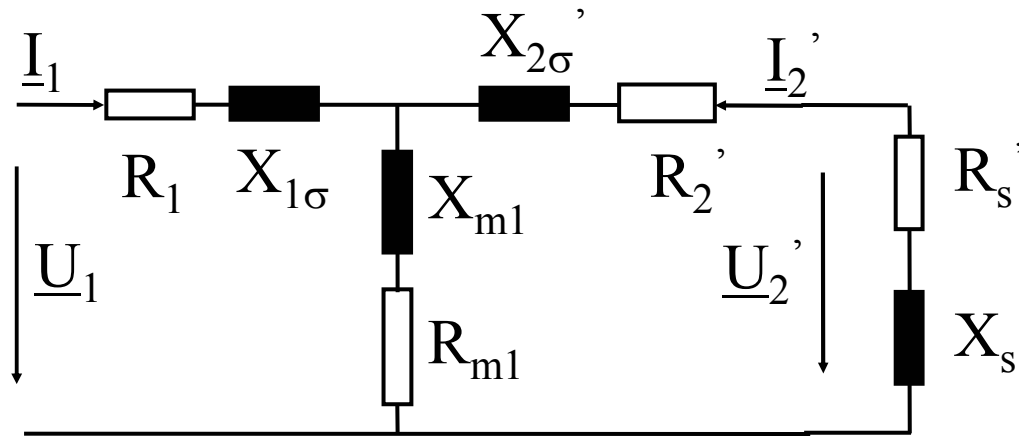
-fiecare fază se poate considera separat

Ecuatiile de tensiuni pentru orice fază:

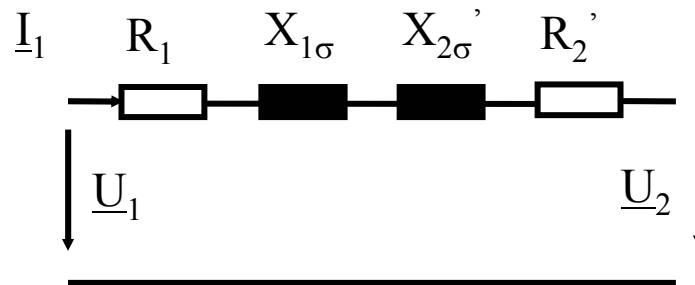
$$\begin{aligned}\underline{U}_1 &= \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1 & 0 &= \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 \\ \underline{U}'_2 &= \underline{Z}'_2 \cdot \underline{I}'_2 - \underline{E}'_2 \\ -\underline{U}'_2 &= R'_s \cdot \underline{I}'_2 + j \cdot X'_s \cdot \underline{I}'_2\end{aligned}$$

Comportarea transformatorului la sisteme simetrice

Schema echivalentă:



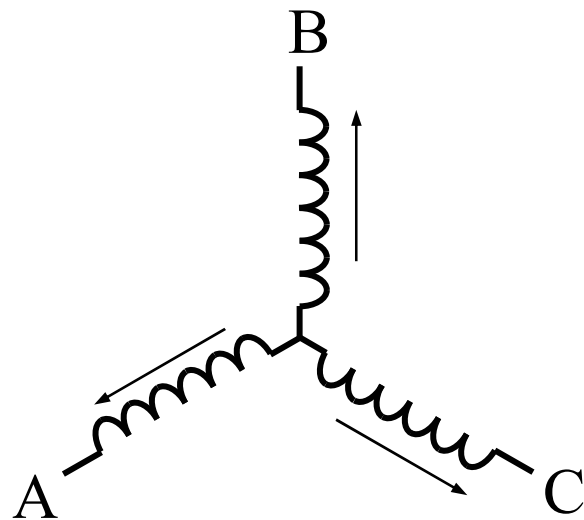
Impedanța echivalentă a transformatorului față de sistemele simetrice este aceeași și anume impedanța de scurtcircuit.



Curenți homopolari

Sistemul homopolar este un sistem **simfazic**: cele trei mărimi sunt egale și sunt în fază.

Curenții homopolari depind de **conexiunea înfășurării**

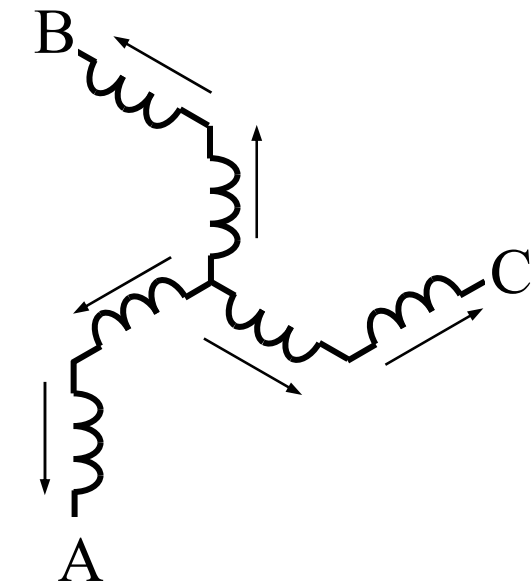


Conexiunea stea

Curenții homopolari prin înfășurări sunt egali și în același sens

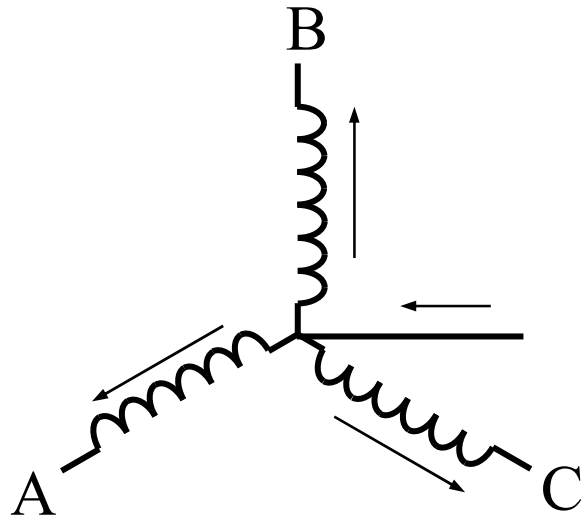
$$\underline{I}_h \equiv 0$$

- Nu poate exista curenț homopolar la conexiunile :Y, Z

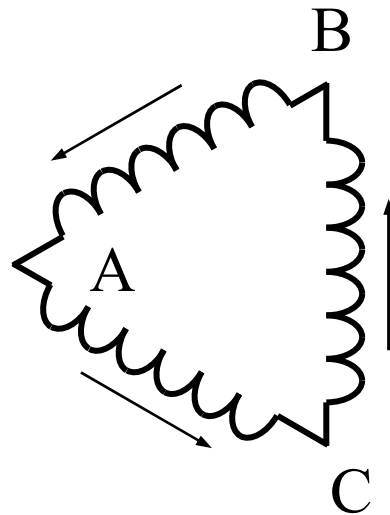


Conexiunea zig-zag

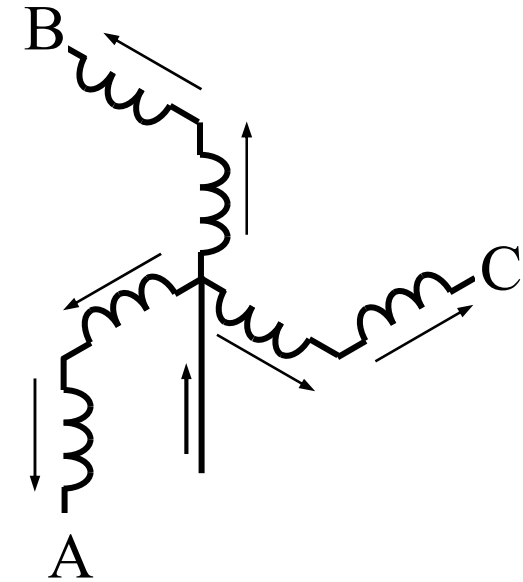
Conexiunea înfășurărilor



Conexiunea stea cu nul



Conexiunea triunghi



Conexiunea zig-zag cu nul

- Există curent homopolar la conexiunile : Y_0 , Z_0
- Există curent homopolar numai în interiorul înfășurării la conexiunea : Δ

Solenația homopolară

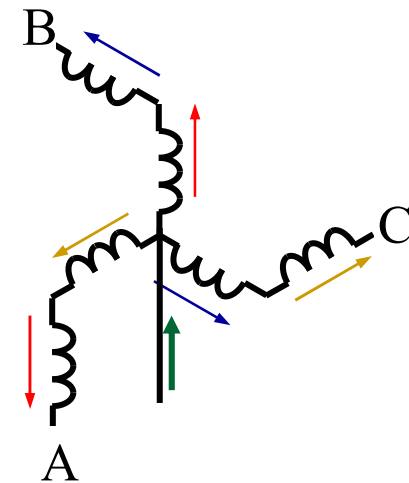
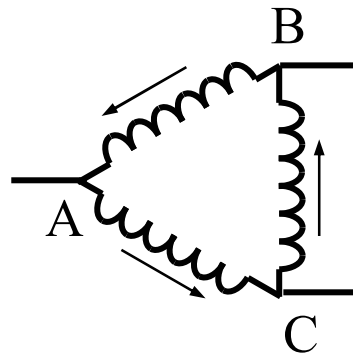
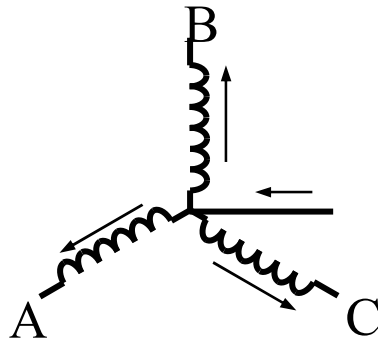
Solenațiile homopolare sunt determinate de **conexiunile din primar și secundar**

Poate exista solenația homopolară la conexiunile:

$$\theta_h = w \cdot I_h$$

- Y_0 stea cu nul

- Δ triunghi



La conexiunea Z_0 deși pot exista curenți homopolari solenația lor pe fază este nulă.

Tipuri de circuite magnetice

Solenanția homopolară determină fluxul homopolar, valoarea fluxului este determinată de **valoarea solenanției** și de **reluctanța circuitului** de închidere a fluxului homopolar.

Reluctanța circuitului magnetic al componentei homopolare depinde de **construcția circuitului magnetic**

Clasificarea miezurilor după cuplajul dintre faze :

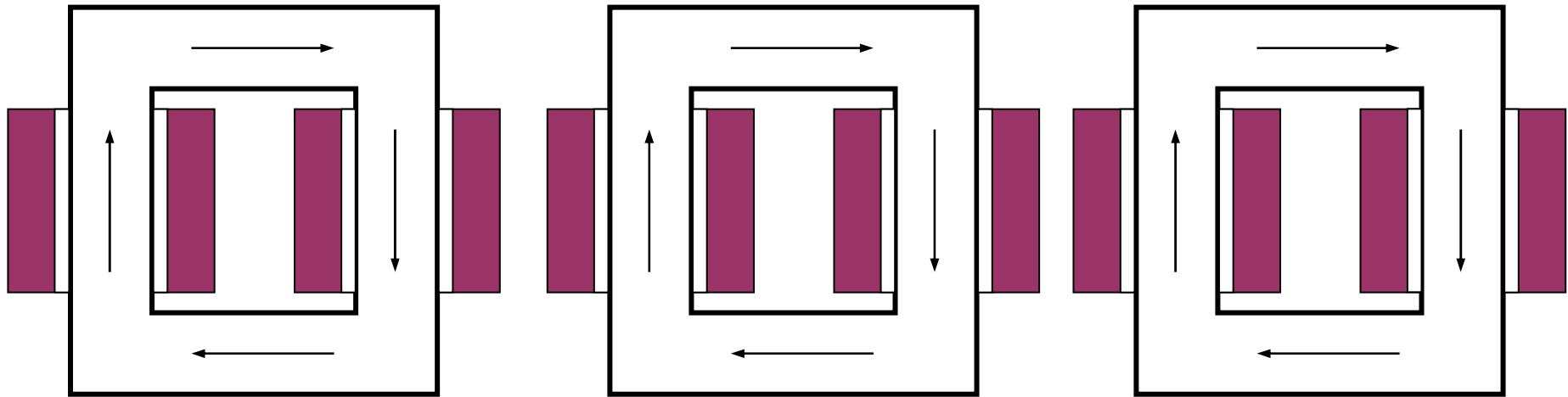
Miez cu cuplaj magnetic

Miez fără cuplaj magnetic

Miez cu cuplaj magnetic slab

Miez fără cuplaj magnetic

Compus din trei circuite monofazate

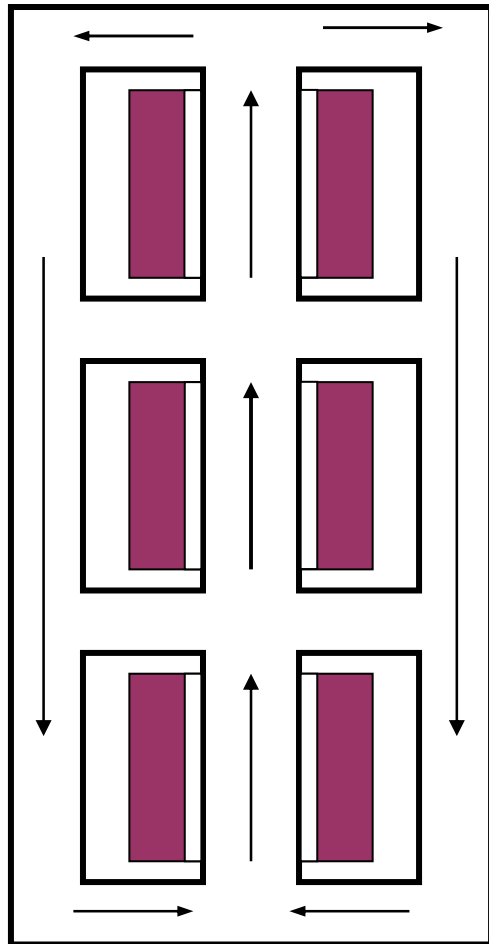


fiecare flux se închide independent

$$\mathcal{R}_{mh} = \mathcal{R}_m$$

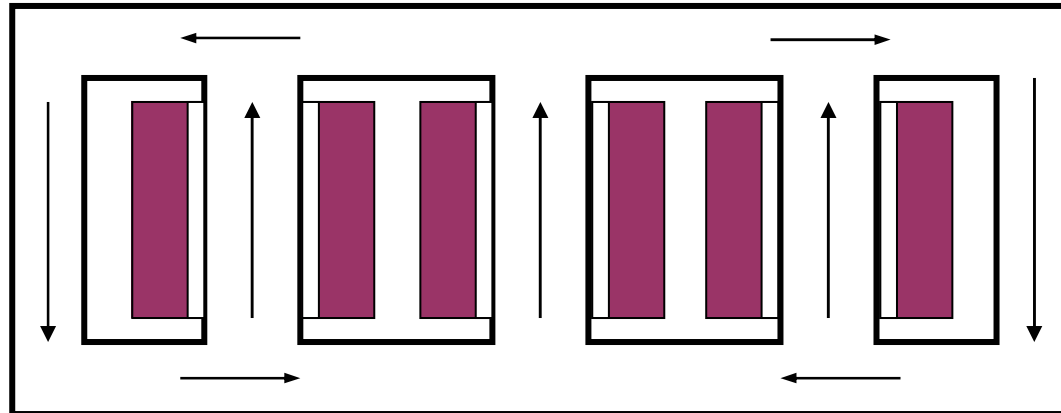
Reluctanța circuitului de închidere a fluxului homopolar este
reluctanța de magnetizare

Miez cu cuplaj magnetic slab



Cu trei coloane suprapuse

Cu cinci coloane

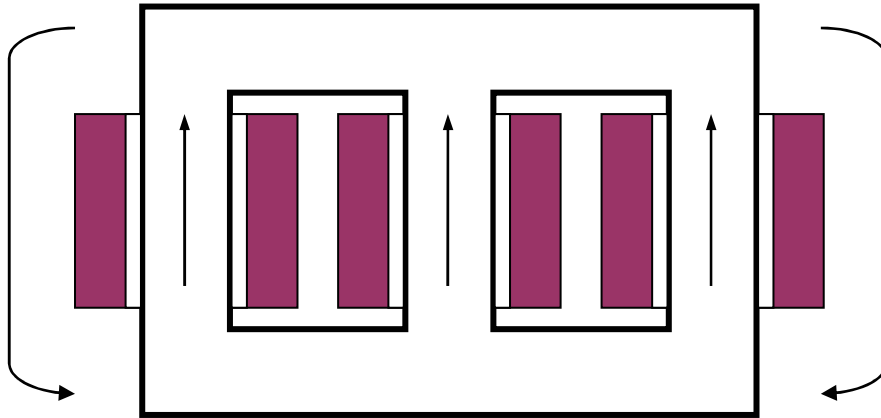


fiecare flux se închide pe aceeași cale, în fier, pe o cale mai lungă decât cel util.

Reluctanța circuitului de închidere a fluxului homopolar este mărită, față de reluctanța de magnetizare

$$\mathcal{R}_{mh} > \mathcal{R}_m$$

Miez cu cuplaj magnetic



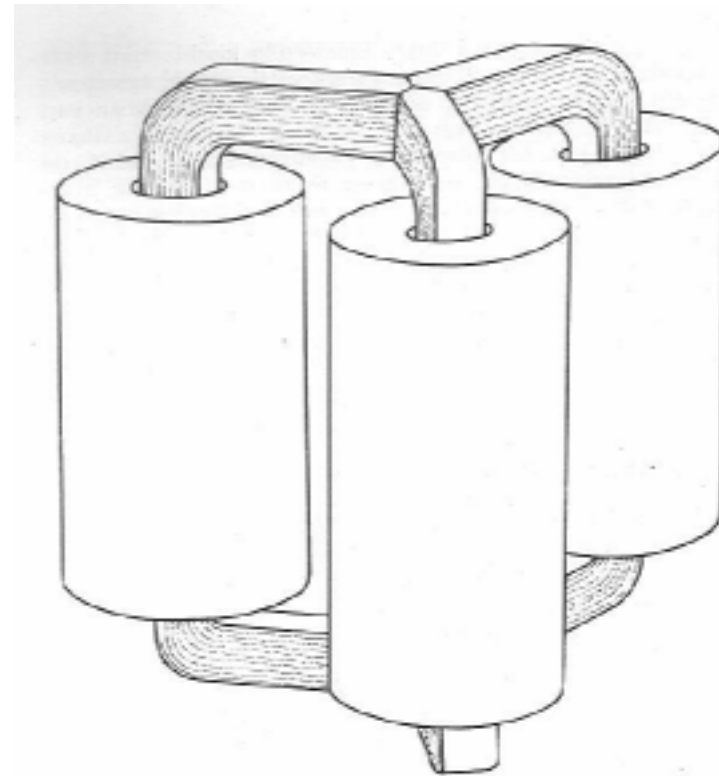
Circuit magnetic nesimetric

Fluxurile se închid în jurul miezului,
Fluxul este micșorat

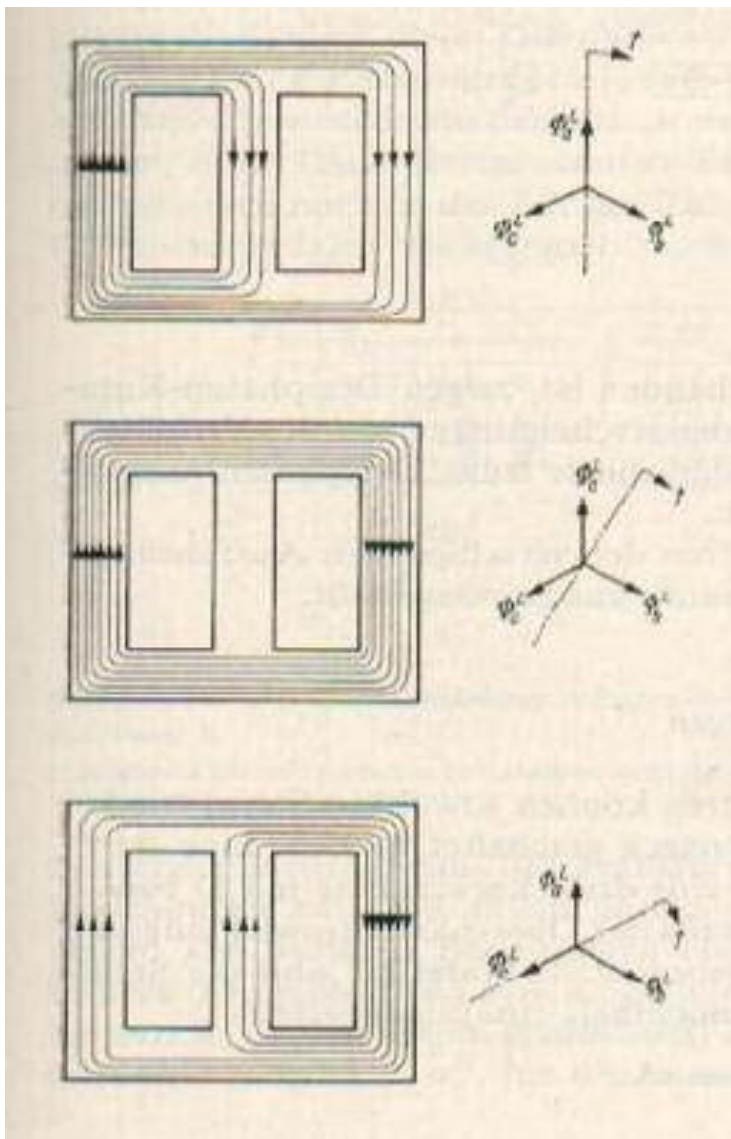
Reluctanța circuitului de închidere a fluxului
homopolar este foarte mare, apropiată de
reluctanța de scurtcircuit

$$\mathcal{R}_m \ll \mathcal{R}_{mh} \cong \mathcal{R}_{sc}$$

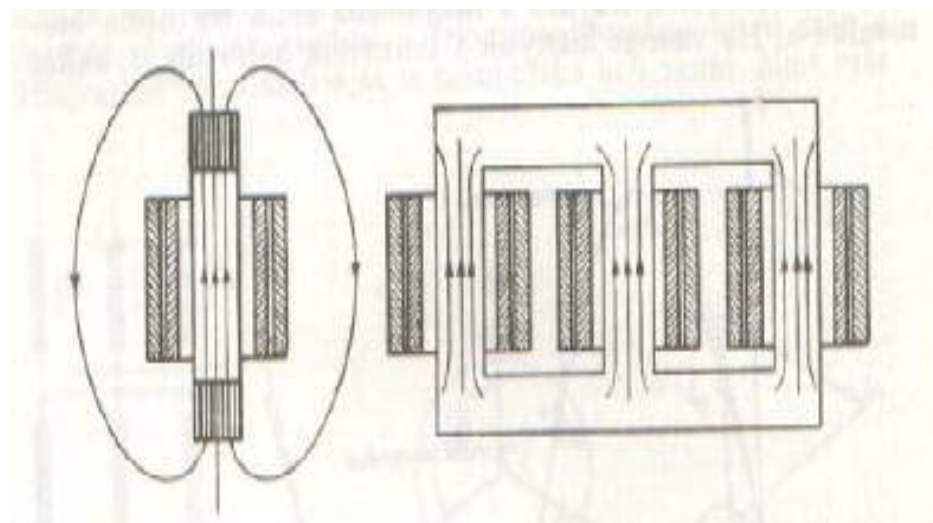
Circuit magnetic simetric



Câmpuri magnetice



Câmp simetric



Câmp homopolar

Impedanța homopolară

Pierderi suplimentare, p_{Feh} :

- In fier la frecvența de 50 Hz,
- In piesele din jurul miezului, pierderi prin curenți turbionari.

Se poate defini **rezistența de magnetizare homopolară**

$$R_{mh} = \frac{P_{Feh}}{3 \cdot I_h^2}$$

Inversul reluctanței homopolare este proporțional cu **reactanța de magnetizare homopolară**.

Concluzie :

$$X_{mh} = N_1 \cdot N_2 \cdot \frac{1}{\mathfrak{R}_{mh}}$$

impedanța homopolară este determinată de conexiunea înfășurării și construcția circuitului magnetic.

Impedanța homopolară diferă dinspre primar și secundar

Impedanța homopolară

Curentul de magnetizare homopolar este

$$\underline{I}_{1mh} = \underline{I}_{1h} + \underline{I}_{2h} \frac{N_2}{N_1}$$

Impedanța dinspre primar

$$R_{1mh} = \frac{P_{Feh}}{3 \cdot I_{1mh}^2}$$

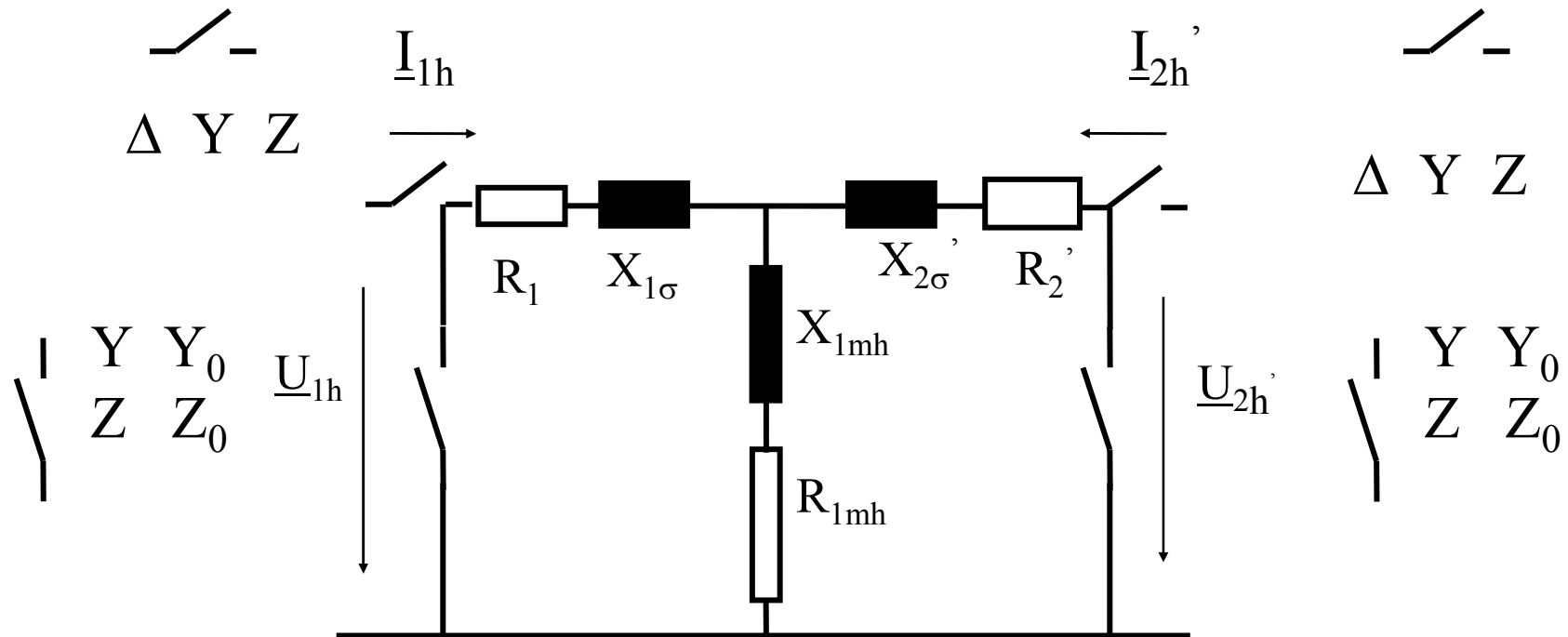
$$X_{1mh} = N_1^2 \cdot \frac{1}{\mathfrak{R}_{mh}}$$

Impedanța dinspre secundar

$$R_{2mh} = \frac{P_{Feh}}{3 \cdot I_{2mh}^2}$$

$$X_{2mh} = N_2^2 \cdot \frac{1}{\mathfrak{R}_{mh}}$$

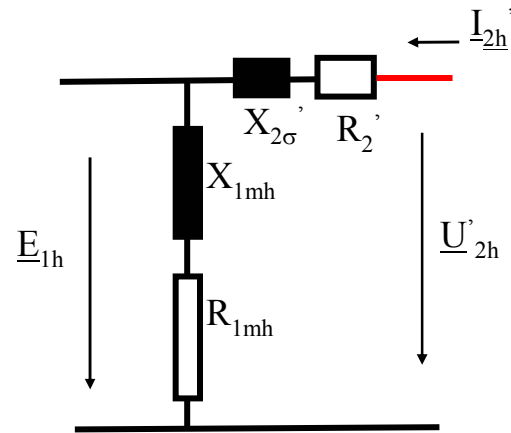
Impedanța homopolară



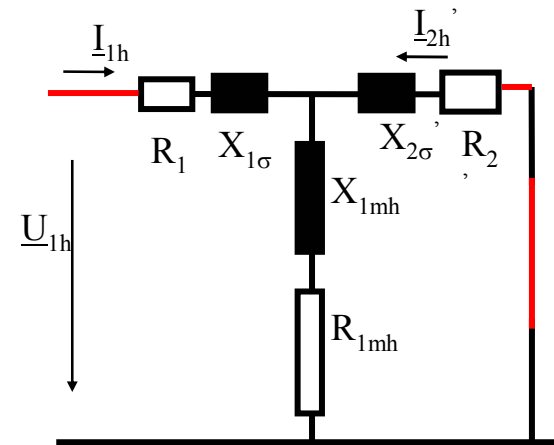
Schema echivalentă în T a transformatorului pentru componenta homopolară.

Schema echivalentă pentru componenta homopolară

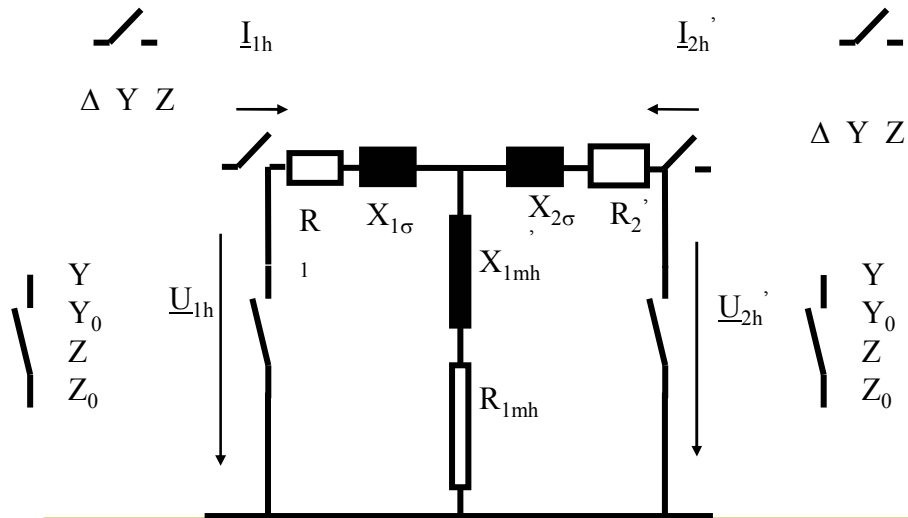
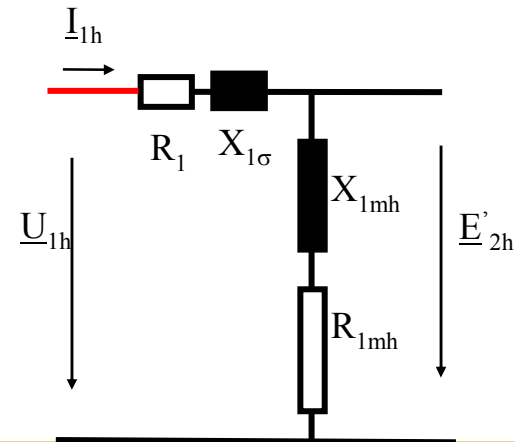
Conexiunea Yy_0



Conexiunea Y_0d



Conexiunea Y_0y

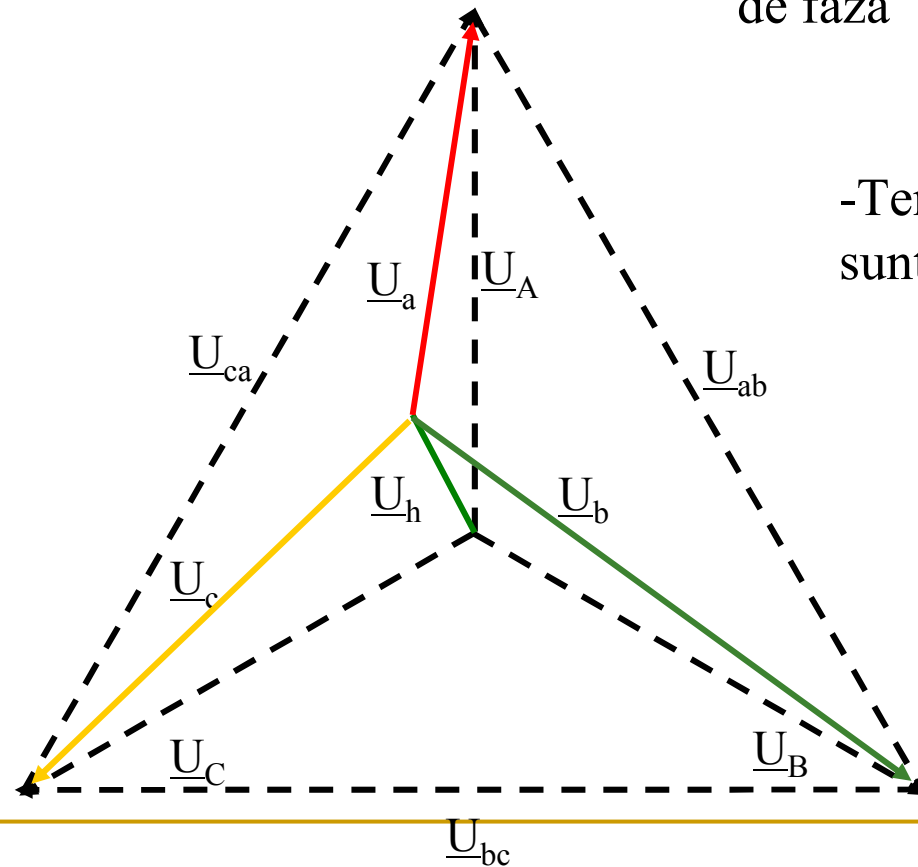


Comportarea transformatorului la sistemul homopolar

t.e.m. homopolare induse în înfășurări au **frecvența 50 Hz**

- deplasarea nulului

- modificarea tensiunilor de fază secundară



-Tensiunile de linie sunt simetrice

Sarcina monofazată între fază și nul

Transformator trifazat de putere : $S_N=1000$ kVA, conexiunea Yy_{0-12} , tensiunea primara $U_1=6000$ V, functioneaza cu o sarcina monofazata Z_s conectata pe faza A si nul. Se cunosc parametrii transformatorului. Sa se calculeze tensiunile Secundare.

$$z_{sc} := 0.507 + i \cdot 2.1$$

Impedanta de scurtcircuit

$$z_h := 0.0016 + i \cdot 0.0513$$

Impedanta homopolara dinspre secundar

$$z_s := 30 + i \cdot 18$$

Impedanta de sarcina

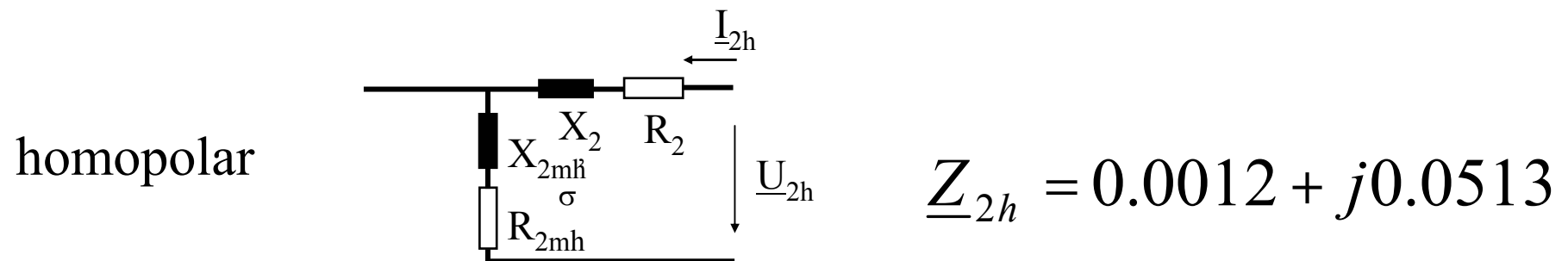
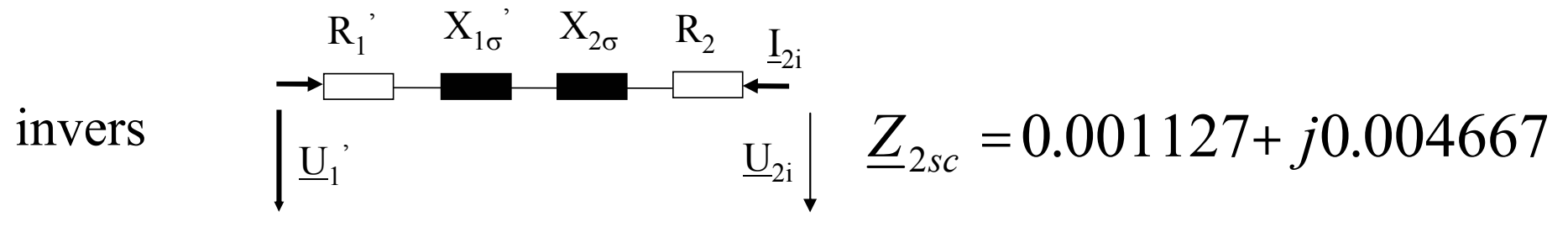
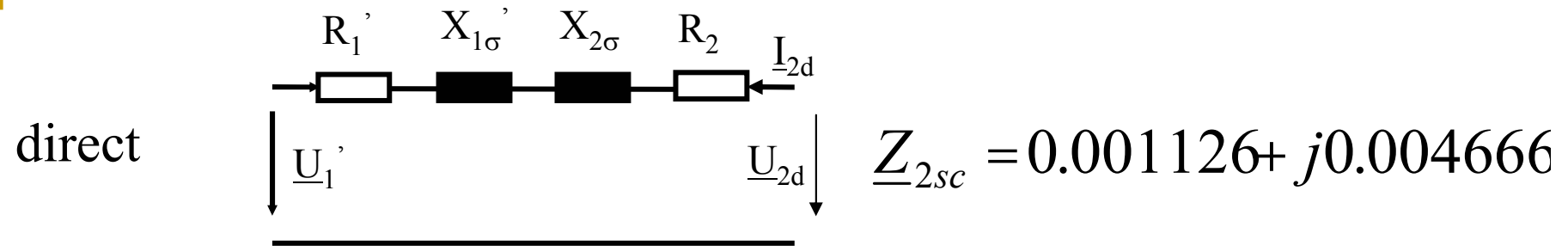
$$k := 15 \quad u_1 := \frac{6000}{\sqrt{3}}$$

Raportul de transformare, tensiunea de faza

Curentul de sarcina raportat la primar

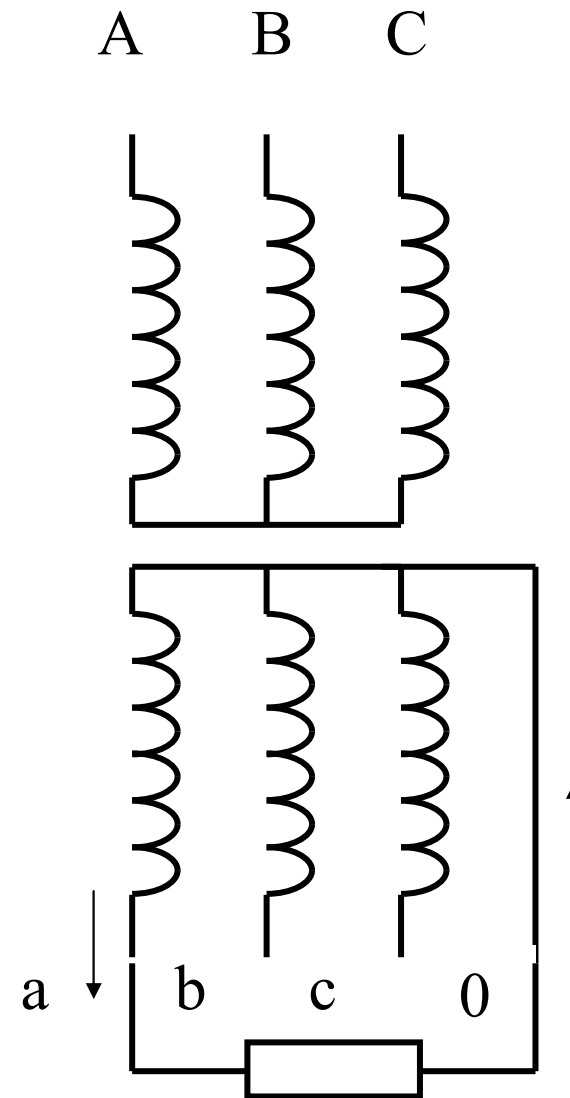
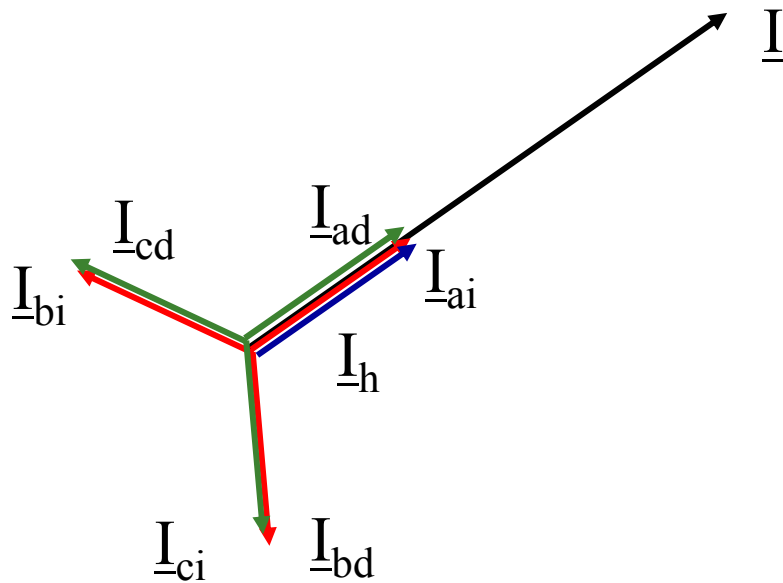
$$i_s := \frac{u_1}{(z_s + z_{sc})} \quad i_s = 79.179 - 52.168i$$

Sarcina monofazată între fază și nul



Sarcina monofazată între fază și nul

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{ad} \\ \underline{I}_{ai} \\ \underline{I}_{ah} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \underline{I} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \times \underline{I}$$



Sarcina monofazată între fază și nul

Curentul de sarcină în secundar

$$is2 := k \cdot is \qquad is2 = 1.188 \times 10^3 - 782.525i \quad A$$

Componentele simetrice și homopolară

$$iad := \frac{is2}{3} \qquad iad = 395.896 - 260.842i \quad A$$

$$iai := iad$$

$$iah := iad$$

Tensiunea homopolară raportată la primar

$$eh := zh \cdot iah \cdot k \qquad eh = 210.219 + 298.381i \qquad |eh| = 364.998$$

Sarcina monofazată între fază și nul

Căderile de tensiune pe transformator

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \\ \underline{U}_h \end{bmatrix}_a = \begin{bmatrix} \underline{Z}_d & & \\ & \underline{Z}_i & \\ & & \underline{Z}_h \end{bmatrix}_2 * \begin{bmatrix} \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \\ \underline{I}_h \end{bmatrix}_a = \underline{[U_{cs}]}_a$$

Tensiunea secundară

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A + \underline{U}_{ad} + \underline{U}_{ai} + \underline{U}_{ah}$$

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A + 2 \cdot \underline{Z}_{sc} \cdot \underline{I}_{ad} + \underline{Z}_{2h} \cdot \underline{I}_{ah}$$

$$\underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{Z}_{sc} \cdot \underline{I}_{bd} + \underline{Z}_{2h} \cdot \underline{I}_{ah}$$

$$\underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{Z}_{sc} \cdot \underline{I}_{cd} + \underline{Z}_{2h} \cdot \underline{I}_{ah}$$

Sarcina monofazată între fază și nul

Tensiunea fazei încărcate

$$u_{ar} := u_1 - 2z_{scr} \cdot i_{ad} - e_h$$

$$u_{ar} = 3.25 \times 10^3 - 306.161i$$

$$u_a := \frac{u_{ar}}{k}$$

$$u_a = 216.64 - 20.411i$$

$$|u_a| = 217.6$$

Tensiunea fazei B

$$u_{br} := a^2 \cdot u_1 + z_{scr} \cdot a^2 \cdot i_{ad} - e_h$$

$$u_{br} = -1.944 \times 10^3 + 2.701i \times 10^3$$

$$u_b := \frac{u_{br}}{k}$$

$$u_b = -129.617 + 180.092i$$

$$|u_b| = 221.886$$

Sarcina monofazată între fază și nul

Tensiunea fazei C

$$u_{cr} := a \cdot u_1 + a \cdot z_{scr} \cdot i_{ad} - e_h$$

$$u_{cr} = -1.939 \times 10^3 - 3.304i \times 10^3$$

$$u_c := \frac{u_{cr}}{k}$$

$$u_c = -129.258 - 220.292i$$

$$|u_c| = 255.414$$

Tensiunile de linie

$$u_{ab} := u_a - u_b$$

$$u_{ab} = 346.257 - 200.503i$$

$$|u_{ab}| = 400.119$$

$$u_{bc} := u_b - u_c$$

$$u_{bc} = -0.359 + 400.384i$$

$$|u_{bc}| = 400.384$$

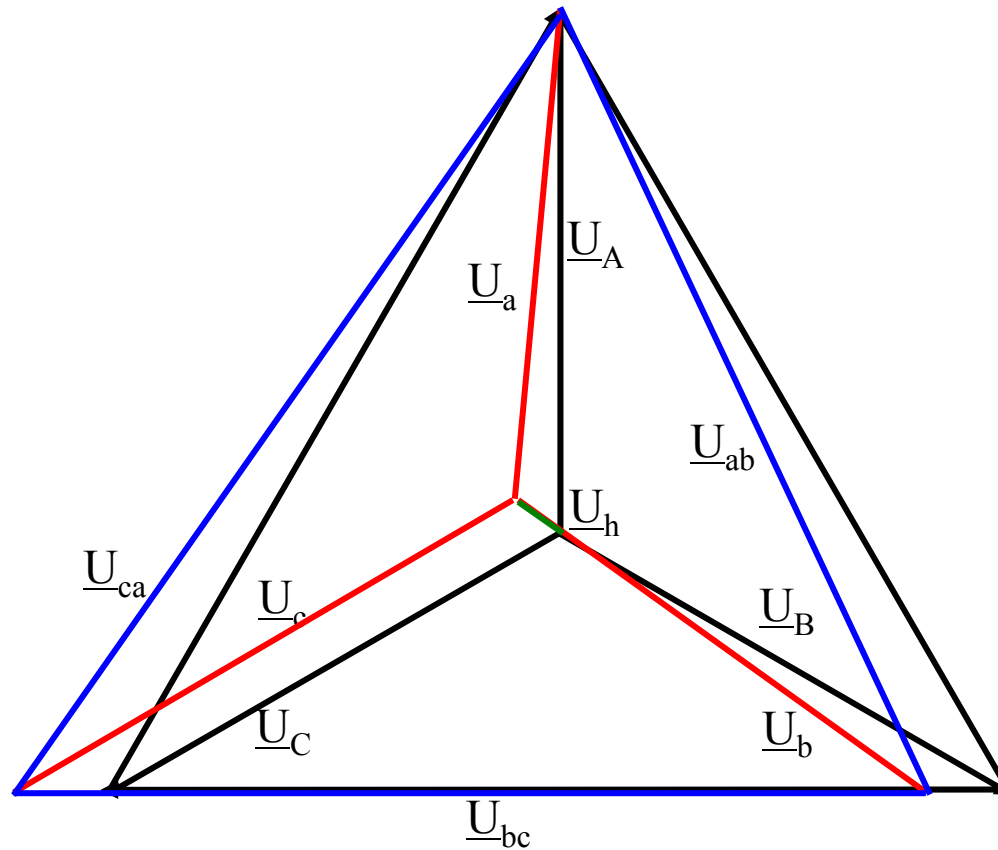
$$u_{ca} := u_c - u_a$$

$$u_{ca} = -345.898 - 199.881i$$

$$|u_{ca}| = 399.497$$

Sarcina monofazată între fază și nul

Modificarea tensiunilor de fază secundare



Sarcina monofazată între fază și nul

Curenții din primar

$$i_A := \frac{(iad + iai)}{k} \quad i_A = 52.786 - 34.779i \quad |i_A| = 63.213 \quad A$$

$$i_B := \frac{(a^2 \cdot iad + a \cdot iai)}{k} \quad i_B = -26.393 + 17.389i \quad |i_B| = 31.607 \quad A$$

$$i_C := \frac{(a \cdot iad + a^2 \cdot iai)}{k} \quad i_C = -26.393 + 17.389i \quad |i_C| = 31.607 \quad A$$

Sarcina monofazată din primar aparent se repartizează pe 3 faze.

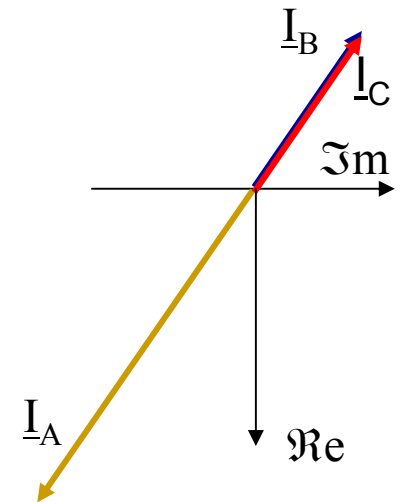
Solenațiile pe coloanele transformatorului

$$i_A - i_s = -26.393 + 17.389i$$

$$i_B - 0 = -26.393 + 17.389i$$

$$i_C - 0 = -26.393 + 17.389i$$

Solenații egale și în fază
solenația homopolară



Sarcina monofazată între fază și nul

Solenații rezultante pe cele două
ochiuri ale circuitului magnetic

$$2 \cdot \underline{I}_B + \underline{I}_c - \underline{I}_a + \underline{I}_c - \underline{I}_a - 2 \cdot \underline{I}_A = 0$$

$$2 \cdot \underline{I}_C + \underline{I}_a - \underline{I}_b + \underline{I}_c - \underline{I}_b - 2 \cdot \underline{I}_B = 0$$

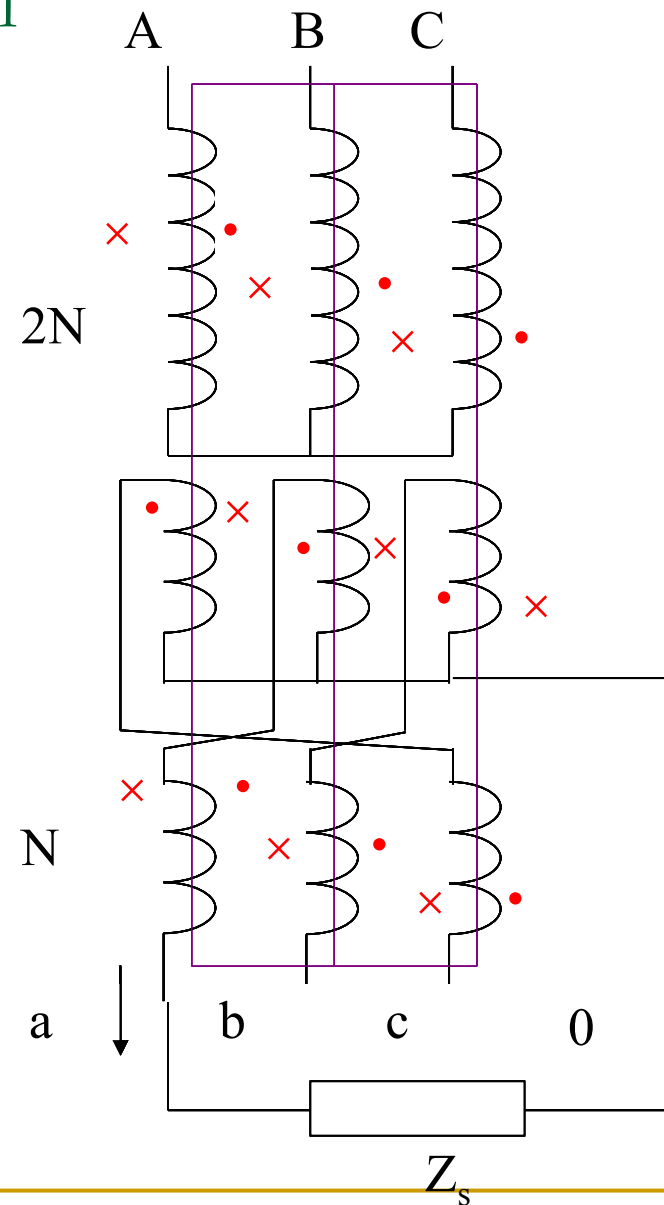
Primarul are conexiunea stea

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$$

Ecuatiile sarcinii

$$\underline{I}_a = \underline{I}$$

$$\underline{I}_b = \underline{I}_c = 0$$



Sarcina monofazată între fază și nul

Rezultă :

$$\begin{array}{l} 2\underline{I}_B - 2\underline{I}_A - 2\underline{I} = 0 \\ 2\underline{I}_C - 2\underline{I}_A + \underline{I} = 0 \\ \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0 \end{array} \quad \Rightarrow \quad \begin{array}{l} \underline{I}_A = -\frac{1}{2}\underline{I} \\ \underline{I}_B = \frac{1}{2}\underline{I} \\ \underline{I}_C = 0 \end{array}$$

Solenația pe coloana A

$$2 \cdot \underline{I}_A - \underline{I}_c + \underline{I}_a = -2 \cdot \frac{1}{2} \underline{I} - 0 + \underline{I} = 0$$

Solenația pe coloana B

$$2 \cdot \underline{I}_B + \underline{I}_c - \underline{I}_b = 0$$

Sarcina monofazată între fază și nul

Solenațiile primare și secundare sunt în echilibru

Nu există flux homopolar

Nu există tensiunea indusă homopolară,
tensiunile secundare sunt mai echilibrate
există curent homopolar în secundar

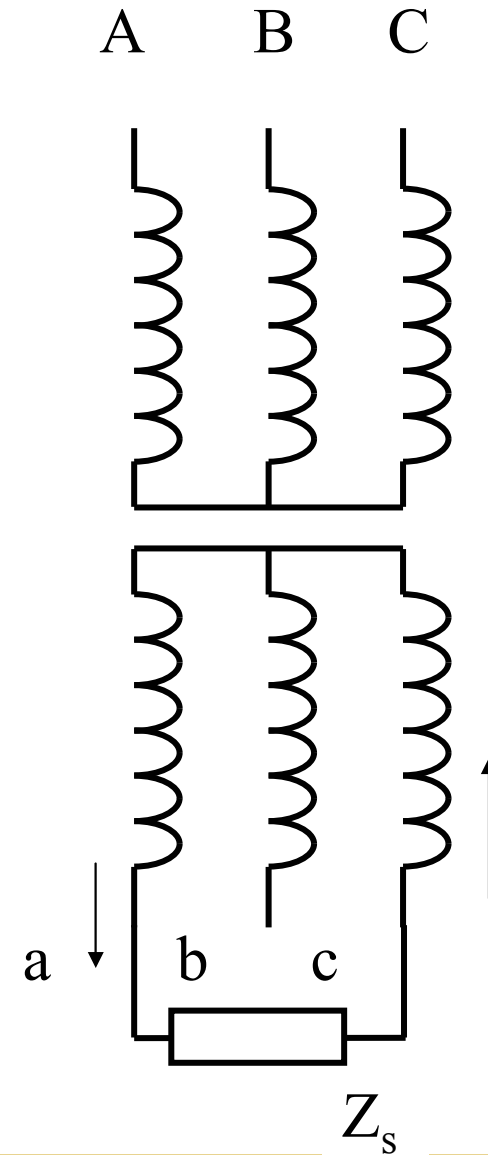
Conexiunea Z_0 este avantajoasă din acest punct de vedere

Sarcina monofazată aparent se repartizează pe 2 faze în primar

Sarcină monofazată între două faze

Curenții din primar

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{ad} \\ \underline{I}_{ai} \\ \underline{I}_{ah} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \underline{I} \\ 0 \\ -\underline{I} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1-a^2 \\ 1-a \\ 1-1 \end{bmatrix} \times \underline{I}$$



Sarcină monofazată între două faze

Curenții din primar

$$\underline{I}_A = \frac{1}{2} (\underline{I}_a - \underline{I}_b) = \frac{1}{2} \underline{I}$$

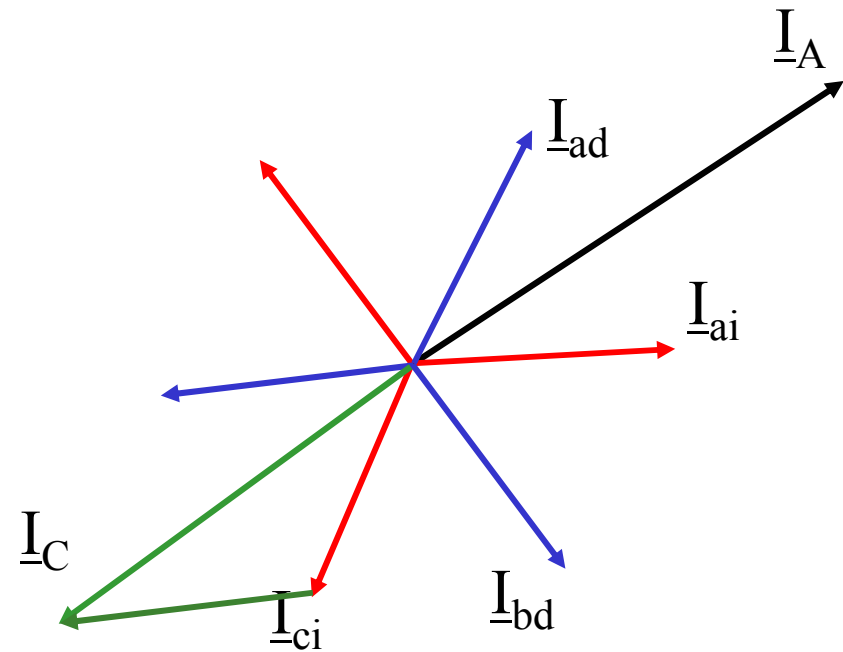
$$\underline{I}_B = \frac{1}{2} (\underline{I}_b - \underline{I}_c) = 0$$

$$\underline{I}_C = \frac{1}{2} (\underline{I}_c - \underline{I}_a) = -\frac{1}{2} \underline{I}$$

$$\underline{I}_{Ad} = \frac{(1 - a^2)}{6} \underline{I}$$

$$\underline{I}_{Ai} = \frac{(1 - a)}{6} \underline{I}$$

$$\underline{I}_{Ah} = 0$$



Nu există componenta homopolară în primar.

Sarcină monofazată între două faze

Curentul de fază din primar

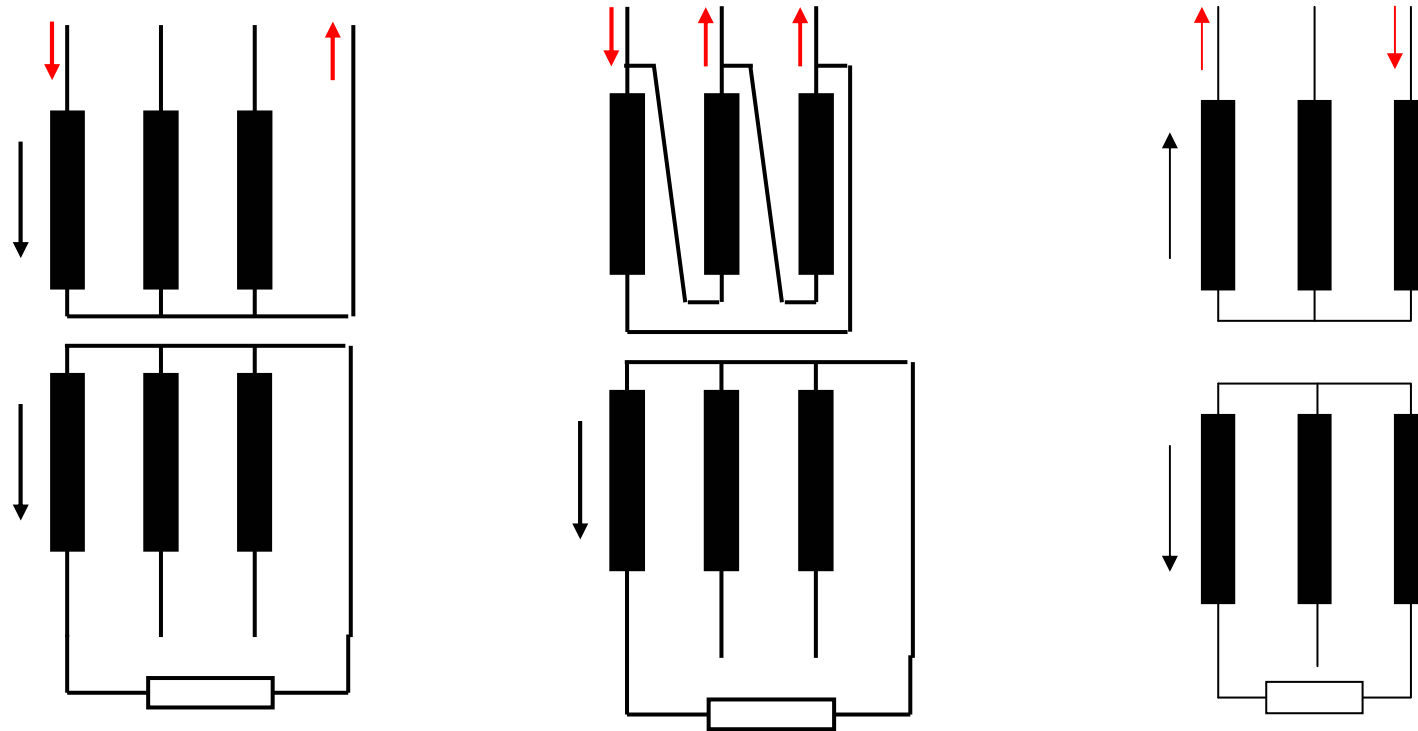
$$\underline{I}_x = \underline{I}_{xd} + \underline{I}_{xi}$$

Conexiunea Y nu pot exista componente homopolare

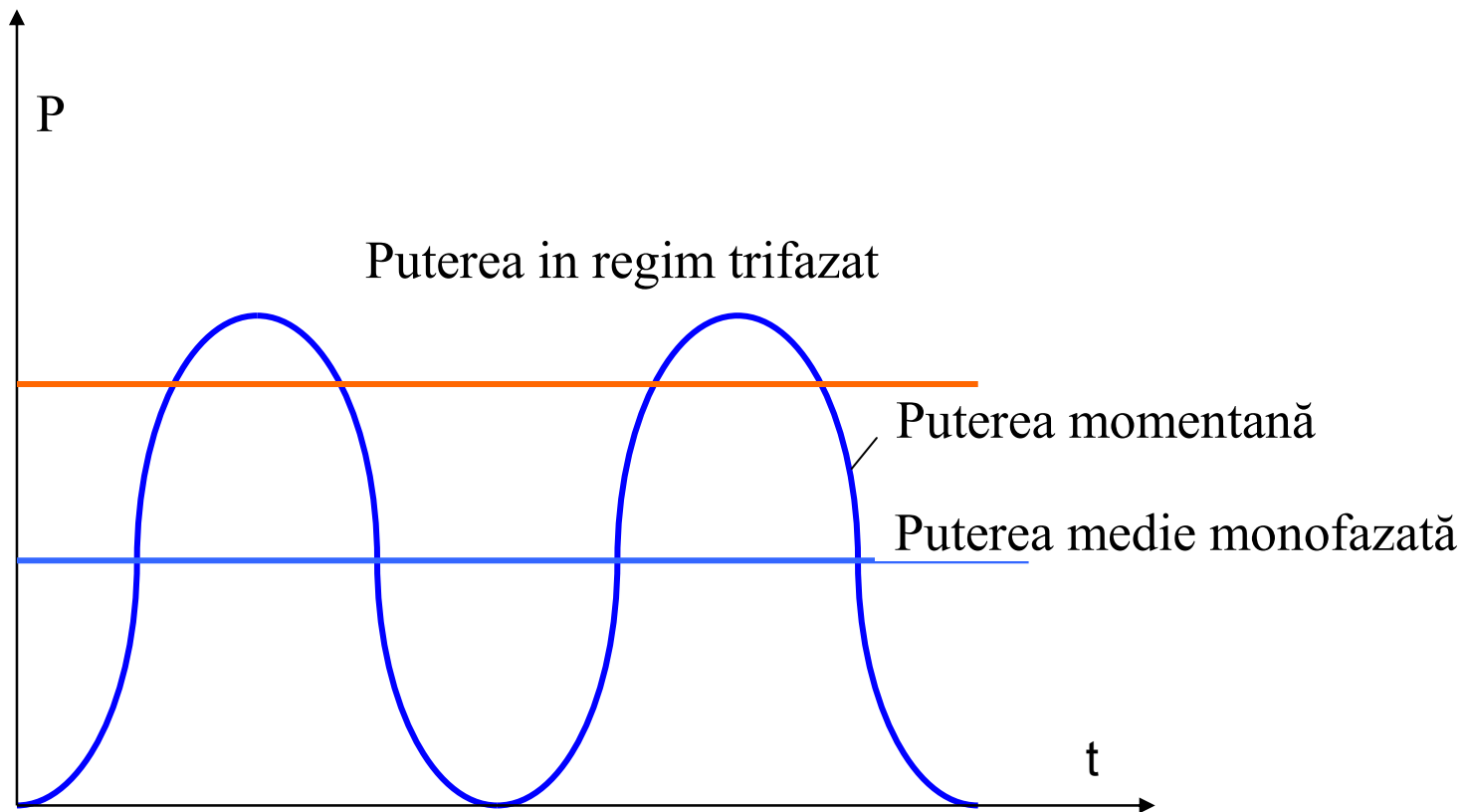
Sarcina monofazată se repartizează aparent pe 2 faze.

In funcție de conectarea sarcinii în secundar (pe fază sau între faze) și schema de conexiune a transformatorului sarcina poate fi repartizată aparent pe 1 sau 2 sau 3 faze în primar.

Repartizarea aparentă a sarcinii monofazate



Puterea în monofazat și trifazat



Schema repartizării sarcinii monofazate

