
Transformatoare trifazate

Particularități de construcție și
funcționare

Particularități constructive

- miez** : La puteri mici $< 1\text{kVA}$ Miezuri monofazate
La puteri medii $3\text{kVA} < S < 300\text{MVA}$ Miezuri trifazate
La puteri mari $> 300\text{MVA}$ Miezuri monofazate

Miez monofazat cu coloane, în manta.

Fluxul fiecărei faze se închide în miezuri separate.
nu există cuplaj magnetic între faze

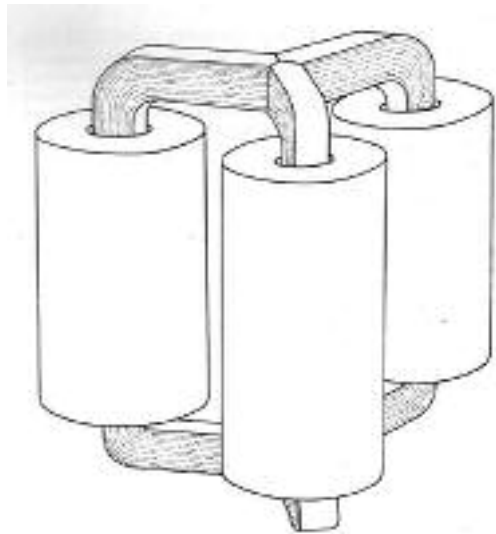
- Miez fără cuplaj magnetic → **cu flux liber**

Miez trifazat : cu 3 coloane, cu 5 coloane, în manta,

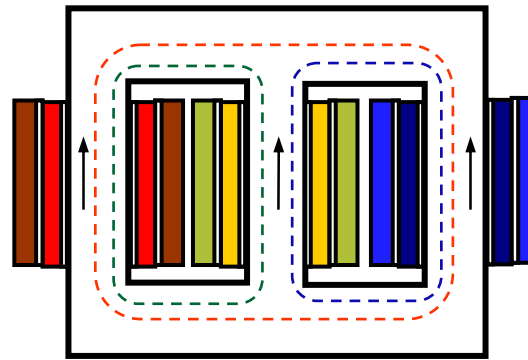
- Miez cu cuplaj magnetic → **flux forțat** - simetric
- nesimetric



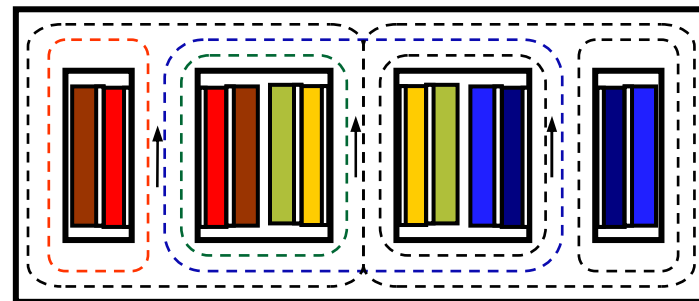
Miezuri trifazate



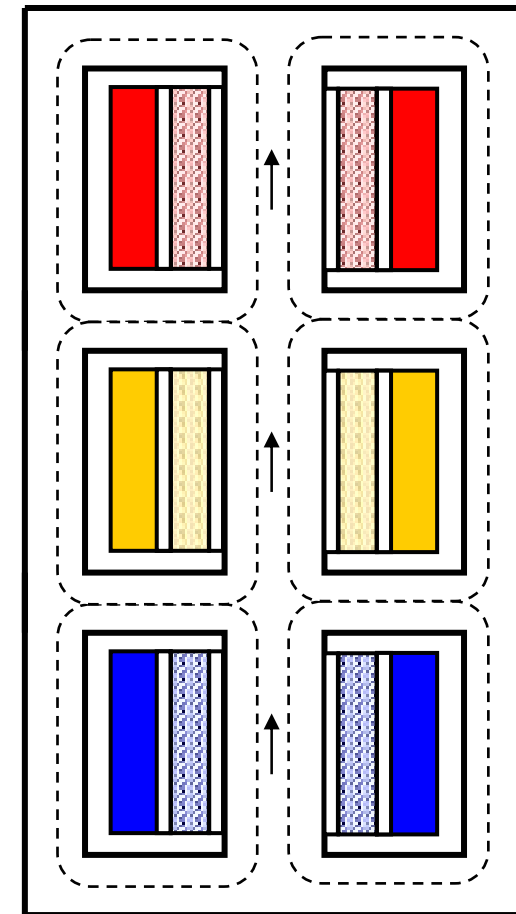
Miez trifazat simetric



Miez cu trei coloane



Miez în manta, cu cinci coloane



Miez în manta ,cu trei coloane



Particularități constructive

Infășurări:

- conexiune: stea, triunghi, zig-zag,
- schema de conexiune: Yd ; Zy;Dy;
- grupa de conexiune : 0, 1, .. 9, 11.

Yd-5

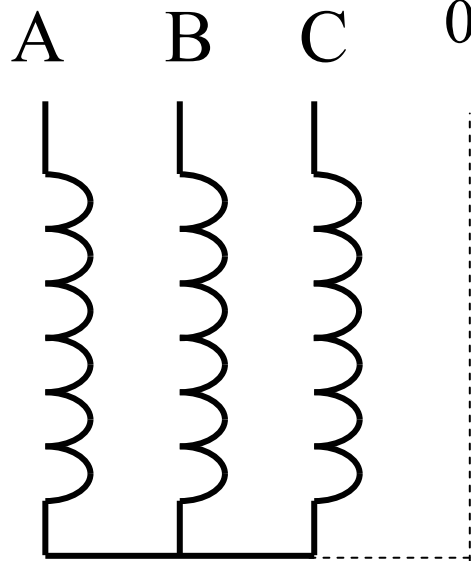
- primarul conectat în stea,
- secundarul conectat în triunghi,
- defazajul dintre tensiunile de linie 150°



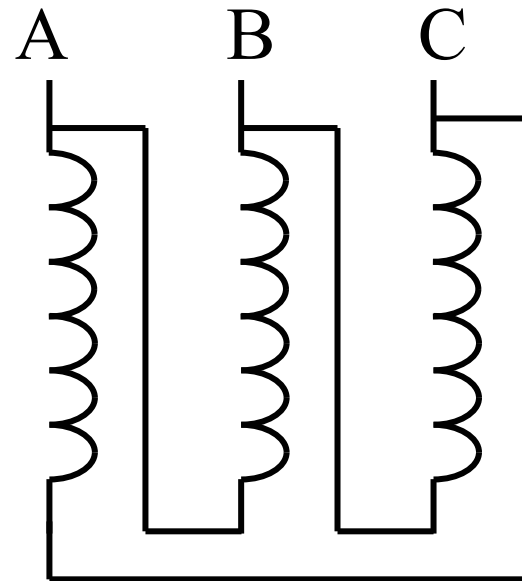
Scheme de conexiune

Conexiunile înfășurărilor transformatoarelor

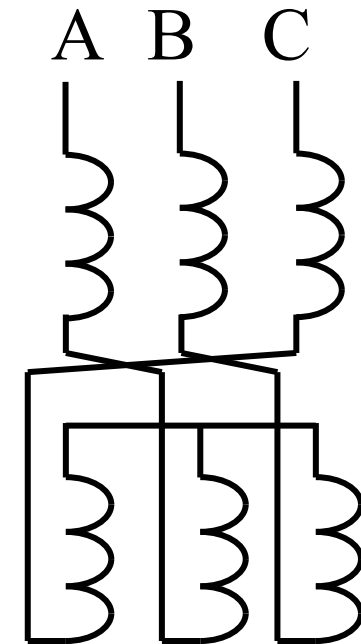
Conexiunea **stea**



Conexiunea **triunghi**



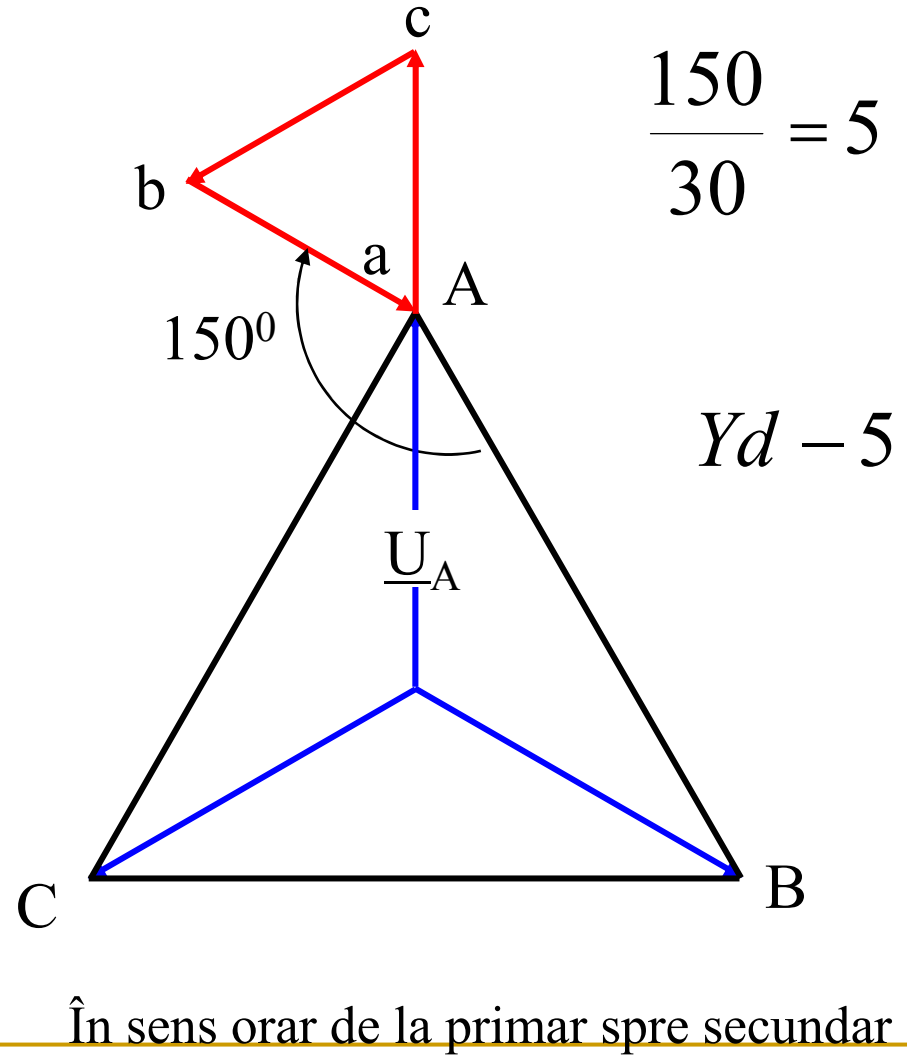
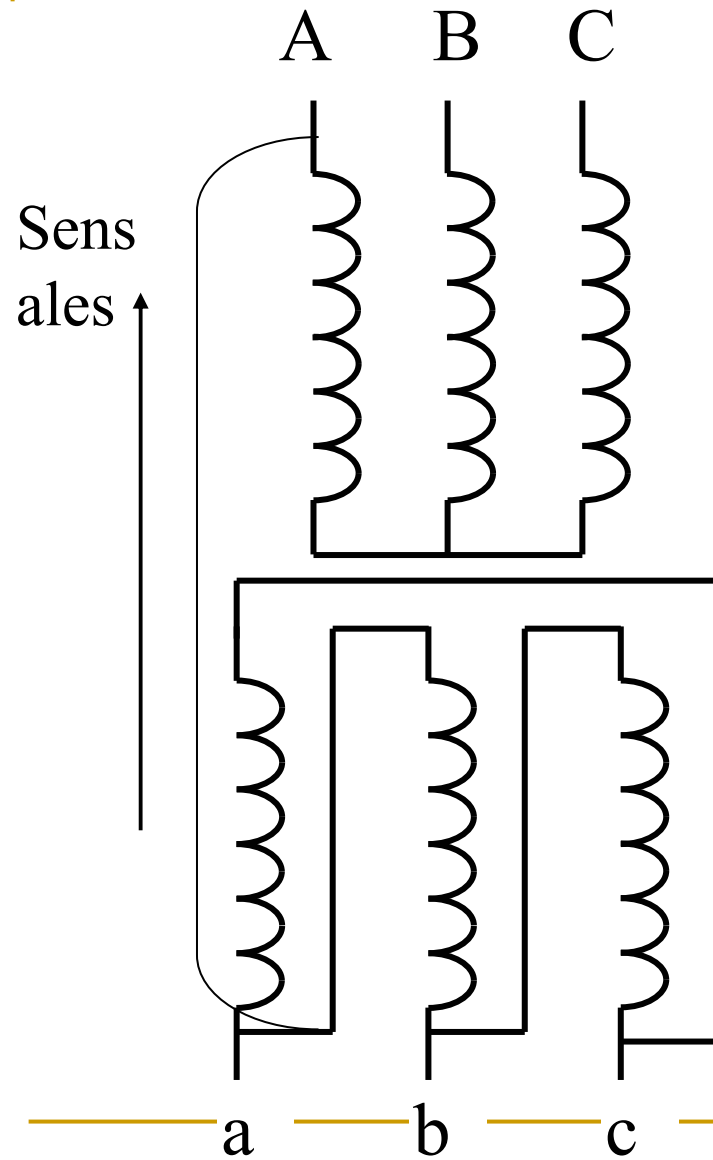
Conexiunea **zig-zag**



Conexiunea **stea cu nul**

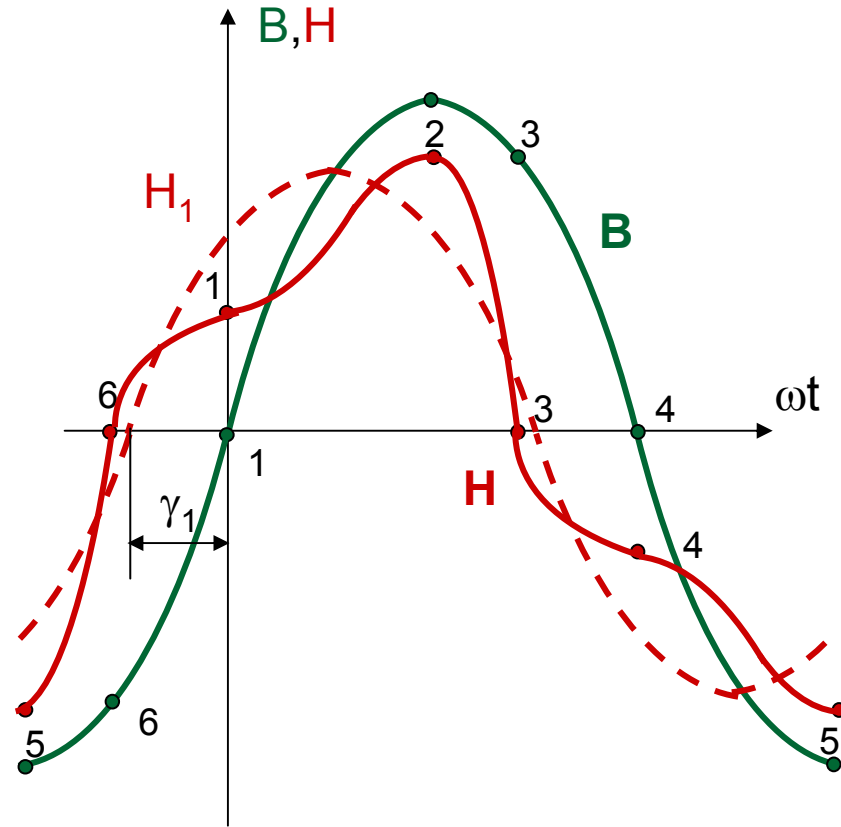
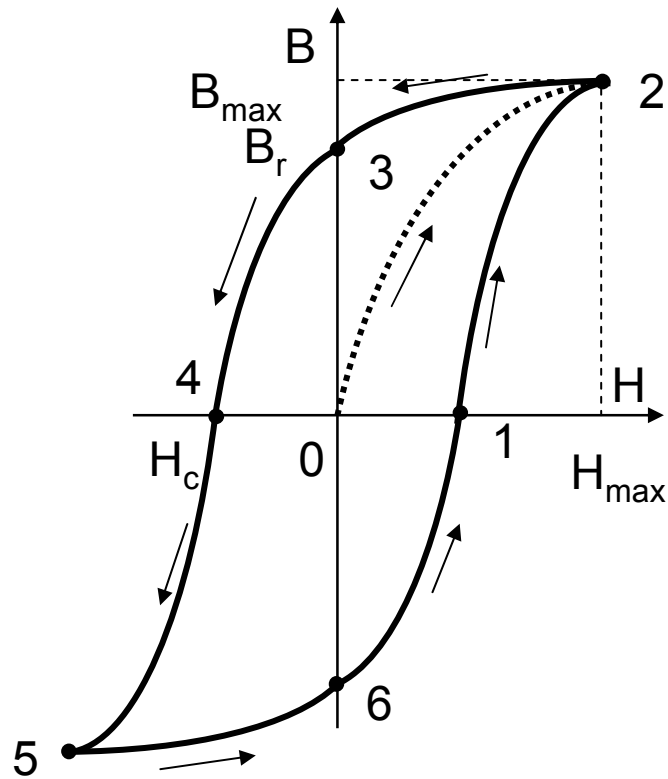


Grupa de conexiune



Legătura dintre inducția magnetică și solenația

la mers în gol:



Flux sinusoidal



solenație nesinusoidală

solenație sinusoidală



flux nesinusoidal



Efectul conexiunii la funcționarea în gol

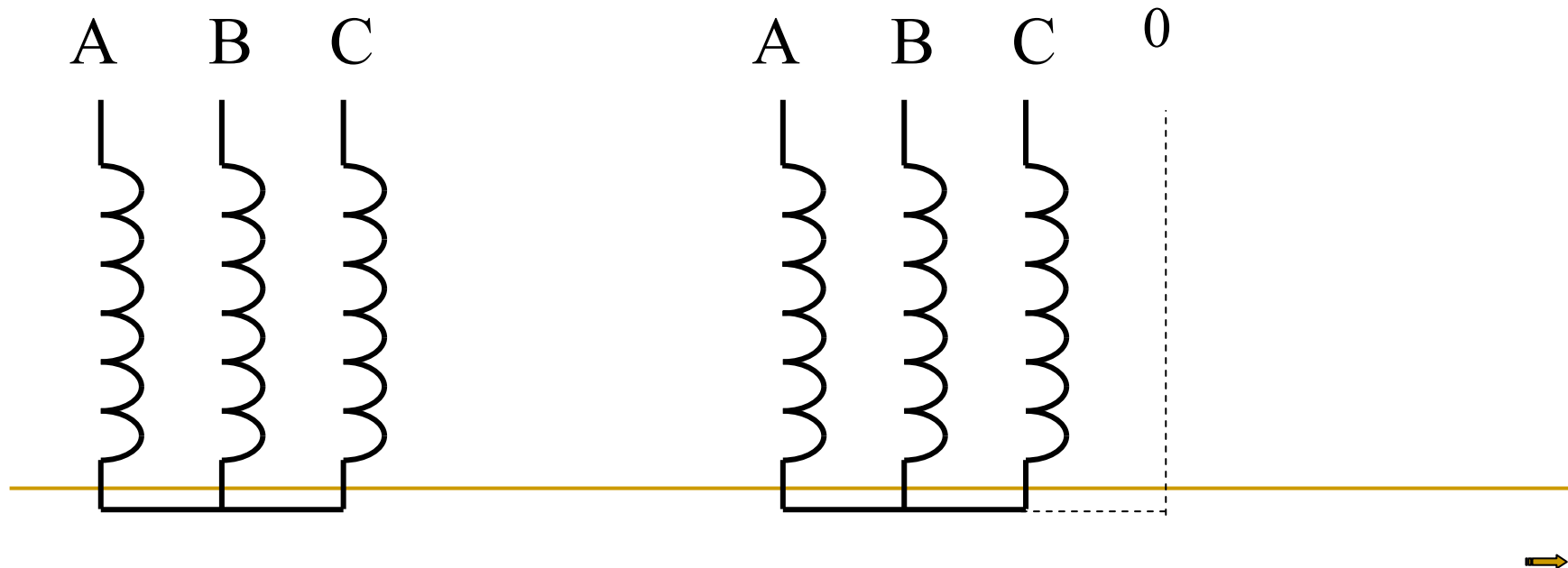
solenajie sinusoidală → flux nesinusoidal

conexiunea Y

- curenți de fază sinusoidali → flux nesinusoidal
- tensiuni electromotoare induse pe fază nesinusoidale.

conexiunea Y_0

- curenți de fază nesinusoidali → flux sinusoidal
- tensiuni electromotoare induse pe fază sinusoidale



Efectul conexiunii la funcționarea în gol

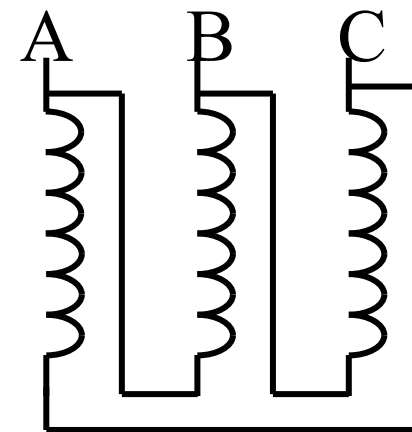
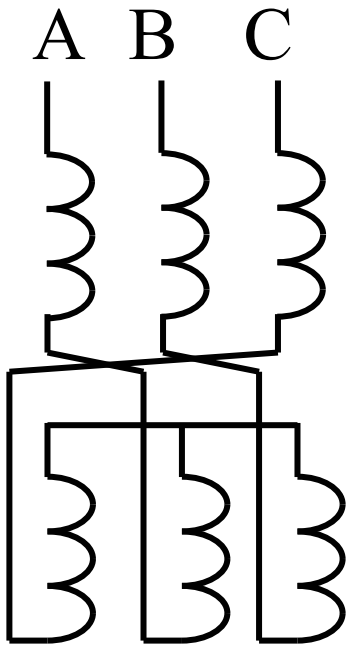
conexiunea D

- curenți de fază nesinusoidali → flux sinusoidal
- tensiuni electromotoare induse pe fază sinusoidale

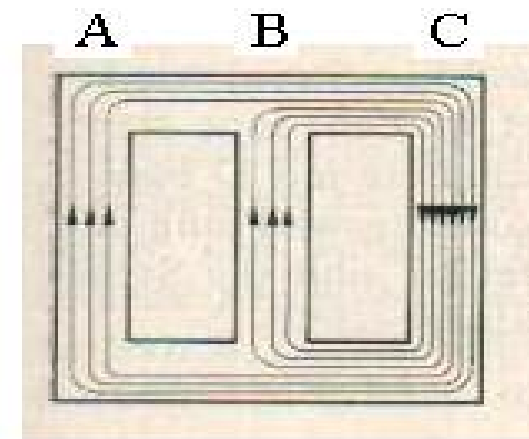
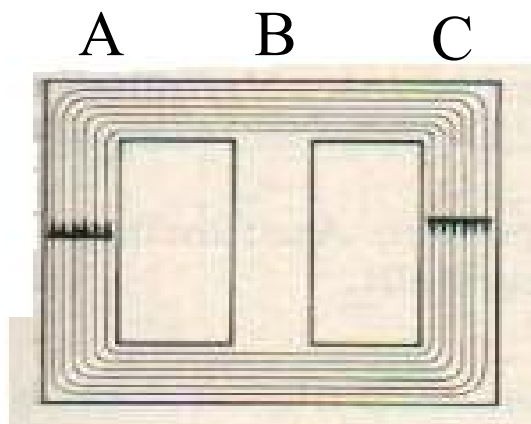
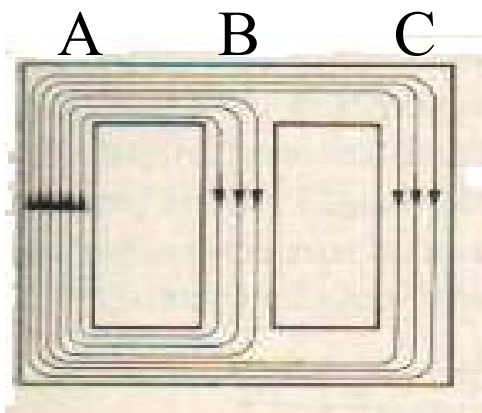
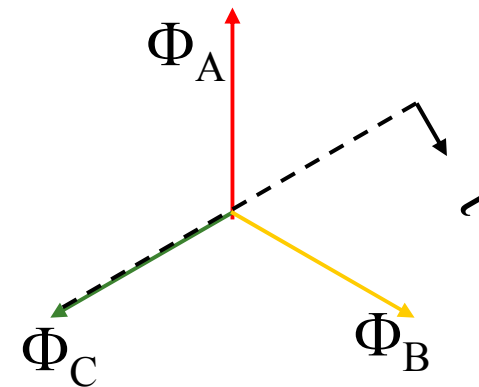
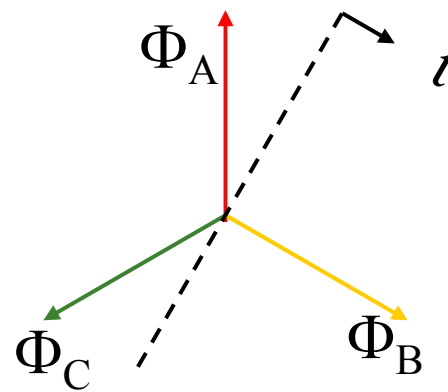
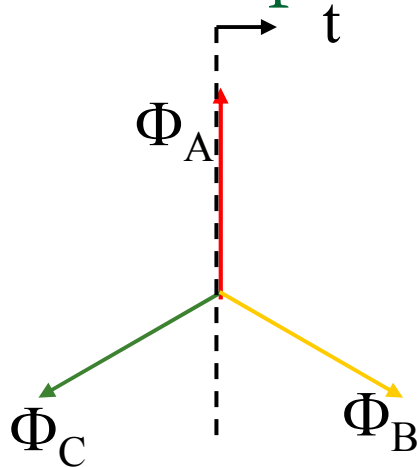
DA

conexiunea Z

- curenți de fază sinusoidali → flux nesinusoidal
- tensiuni electromotoare induse pe fază sinusoidale.

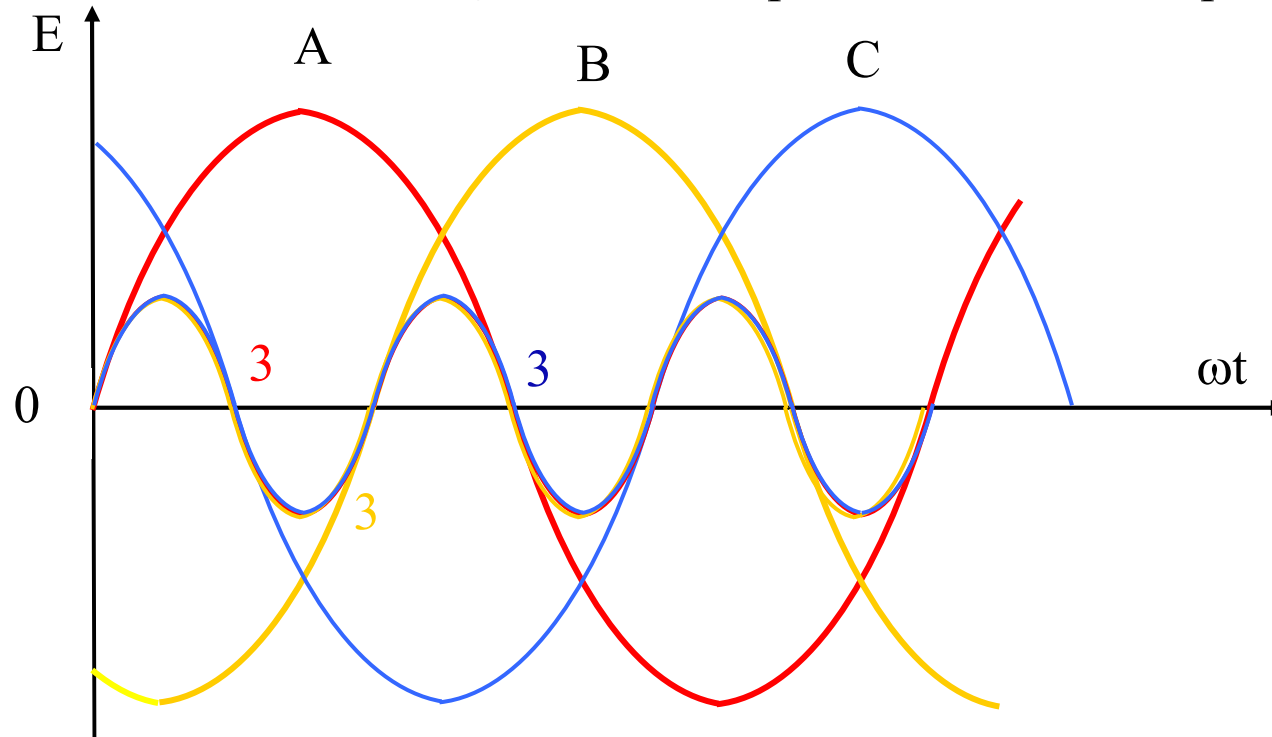


Linii câmpului magnetic simetric



Fluxul nesinusoidal

Fluxul nesinusoidal se descompune in seria Fourier rezultând:
armonica fundamentală și armonici superioare de ordin impar

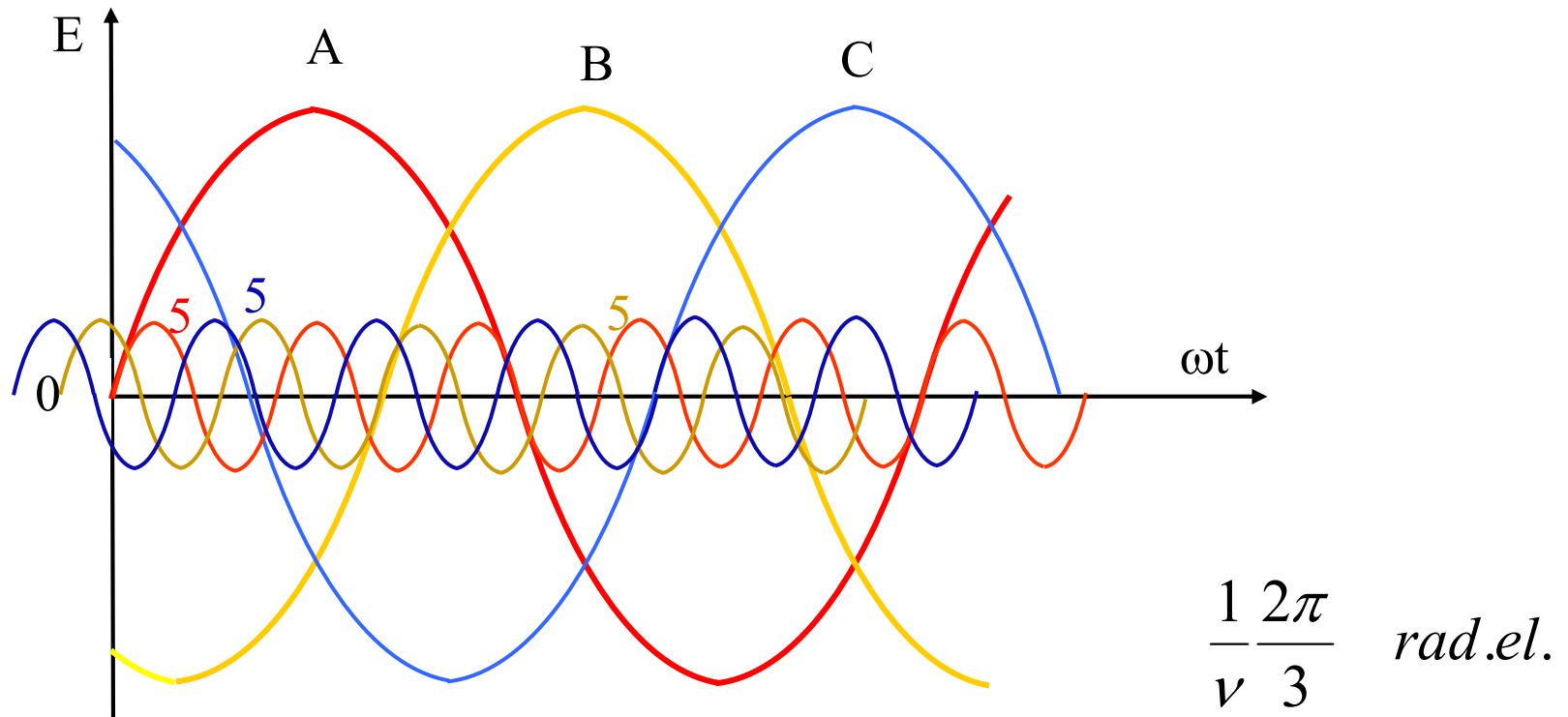


Fluxurile armonice de ordinul 3 și multipli de trei sunt simfazice.
În orice moment pe cele trei faze sunt egale.



Fluxul nesinusoidal

Fluxurile armonice de ordinul 5, 7, .. $v = 6k \pm 1$

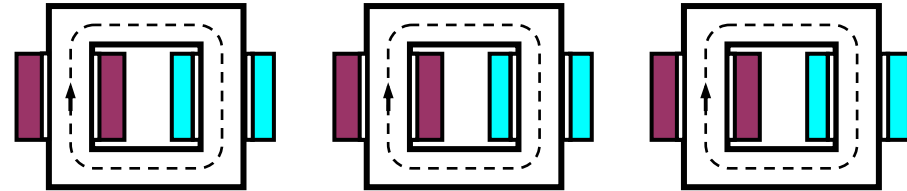


Armonicile de ordinul v au frecvența $f_v = v f_1$ și sunt defazate cu



Efectul miezului la funcționarea în gol

Miez fără cuplaj magnetic



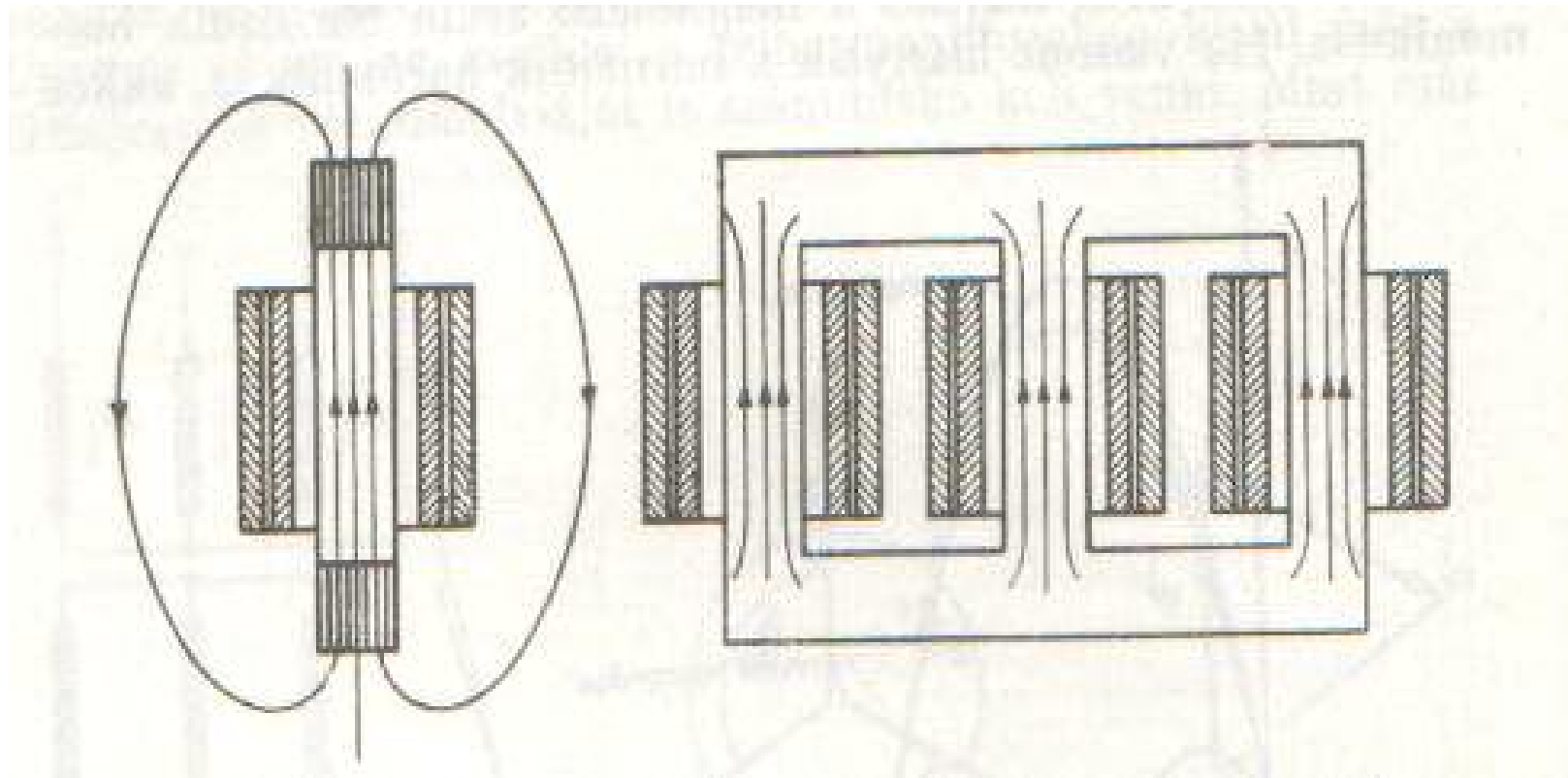
fiecare flux se închide independent

Miez cu cuplaj magnetic

- fluxurile armonice de ordinul 3 și multiplu de 3, fiind simfazice, nu se pot închide prin miez.
- Se închid parțial în jurul miezului, prin piesele ferro- magnetice, producând pierderi suplimentare, astfel sunt micșorate.
- Rezultă că armonicile de ordinul $3k$ ale tensiunii electromotoare induse sunt micșorate.

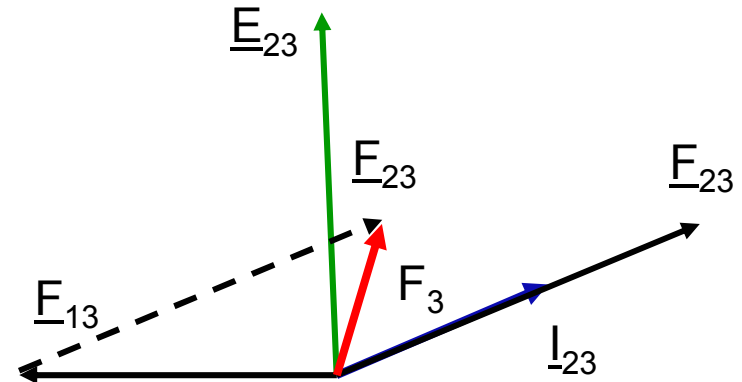
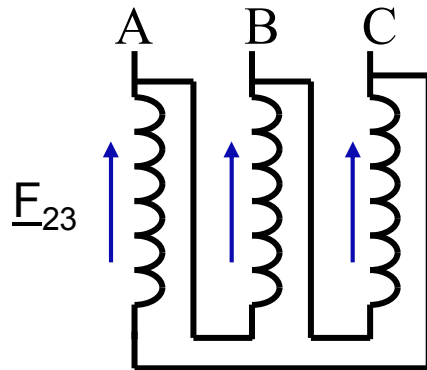
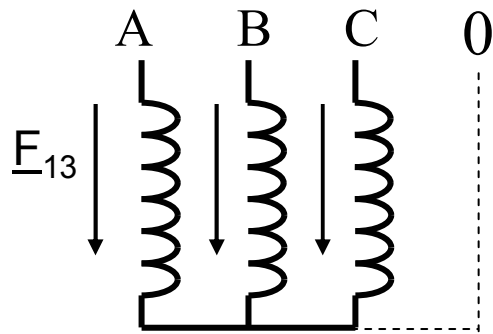


Linile de câmp ale fluxului armonică de ordinul 3



Influența conexiunii secundare

conexiunea d în secundar

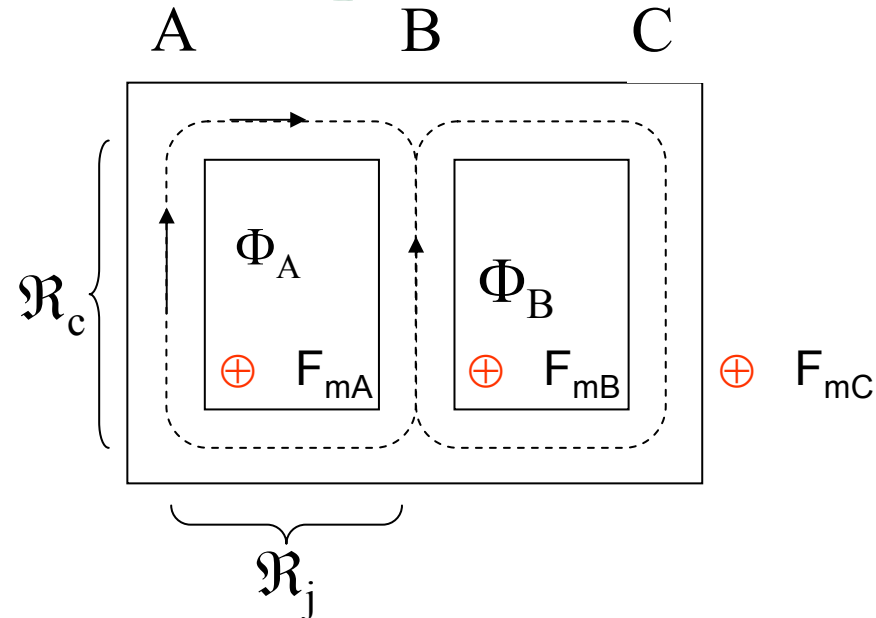


micșorează armonicile de **flux**
deci și de **t.e.m. induse**

la cuplaj **nesimetric** rezultă :
curenți de magnetizare **nesimetrice**



Calculul curentului de magnetizare la miezul transformatorului cu cuplaj nesimetric.



$$\underline{F}_{mA} - \underline{F}_{mB} = (\mathcal{R}_c + 2 \cdot \mathcal{R}_j) \cdot \underline{\phi}_A - \mathcal{R}_c \cdot \underline{\phi}_B$$

$$\underline{F}_{mB} - \underline{F}_{mC} = (\mathcal{R}_c + 2 \cdot \mathcal{R}_j) \cdot \underline{\phi}_C - \mathcal{R}_c \cdot \underline{\phi}_B$$

$$\underline{F}_{mA} + \underline{F}_{mB} + \underline{F}_{mC} = 0$$



Diagrama solenațiilor

$$\underline{F}_{mA} = (\mathfrak{R}_c + 2 \cdot \mathfrak{R}_j) \cdot \underline{\phi}_A + \frac{2}{3} \mathfrak{R}_j \cdot \underline{\phi}_B$$

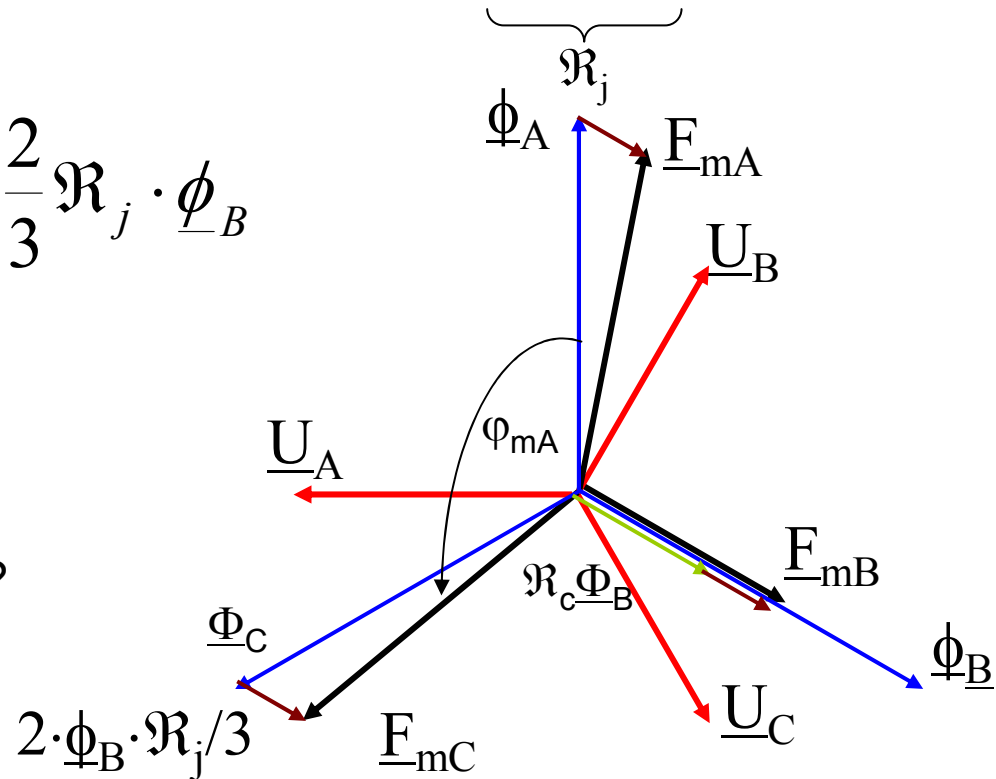
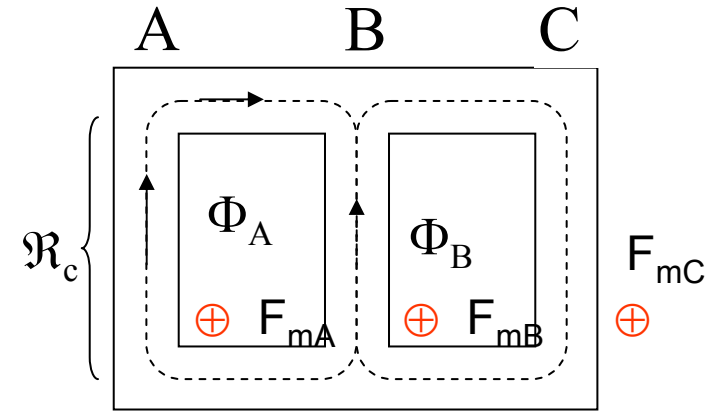
$$\underline{F}_{mB} = \mathfrak{R}_c \cdot \underline{\phi}_B + \frac{2}{3} \mathfrak{R}_j \cdot \underline{\phi}_B$$

$$\underline{F}_{mC} = (\mathfrak{R}_c + 2 \cdot \mathfrak{R}_j) \cdot \underline{\phi}_C + \frac{2}{3} \mathfrak{R}_j \cdot \underline{\phi}_B$$

$$\underline{F}_{mA} = N_{sp1} \cdot \underline{I}_{1mA}$$

Care este curentul de mers in gol ?

$$I_{10} = \frac{I_{1mA} + I_{1mB} + I_{1mC}}{3}$$



Cuplarea și funcționarea în paralel a transformatoarelor

Necesitatea cuplării în paralel.

Necesitatea cuplării în paralel:

- ✓ dezvoltarea pe etape a investiției,
- ✓ siguranța mai mare în exploatare,
- ✓ exploatarea mai rațională,
- ✓ puterea pe unitate limitată.



Condiții de cuplare și funcționare în paralel

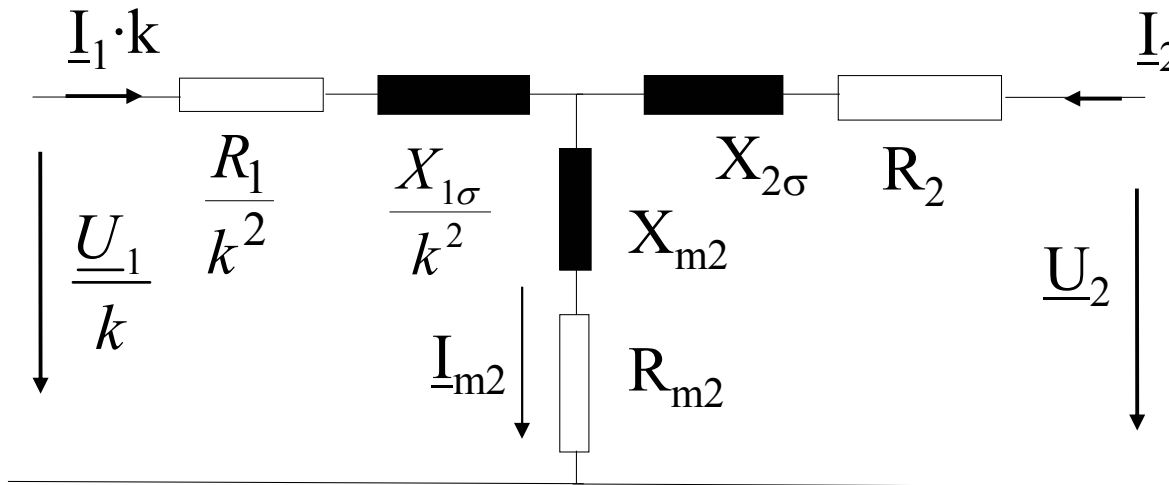
Două sau mai multe surse pot lucra în paralel dacă :
în orice moment tensiunile lor sunt egale

Condiții de cuplare și funcționare în paralel:

- aceeași tensiune primară $U_{1\alpha} = U_{1\beta}$
- același raport de transformare $k_{\alpha} = k_{\beta}$
- aceeași grupă de conexiune
- aceeași tensiune de scurtcircuit $u_{1sc\alpha} = u_{1sc\beta}$
- puteri apropiate



Transformator raportat la secundar



$$\frac{\underline{U}_1}{k} = \frac{\underline{Z}_1}{k^2} \cdot \underline{I}_1 \cdot k - \underline{E}_2$$

$$\underline{U}_2 = \underline{Z}_2 \cdot \underline{I}_2 - \underline{E}_2$$

$$\underline{E}_2 = -\underline{Z}_{m2} \cdot \underline{I}_{m2}$$

$$\underline{I}_{m2} = \underline{I}_2 + \underline{I}'_1$$

$$\underline{U}_2 = \underline{I}_2 \cdot \left(\frac{\underline{Z}_1}{k^2} + \frac{\underline{Z}_2}{\underline{c}_2} \right) + \frac{\underline{U}_1}{k \cdot \underline{c}_2}$$

$$\underline{c}_2 = \frac{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{m2}}{\underline{Z}_{m2}}$$

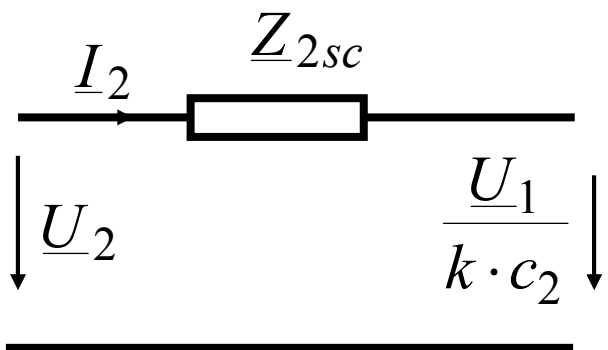
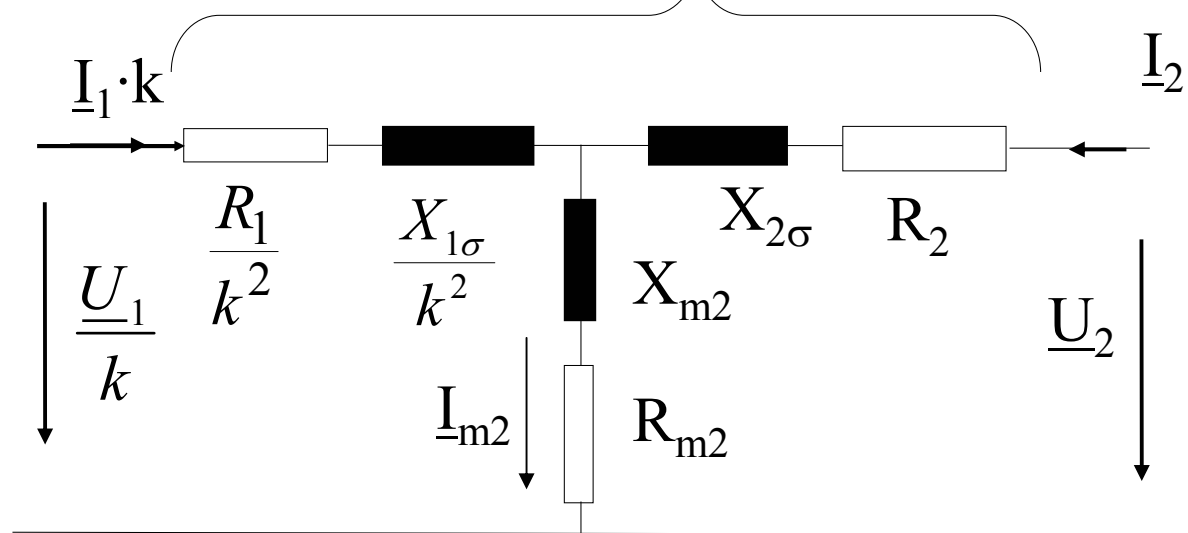
$$\underline{c}_2 = \frac{X_{2\sigma} + X_{m2}}{X_{m2}}$$

Se elimina
 \underline{E}_2 ; \underline{I}'_1 ; \underline{I}_{m2}



Transformator raportat la secundar

$$\underline{Z}_{2sc} = \frac{\underline{Z}_1}{k^2} + \frac{\underline{Z}_2}{\underline{c}_2}$$



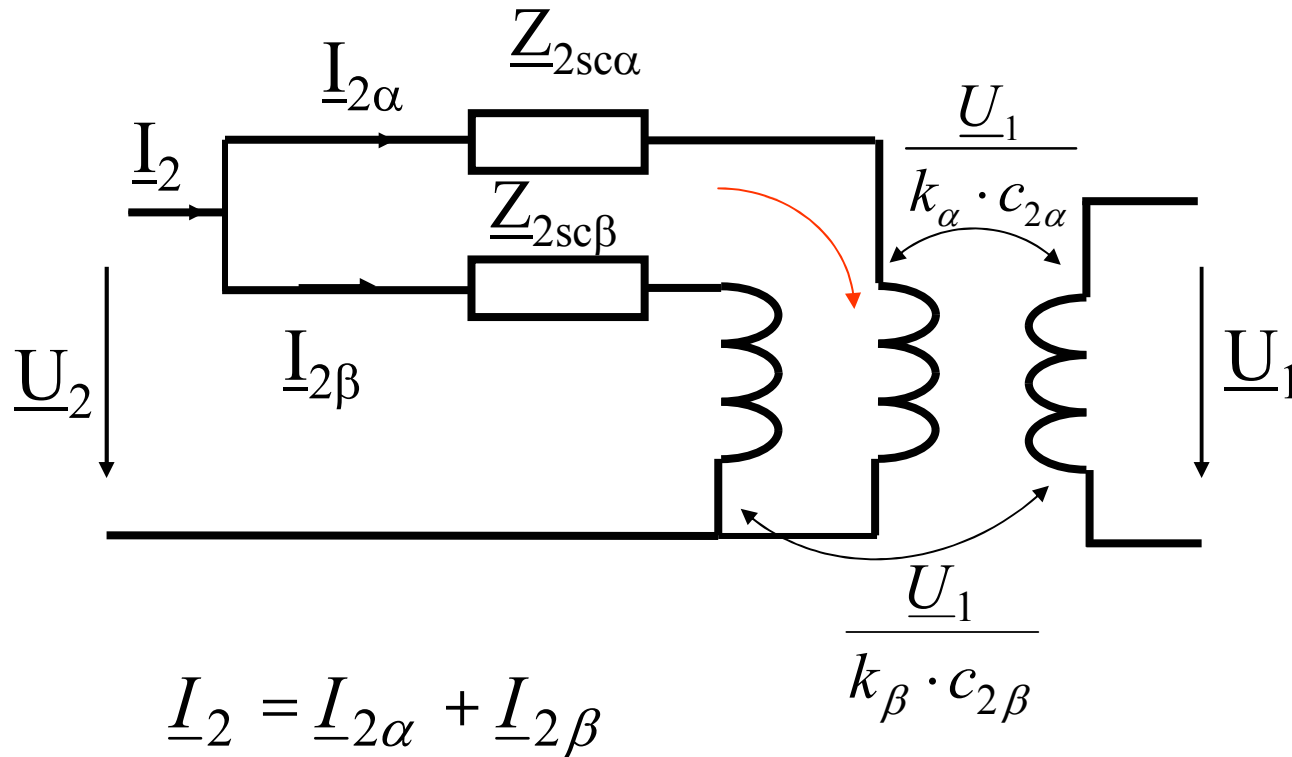
Se neglijează curentul de magnetizare

$$\underline{U}_2 = \underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_{2sc} + \frac{\underline{U}_1}{k \cdot \underline{c}_2}$$



Schema echivalentă

$$\underline{U}_2 = \underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_{2sc} + \frac{\underline{U}_1}{k \cdot \underline{c}_2}$$



$$\underline{I}_2 = \underline{I}_{2\alpha} + \underline{I}_{2\beta}$$

$$\frac{\underline{U}_1}{k_\alpha \cdot c_{2\alpha}}$$

$$\frac{\underline{U}_1}{k_\beta \cdot c_{2\beta}}$$

$$\underline{Z}_{2sc\alpha} \cdot \underline{I}_{2\alpha} + \frac{\underline{U}_1}{k_\alpha \cdot c_{2\alpha}} - \underline{Z}_{2sc\beta} \cdot \underline{I}_{2\beta} - \frac{\underline{U}_1}{k_\beta \cdot c_{2\beta}} = 0$$



Expresia curentului de sarcina

Curentul prin secundarul transformatorului β este :

$$\underline{I}_{2\beta} = \frac{\underline{U}_1 \cdot \left(\frac{1}{k_\alpha \cdot c_{2\alpha}} - \frac{1}{k_\beta \cdot c_{2\beta}} \right)}{\underline{Z}_{2sc\alpha} + \underline{Z}_{2sc\beta}} + \frac{\underline{Z}_{2sc\alpha}}{\underline{Z}_{2sc\alpha} + \underline{Z}_{2sc\beta}} \cdot \underline{I}_2$$

Curentul de circulație

Curentul de sarcină

Care sunt factorii care determina ?

-Diferenta dintre rapoartele de transformare,

-Diferenta dintre tensiunile de scurtcircuit,

-Diferenta dintre curentii de de mers in gol.

-Diferenta dintre puterile nominale ale transformatoarelor.



Expresia curentului de sarcina

$$\frac{\underline{Z}_{2sc\alpha}}{\underline{Z}_{2sc\alpha} + \underline{Z}_{2sc\beta}} = \frac{\underline{U}_{2sc\alpha}}{\underline{U}_{2sc\alpha} + \underline{U}_{2sc\beta} \cdot \frac{S_\alpha}{S_\beta}}$$

-Diferenta dintre tensiunile de scurtcircuit,

Tolerante admise:

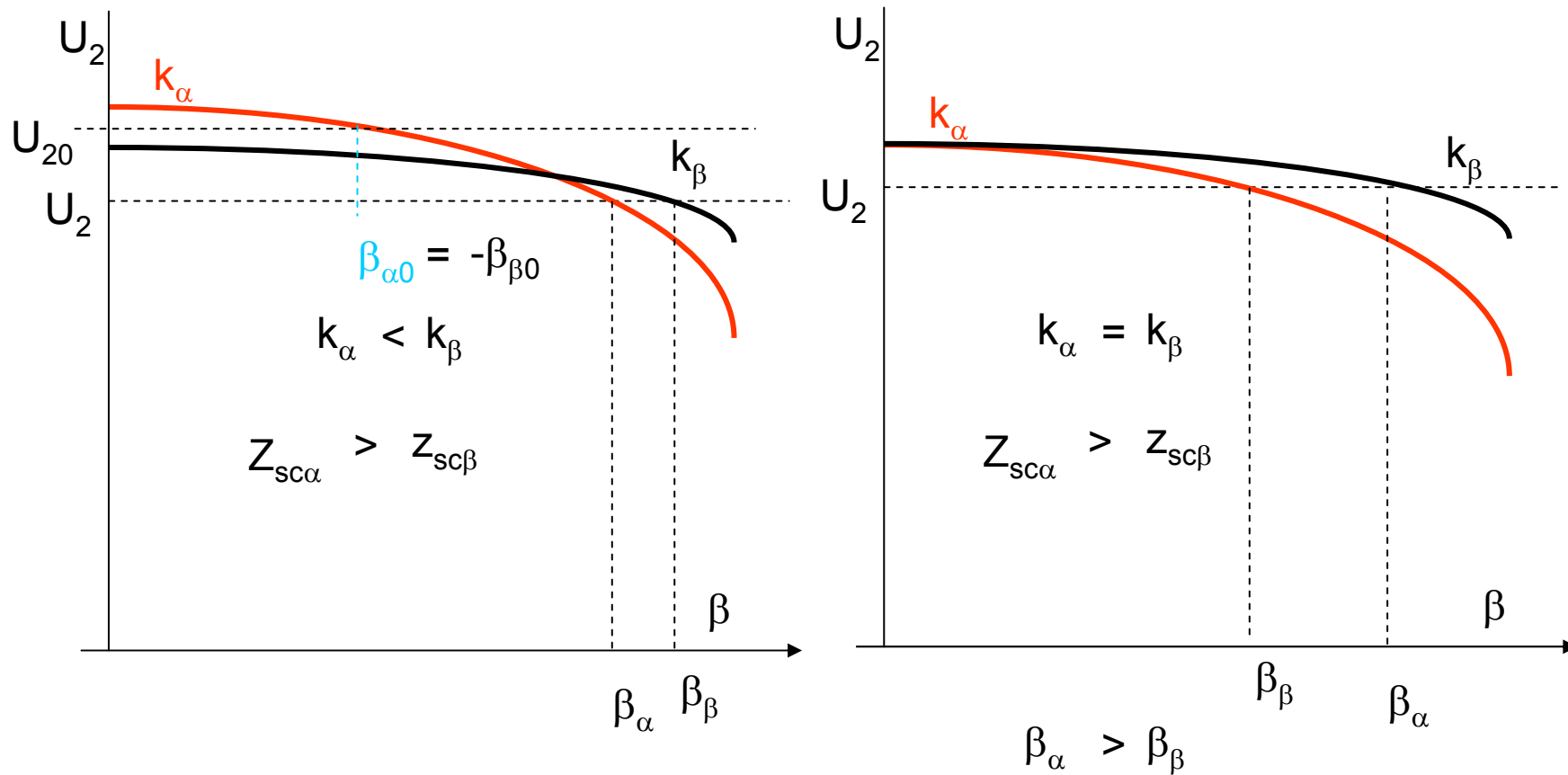
-Diferenta dintre puterile nominale ale transformatoarelor.

$$\left| \frac{k_\alpha - k_\beta}{\sqrt{k_\alpha \cdot k_\beta}} \right| \leq 0.005 \quad \left| \frac{u_{sc\alpha} - u_{sc\beta}}{\sqrt{u_{sc\alpha} \cdot u_{sc\beta}}} \right| \leq 0.1 \quad \left| \frac{S_\alpha - S_\beta}{\sqrt{S_\alpha \cdot S_\beta}} \right| \leq 0.5$$



Valorile curentilor de sarcina

Influenta raportului de transformare si a impedantei (tensiunii) de scurtcircuit asupra repartizarii sarcinii pe transformatoare.



Exemplu

Două transformatoare notate cu α și β funcționează în paralel.

	α	β
puterea nominală	$S_{N\alpha} = 1000 \text{ kVA}$	$S_{N\beta} = 630 \text{ kVA}$
raportul de transformare	$k_{\alpha} = 50,7$	$k_{\beta} = 50,518$
parametrii	$R_1 = 9,4 \Omega;$ $X_{1\sigma} = 37,5 \Omega;$ $R_2' = 7,85 \Omega;$ $X_{2\sigma}' = 31,3 \Omega;$ $R_{1m} = 5381 \Omega;$ $X_{1m} = 55382 \Omega;$	$R_1 = 18 \Omega;$ $X_{1\sigma} = 58,988 \Omega;$ $R_2' = 14,51 \Omega;$ $X_{2\sigma}' = 53,527 \Omega;$ $R_{1m} = 2631 \Omega;$ $X_{1m} = 39144 \Omega;$

Cele două transformatoare au aceeași grupă de conexiune, respectiv Yy_6 și aceeași tensiunea primară de $U_1 = 35 \text{ kV}$.



Exemplu

Constantele transformatoarelor

$$c_{2\alpha} \cong \frac{X_{2\sigma} + X_{2m}}{X_{2m}} \frac{k_{\alpha}^2}{k_{\alpha}^2} = \frac{X'_{2\sigma} + X_{1m}}{X_{1m}} = 1,00056 \quad c_{2\beta} \cong \frac{X'_{2\sigma} + X_{1m}}{X_{1m}} = 1,00136$$

Impedanțele de magnetizare

$$Z_{1m} = \sqrt{R_{1m}^2 + X_{1m}^2}$$

$$Z_{1m\alpha} = 55642 \, \Omega$$

$$Z_{1m\beta} = 39232 \, \Omega$$

Curenții de mers în gol

$$i_0 = \frac{U_1^2}{S_N \cdot Z_{1m}}$$

$$i_{0\alpha} = 2,2 \, \%$$

$$i_{0\beta} = 4,95 \, \%$$

Factorul de putere la mers în gol

$$\cos \varphi_0 = \frac{R_{1m}}{Z_{1m}}$$

$$\cos \varphi_{0\alpha} = 0,0967$$

$$\cos \varphi_{0\beta} = 0,0676$$



Exemplu

- Impedanțele de scurtcircuit dinspre primar

$$\underline{Z}_{1sc\alpha} = \underline{Z}_{1\alpha} + \underline{Z}_{2\alpha}' = 17,272 + j68,918 \Omega$$
$$\underline{Z}_{1sc\beta} = 32,51 + j112,515 \Omega$$

- Impedanțele de scurtcircuit raportate la secundar

$$\underline{Z}_{2sc\alpha} = \frac{1}{k_{\alpha}^2} \underline{Z}_{1sc\alpha} = 6,719 + j26,811 \text{ m}\Omega$$
$$\underline{Z}_{2sc\beta} = 11,955 + j44,088 \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{2sc\alpha} + \underline{Z}_{2sc\beta} = 18,674 + j70,899 \text{ m}\Omega$$



Exemplu

Curentul de egalizare

$$\underline{I}_{2\beta 0} = \frac{\underline{U}_1 \cdot \left(\frac{1}{k_\alpha \cdot c_{2\alpha}} - \frac{1}{k_\beta \cdot c_{2\beta}} \right)}{\underline{Z}_{2sc\alpha} + \underline{Z}_{2sc\beta}} = \frac{\frac{35}{\sqrt{3}} 10^3}{(18,674 + j70,899) \cdot 10^{-3}} \left(\frac{1}{50,7 \cdot 1,00056} - \frac{1}{50,518 \cdot 1,00136} \right)$$

$$\underline{I}_{2\beta 0} = -3,873 + j14,704 = -\underline{I}_{2\alpha 0}$$

Curentul de sarcina $\underline{I}_2 = 1058 - j793,8 \text{ A}$

$$\underline{I}_{2\beta s} = \frac{\underline{Z}_{2sc\alpha}}{\underline{Z}_{2sc\alpha} + \underline{Z}_{2sc\beta}} \cdot \underline{I}_2 = \frac{6,719 + j26,811}{18,674 + j70,899} (1058 - j793,8) = 402,569 - j294,452$$

$$\underline{I}_{2\alpha s} = \frac{\underline{Z}_{2sc\beta}}{\underline{Z}_{2sc\alpha} + \underline{Z}_{2sc\beta}} \cdot \underline{I}_2 = \frac{11,955 + j44,088}{18,674 + j70,899} (1058 - j793,8) = 655 - j499,347$$



Exemplu

Curenti totali

$$\underline{I}_{2\alpha} = \underline{I}_{2\alpha 0} + \underline{I}_{2\alpha s} = 659,702 - j514,05 \quad I_{2\alpha} = 836,334 \quad A$$

$$\underline{I}_{2\beta} = 398,697 - j279,748 \quad I_{2\beta} = 487,05$$

Curenti nominali secundari

$$I_{2n\alpha} = \frac{S_{n\alpha} \cdot k_{\alpha}}{\sqrt{3} \cdot U_1} = \frac{1000 \cdot 50,7}{\sqrt{3} \cdot 35} = 836,333 \quad A \quad I_{2n\beta} = 524,998 \quad A$$

$$\beta_{\alpha} = \frac{I_{2\alpha}}{I_{2n\alpha}} = 1 \quad \beta_{\beta} = \frac{I_{2\beta}}{I_{2n\beta}} = 0,9277$$

Factorul de incarcare

$$\beta = \frac{\sum S_i}{\sum S_{ni}} = \frac{\sqrt{3} \frac{U_1}{\sqrt{k_{\alpha} \cdot k_{\beta}}} \Re\{\underline{I}_2\}}{1000 + 630} = 0,972$$

