

# Capitolul 1

## TRANSFORMATORUL ELECTRIC

Transformatorul electric este un *aparat electromagnetice static*, având doua sau mai multe *înfasurari electrice cuplate magnetic* care transforma parametrii (uzual curentul si tensiunea dar si numarul de faze) *energiei electrice de curent alternativ*.

Deci, atât la intrare cât si la iesire întâlnim aceeași forma de energie (electrică) dar cu parametri diferiti.

Transformatoarele electrice se pot clasifica după următoarele criterii:

- După destinație:
  - *transformatoare de putere* mono sau trifazate, utilizate în transportul și distribuția energiei electrice ca ridicatoare sau coborâtoare de tensiune;
  - *autotransformatoare*, utilizate pentru interconectarea rețelelor de tensiuni diferite sau pentru reglajul tensiunii;
  - *transformatoare de masură* de curent sau de tensiune, utilizate pentru adaptarea diverselor aparate de măsură (ampermetre, voltmetre, wattmetre, etc.) la marimile pe care trebuie să le măsoare;
  - *transformatoare cu destinație specială* (transformatoare de sudură, pentru cuptoare electrice, pentru modificarea numărului de faze, etc).
- După felul mărimii transformate:
  - *transformatoare de tensiune*;
  - *transformatoare de curent*.
- După sensul transformării:
  - *transformatoare ridicatoare*;
  - *transformatoare coborâtoare*.

## 1.1 Elemente constructive ale transformatorului electric

La baza functionarii transformatorului electric sta fenomenul inductiei electromagnetice; din acest motiv este necesara obtinerea câmpurilor magnetice intense cu ajutorul miezurilor din fier, pe care se afla înfasurarile electrice realizate din conductoare de cupru, aluminiu sau aliaje.

Principalele elemente constructive ale transformatorului electric sunt:

- miezul de fier;
- înfasurarile;
- carcasa;
- rezervorul de ulei;
- releul de gaze;
- izolatorii de trecere.

**Miezul de fier** reprezinta circuitul magnetic al transformatorului prin care se închid cu usurinta liniile câmpului magnetic produs de curentii electrici alternativi care strabat înfasurarile.

Miezul de fier se realizeaza din foi de tabla din otel de transformator<sup>1</sup> izolate între ele cu lac izolant sau cu oxizi ceramici. Aceste foi de tabla poarta denumirea de tole. Pentru a obtine miezul de fier aceste tole se împacheteaza în sistemul tesut pentru a micsora spatiile de aer, deci pentru a micsora reluctanta circuitului magnetic. În figura 1.1 se reprezinta modul de asezare a tolelor prin reprezentarea a doua tole consecutive la împachetat.

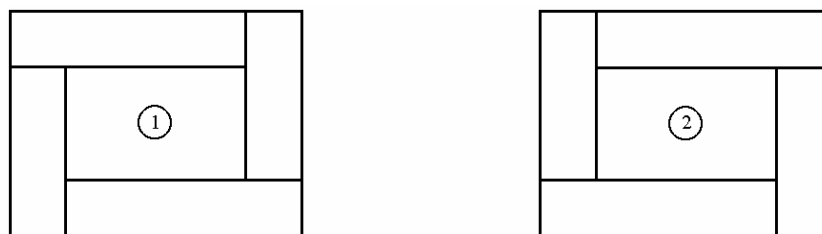


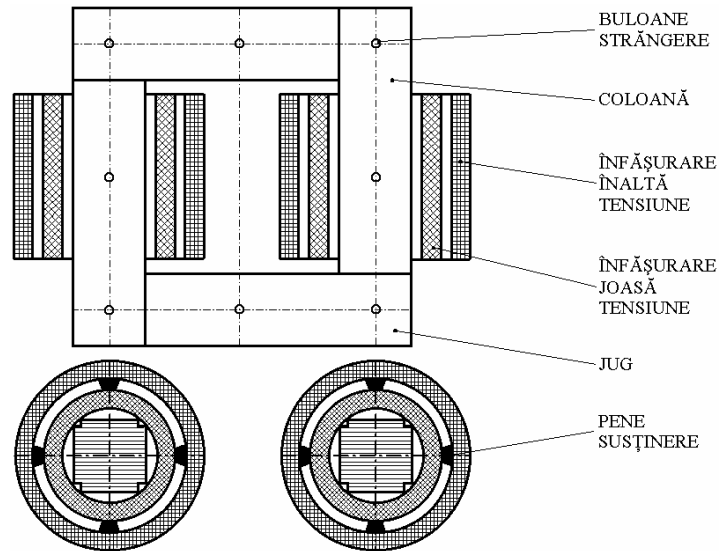
Figura 1.1

Partile din miezul feromagnetic pe care se aseaza înfasurarile se numesc coloane, iar portiunile de miez care închid circuitul magnetic al coloanelor se numesc juguri. Dupa dispunerea coloanelor si a jugurilor se disting doua constructii de baza ale miezului: *cu coloane* (figura 1.2a) si, mai rar, *în manta* (figura 1.2b). Sectiunea transversala a coloanelor si jugurilor poate avea o forma patrata sau mai frecvent de poligon în trepte înscris într-un cerc (figura 1.3), sectiunea jugului

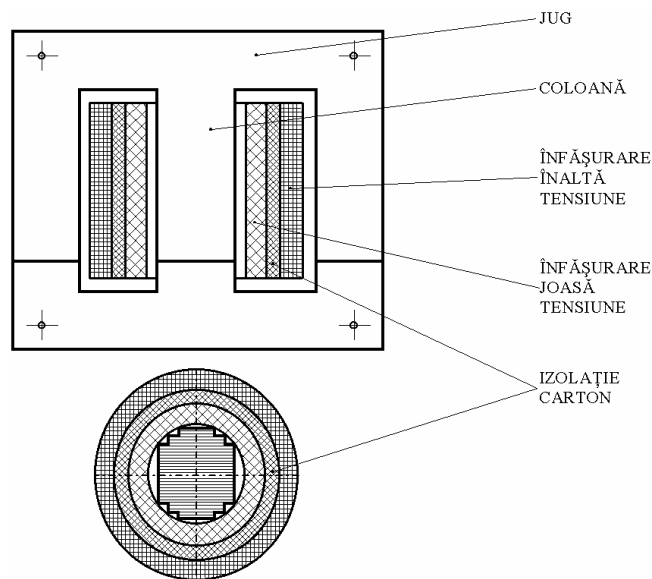
<sup>1</sup> Otelul de transformator sau electrotehnic are în compozitia sa siliciu în proportie relativ mare (3÷4%) conferindu-i astfel calitati magnetice deosebite (reducerea substantiala a pierderilor în fier). În acelasi timp se înrautatesc proprietatile mecanice, otelul devenind mai casant.

realizându-se cu (5 ÷ 15)% mai mare decât cea a coloanei, în scopul reducerii curentului și a pierderilor de mers în gol ale transformatorului.

Strângerea pachetului de tole ce formează miezul feromagnetic se face în cazul transformatoarelor de mică putere cu ajutorul unor cilindri izolanti ce îmbracă coloanele, folosind suruburi sau nituri nemagnetice, iar în cazul transformatoarelor de mare putere cu ajutorul unor buloane, piese profilate și tiranți izolați față de tole.



a)



b)

Figura 1.2

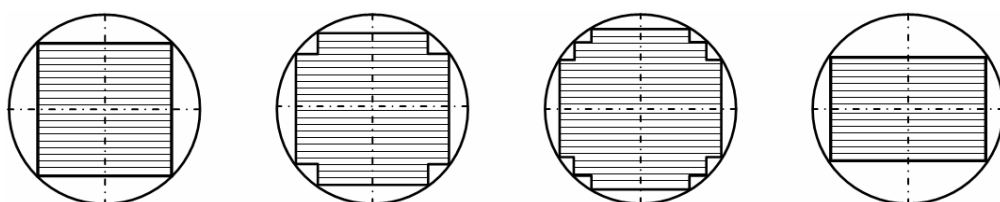


Figura 1.3

La transformatoarele de mare putere se practica în coloane canale de racire paralele sau perpendiculare pe planul tolelor, prin care va circula agentul de racire (aer, ulei de transformator), facilitând astfel eliminarea caldurii dezvoltate ca urmare a pierderilor în fier. Izolarea tolelor cu lac izolant sau oxizi ceramici conduce la diminuarea curentilor turbionari ce se induc în miez, si care, dupa cum se stie, transforma energia electrica în energie termica dezvoltata în miezul feromagnetic.

**Înfasarile** transformatorului se realizeaza din materiale conductoare (Cu, Al sau aliaje). Înfasarile sunt circuitate în care se induc tensiuni electromotoare atât de inductie proprie (autoinductie) cât si de inductie mutuala.

Dupa pozitia reciproca a celor doua înfasarari (primara si secundara) se deosebesc doua tipuri de înfasarari:

- *înfasurari concentrice*, mai exact înfasarari cilindrice coaxiale, înfisararea de joasa tensiune fiind de diametru mai mic, iar înfisararea de înalta tensiune înconjurând pe cea de joasa tensiune, cele doua înfasarari extinzând u-se pe toata înaltimea coloanei.
- *înfasurari alternate*, în care pe înaltimea unei coloane alterneaza parti (galeti) din înfisararea de joasa tensiune cu parti (galeti) din înfisararea de înalta tensiune (figura 1.5). Înfasurarea alternata sau în galeti se foloseste la transformatoarele de putere mare si tensiuni ridicate. Acest tip de înfasarari are însa o mai restrânsa utilizare datorita tehnologiei de fabricatie complicate.

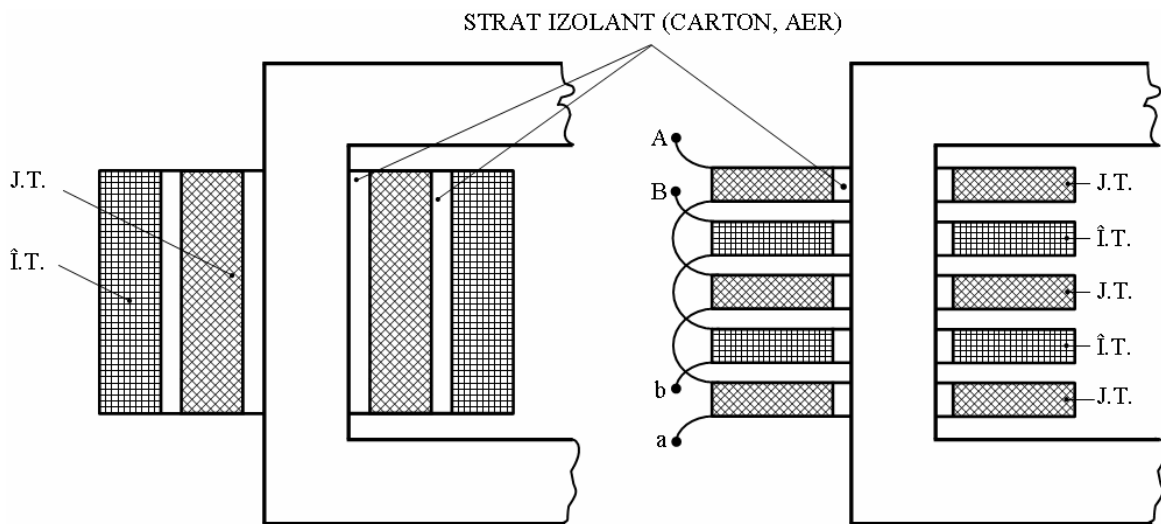


Figura 1.4

Figura 1.5

Înfasarile constau din spire circulare realizate din conductoare de cupru sau aluminiu izolate cu email, rasini sintetice, fibra de sticla etc. Înfasurarile se izoleaza între ele (prin zone de aer sau straturi izolatoare din diferite materiale – prespan, polivinil etc.) si fata de coloane si juguri.

**Carcasa sau cuva** transformatorului. Din punctul de vedere al modului de racire, transformatoarele se împart în următoarele categorii:

- transformatoare uscate, cu racire naturala sau artificiala la care înfășurarile se afla în aer liber (pentru puteri sub 1 kVA);
- transformatoare în ulei cu racire naturala, la care miezul magnetic si înfășurarile sunt scufundate într-o cuva umpluta cu ulei (pentru puteri uzuale 1÷1000 kVA);
- transformatoare în ulei cu racire artificiala în exterior cu aer sau cu circulatie artificiala si racire a uleiului (pentru puteri foarte mari);

Cuva se realizeaza din tabla de otel (figura 1.6) neteda sau ondulata (pentru marirea suprafetei de racire) si serveste la sustinerea agentului de racire si la protejarea transformatorului fata de influentele mediului înconjurator. La transformatoarele de puteri mari si foarte mari cuva este prevazuta cu tevi prin care circula agentul de racire sau cu radiatoare.

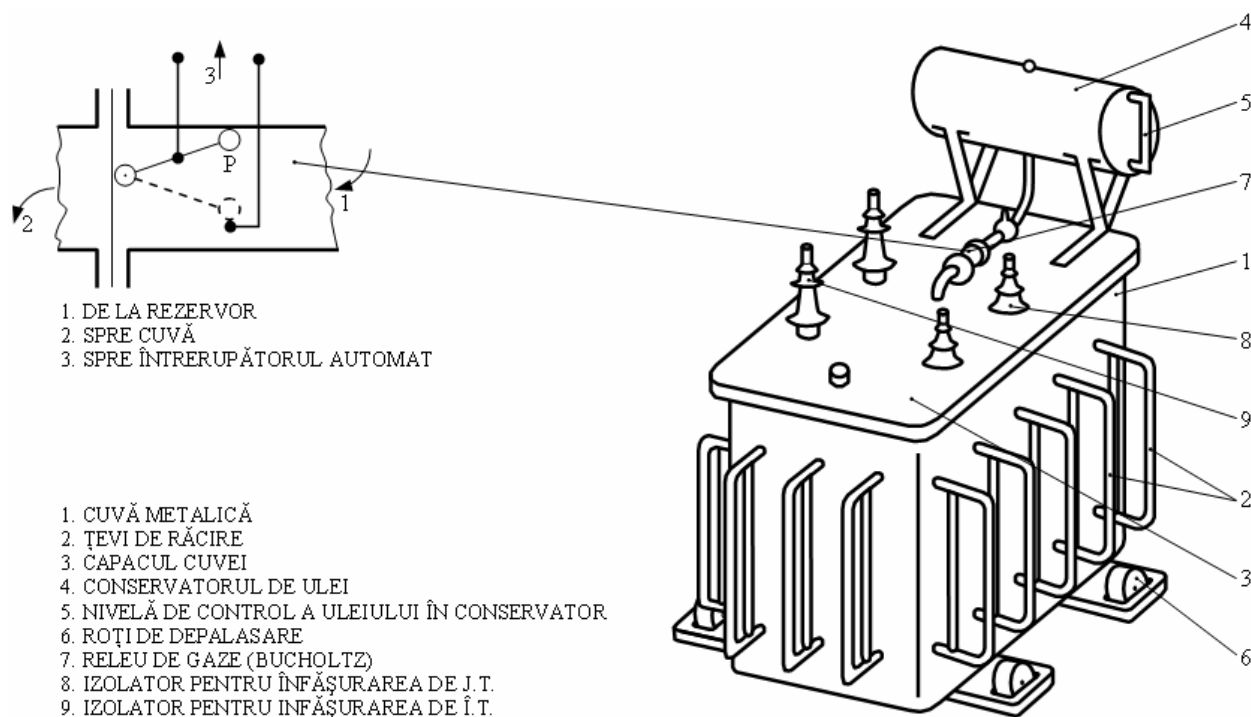


Figura 1.6

**Rezervorul de ulei (conservatorul).** Uleiul din cuva joaca un rol important atât prin calitatile izolatoare mai bune decât ale aerului, cât si prin îmbunătățirea racirii înfășurarilor. Pentru asigurarea permanenta a umplerii cuvei cu ulei, pe capacul cuvei se afla un vas umplut în parte, de asemenea cu ulei, care preia totodata si variatiile de volum ale uleiului datorita variatiei temperaturii de functionare. Acest vas se numeste **rezervor** sau **conservator de ulei** (figura 1.6).

**Releul de gaze,** serveste la protectia transformatorului în caz de avarie (scurtcircuit, strapungeri între spire, suprasarcini de durata mare, etc.) Acest aparat este montat pe teava care leaga rezervorul de ulei cu carcasa (figura 1.6) si functioneaza pe baza gazelor degajate în ulei

atunci când apare o energie termică importantă (ca urmare a unor situații anormale de funcționare). După cum se vede (figura 1.6) plutitorul P coboară atunci când nivelul fluidului scade sub acțiunea presiunii gazelor. Astfel se închide circuitul de comandă a întrerupătorului automat care la rândul său decuplează transformatorul de la rețeaua de alimentare.

**Izolatorii de trecere**, servesc la izolarea electrică a înfășurărilor și a rețelei exterioare față de cuva transformatorului (figura 1.6). Aceștia se realizează din porțelan, având forme și dimensiuni care depind de tensiunea de funcționare a înfășurării pe care o deservește.

### **Regim nominal, marimi nominale, semne convenționale, marcarea bornelor**

Regimul de funcționare pentru care este proiectat transformatorul și în care nu se depășesc limitele admisibile de încălzire ale elementelor sale, în condiții normale de lucru se numește *regim nominal de funcționare*. El este caracterizat prin *marimile nominale*, înscrise pe placuța indicatoare a transformatorului: puterea nominală, definită ca puterea aparentă la bornele înfășurării secundare, tensiunea nominală de linie primară respectiv secundară, curentul nominal de linie primară și secundară, frecvența nominală, numărul de faze, schema și grupa de conexiuni, regimul de funcționare (continuu sau intermitent), felul răcirii.

Reprezentarea schematică a transformatorului se face prin simboluri convenționale standardizate sau nu. În figura 1.7 se indică unele din aceste simboluri întâlnite curent.

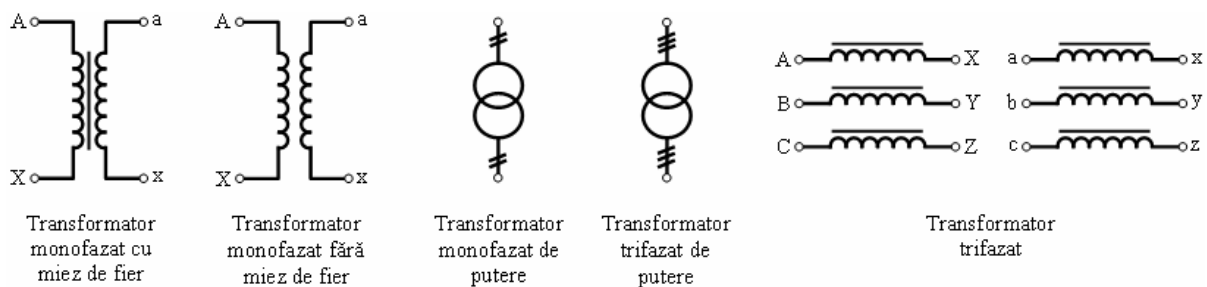


Figura 1.7

Notarea bornelor transformatorului este de asemenea, standardizată. Bornele înfășurărilor primare se notează cu litere mari (figura 1.7), iar cele ale înfășurărilor secundare se notează cu litere mici. Începuturile înfășurărilor primare se notează cu A, B, C, iar sfârșiturile cu X, Y, Z, iar la secundară respectiv cu literele a, b, c și x, y, z.

## 1.2 Transformatorul monofazat

Pentru prezentarea teoriei transformatorului este necesara stabilirea conventiei de asociere a sensurilor de referinta a curenților si tensiunilor la borne. Pentru aceasta consideram un transformator cu doua înfasurari (reprezentate pe coloane diferite pentru claritatea expunerii - figura 1.9): o înfasurare care primeste energie electrica de curent alternativ, numita *înfasurare primara*, ale carei marimi, purtând indicele "1" se numesc marimi primare si o înfasurare care cedeaza energie de curent alternativ transformata, numita *înfasurare secundara*, ale carei marimi purtând indicele "2" se numesc marimi secundare.

Prezentarea functionarii si a teoriei transformatorului monofazat este structurata pe cele trei regimuri de functionare: mers în *gol*, *sarcina* si *scurtcircuit*.

Teoria transformatorului real se prezinta în mod gradual introducându-se unele ipoteze simplificatoare la care apoi se poate renunta pentru a ne putea apropia de cazul real. Astfel se introduce notiunea de transformator ideal care se refera la un transformator ce are un cuplaj magnetic perfect (fara câmp magnetic de dispersie) rezistentele termice ale celor doua înfasurari se considera nule ( $R_1 = R_2 = 0$ ) deci, nu avem pierderi Joule si de asemenea, pierderile în fierul transformatorului (datorita curenților turbionari si histerezisului) se considera nule.

Miezul de fier sub actiunea câmpului magnetic se considera nesaturat, punctul de functionare pe caracteristica de magnetizare - corespunzator fluxului maxim - este pe portiunea liniara (punctul N din figura 1.8) foarte aproape de cotul curbei.

În aceasta ipoteza daca tensiunea aplicata primarului de la retea este sinusoidala, curentul de mers în gol va fi sinusoidal ca si fluxurile prin miez ceea ce ne va permite sa trecem marimile sinusoidale de timp în complex.

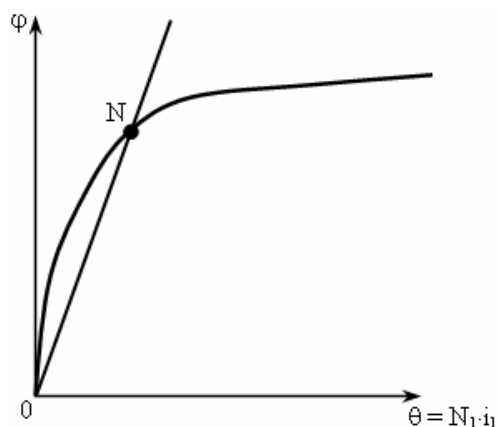


Figura 1.8

### 1.2.1 Functionarea transformatorului în gol

În acest regim de functionare, impedanta la bornele secundarului (de sarcina)  $Z \Rightarrow \infty$ , iar curentul secundar  $i_2 \Rightarrow 0$ , deci înfășurarea secundara nu este strabatuta de curent.

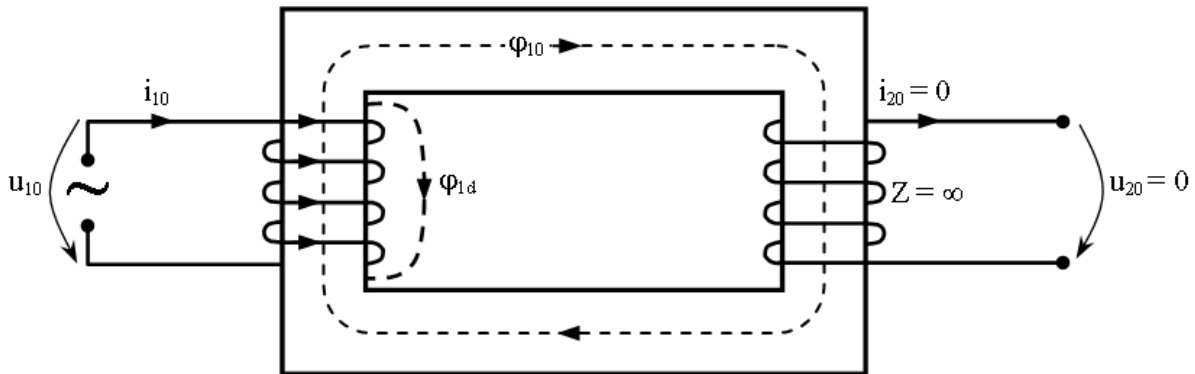


Figura 1.9

Deoarece în secundar nu se transfera energie ( $i_{20} = 0$ ) întreaga energie absorbita de primar de la retea serveste la crearea câmpului magnetic din miez si cel de dispersie (energie reactiva) si la acoperirea pierderilor Joule din primar (energie activa). Experienta arata ca intensitatea curentului primar de mers în gol este mult mai mica decât intensitatea curentului primar nominal  $[I_{10} = (2 \div 10)\% I_{1n}]$ .

Bilantul de puteri active la mersul în gol va fi:

$$P_{10} = P_{Fe} + P_{Cu_1}, \quad (1.1)$$

în care:

- $P_{10}$  - puterea activa absorbita în primar de la retea;
- $P_{Fe}$  - sunt pierderile în fierul transformatorului compuse din pierderile datorate curentilor turbionari  $P_T$  si pierderile datorate histerezisului magnetic  $P_H$  ( $P_H = P_T + P_H$ );
- $P_{Cu_1}$  - sunt pierderile prin efect termic (Joule) din cuprul înfășurarii primare de rezistenta  $R_1$  ( $P_{Cu_1} = R_1 \cdot I_{10}^2$ ).

Întrucât  $I_{10} \ll I_{1n}$ , se pot neglija pierderile din cuprul înfășurarii primare:  $P_{Cu_1} = R_1 \cdot I_{10}^2 \approx 0$  si relatia (1.1) devine:

$$P_{10} \approx P_{Fe}. \quad (1.2)$$

Relatia (1.2) ne arata ca se pot aproxima pierderile în fierul transformatorului cu puterea activa absorbita în gol (amintim ca pierderile în fier depind de tensiune si aceasta la mersul în gol



este cea nominala). Rezulta, de aici, ca printr-o încercare de mers în gol, la tensiunea nominala, se pot determina experimental pierderile nominale în fierul transformatorului.

### 1.2.2 Ecuatiile transformatorului la mers în gol. Diagrama de fazori.

#### Schema echivalenta

Curentul  $i_{10} = I_{10} \cdot \sqrt{2} \cdot \cos \omega \cdot t$  produce un câmp magnetic ale carui linii de câmp se închid prin miezul de fier strabatând ambele înfasurari si care produc fluxul principal  $\phi_{10}$  prin sectiunea miezului (figura 1.9). Acelasi curent produce si fluxul magnetic de dispersie  $\phi_{1d}$  care se închide prin aer. Daca consideram miezul magnetic nesaturat, atunci aceste fluxuri au aceeasi variatie în timp ca si curentul care le-a produs deci:

$$\begin{aligned}\phi_{10} &= \Phi_{10m} \cdot \cos \omega \cdot t; \\ \phi_{1d} &= \Phi_{1dm} \cdot \cos \omega \cdot t.\end{aligned}\quad (1.3)$$

Fluxul  $\phi_{10}$  strabatând ambele înfasurari induce în acestea tensiunile electromotoare:

$$\begin{aligned}e_1 &= -N_1 \cdot \frac{d\phi_{10}}{dt} = N_1 \cdot \omega \cdot \Phi_{10m} \cdot \sin \omega \cdot t = E_{1m} \cdot \sin \omega \cdot t; \\ e_2 &= -N_2 \cdot \frac{d\phi_{10}}{dt} = N_2 \cdot \omega \cdot \Phi_{10m} \cdot \sin \omega \cdot t = E_{2m} \cdot \sin \omega \cdot t.\end{aligned}\quad (1.4)$$

Valorile efective ale t.e.m. se pot scrie:

$$\begin{aligned}E_1 &= \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{\sqrt{2}} \cdot N_1 \cdot \Phi_{10m} = 4,44 \cdot N_1 \cdot f \cdot \Phi_{10m}; \\ E_2 &= \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{\sqrt{2}} \cdot N_2 \cdot \Phi_{10m} = 4,44 \cdot N_2 \cdot f \cdot \Phi_{10m}.\end{aligned}\quad (1.5)$$

Daca se face raportul:

$$k_u = \frac{e_1}{e_2} = \frac{E_{1m}}{E_{2m}} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2};\quad (1.6)$$

observam ca aceste tensiuni electromotoare au valori efective direct proportionale cu numarul de spire ale înfasurarilor, proprietate fundamentala a transformatorului.

Fluxul magnetic de dispersie  $\phi_{1d}$  va induce în primar tensiunea electromotoare:

$$e_{1d} = -N_1 \cdot \frac{d\phi_{1d}}{dt} = N_1 \cdot \omega \cdot \Phi_{1dm} \cdot \sin \omega \cdot t = E_{1dm} \cdot \sin \omega \cdot t.\quad (1.7)$$

Cunoscând aceste t.e.m. induse se pot scrie ecuatiile de tensiuni (teorema a II-a a lui Kirchhoff) pe cele doua circuite electrice ale transformatorului, obtinând:

$$\begin{aligned}e_1 + e_{1d} &= R_1 \cdot i_{10} - u_{10}; \\ e_2 &= u_{20}.\end{aligned}\quad (1.8)$$

T.e.m.  $e_{1d}$  se poate scrie tinând cont de inductivitatea circuitului magnetic  $L_{1d}$  corespunzătoare câmpului magnetic de dispersie:

$$e_{1d} = -N_1 \cdot \frac{d\phi_{1d}}{dt} = -L_{1d} \cdot \frac{di_{10}}{dt}. \quad (1.9)$$

Tinând cont de relația (1.9), ecuațiile (1.8) se pot scrie în complex:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{10} &= -\underline{E}_1 + \underline{I}_{10} \cdot (\underline{R}_1 + j \cdot \underline{X}_{1d}); \\ \underline{U}_{20} &= \underline{E}_2. \end{aligned} \quad (1.10)$$

Aceste ecuații pot fi reprezentate prin diagrama de fazori din figura 1.10. Curentul  $I_{10}$  s-a reprezentat defazat înaintea fluxului  $\Phi_{10}$  cu unghiul  $\alpha$  tinând cont astfel de pierderile în fier. Astfel:

$$\underline{I}_{10} = \underline{I}_{1m} + \underline{I}_{1a}, \quad (1.11)$$

unde:

- $I_{1m}$  – componenta reactivă a curentului de gol care servește la crearea fluxului magnetic;
- $I_{1a}$  – componenta activă a curentului care corespunde pierderilor în fier (s-au neglijat pierderile  $P_{Cu1} = R_1 \cdot I_{10}^2 \approx 0$ ).

Cum  $\underline{I}_{10} \ll \underline{I}_{1m}$  ecuațiile (1.10) se pot scrie:

$$\begin{cases} \underline{U}_{10} \approx -\underline{E}_1; \text{ sau } \frac{U_{10}}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}. \\ \underline{U}_{20} = \underline{E}_2 \end{cases} \quad (1.12)$$

Raportul  $\frac{U_{10}}{U_{20}}$  poartă denumirea de **raport de transformare** al transformatorului. Aceasta

marime poate fi determinată experimental printr-o încercare de mers în gol.

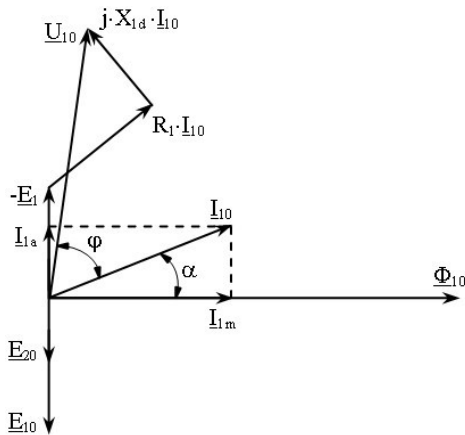


Figura 1.10

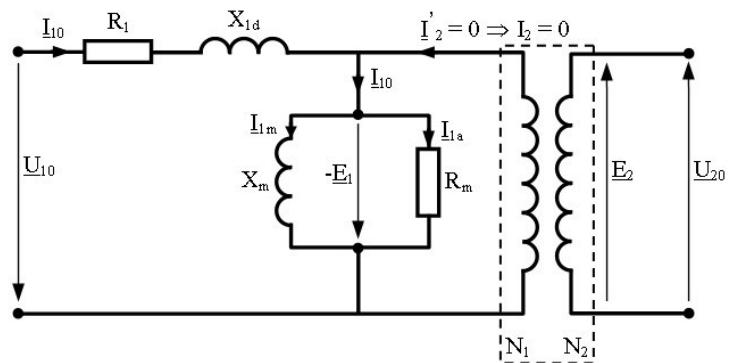


Figura 1.11

Ecuatiile functionarii în gol a transformatorului (1.10) ne permit sa reprezentam cele doua circuite electrice ale transformatorului (separate galvanic), unite într-un singur circuit sub forma unei scheme echivalente. Aceasta schema echivalenta este reprezentata în figura 1.11, ecuatiile (1.10) putându-se usor verifica pe aceasta schema. În schema s-au folosit notatiile:

$R_m$  – rezistenta echivalenta pierderilor în fier:

$$P_{10} = R_m \cdot I_{10}^2 \Rightarrow R_m = \frac{P_{10}}{I_{10}^2}; \quad (1.13)$$

$X_m$  – reactanta magnetica corespunzatoare fluxului principal  $\Phi_{10}$ , si se determina din puterea reactiva consumata de la retea pentru formarea acestui câmp magnetic:

$$Q_{10} = X_m \cdot I_{10}^2 \Rightarrow X_m = \frac{Q_{10}}{I_{10}^2}. \quad (1.14)$$

Schema echivalenta, serveste prin urmare la calculul parametrilor transformatorului. Schema echivalenta se termina cu un transformator ideal cu  $N_1$  si  $N_2$  spire fara dispersii de câmp magnetic si fara pierderi.

### 1.2.3 Functionarea transformatorului în sarcina

În acest regim de functionare, la bornele înfasurarii secundare se afla conectata o impedanta de sarcina  $Z$  prin care va circula curentul secundar  $i_2$  (figura 1.10). Energia electrica furnizata primarului de catre retea de alimentare este transmisa pe cale electromagnetica secundarului (impedantei de sarcina  $Z$ ).

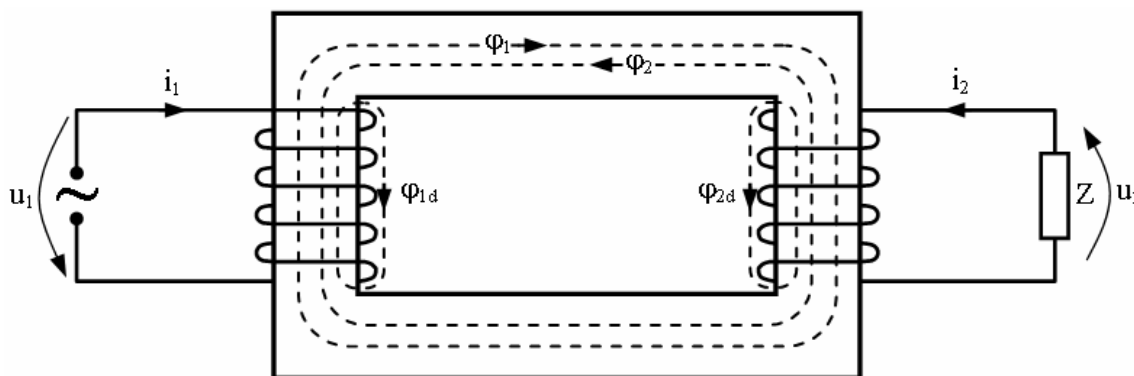


Figura 1.12

### 1.2.4 Ecuatiile transformatorului în sarcina

Fluxul magnetic  $\Phi_1$  produs de curentul primar  $i_1$ , induce în secundar curentul  $i_2$ . Acest curent produce fluxul magnetic de reacție  $\Phi_2$ . Presupunând miezul de fier nesaturat se poate afirma ca rezultanta celor doua fluxuri:

$$\underline{\Phi}_1 + \underline{\Phi}_2 = \underline{\Phi}_{10}, \quad (1.15)$$

este chiar fluxul magnetic de mers în gol produs în primar.

Înlocuind în relația (1.15) fluxurile cu expresiile lor din legea lui Ohm pentru circuite magnetice obținem:

$$\frac{N_1 \cdot \underline{I}_1}{\mathfrak{R}} + \frac{N_2 \cdot \underline{I}_2}{\mathfrak{R}} = \frac{N_1 \cdot \underline{I}_{10}}{\mathfrak{R}}; \quad (1.16)$$

unde:

- $N_1, N_2$  - numărul de spire al înfășurarilor primara, secundara;
- $\mathfrak{R}$  - reluctanta magnetica a miezului de fier.

Relația (1.16) se mai poate scrie:

$$\underline{I}_1 + \frac{N_2}{N_1} \cdot \underline{I}_2 = \underline{I}_{10} \Leftrightarrow \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = \underline{I}_{10}, \quad (1.17)$$

în care,  $\underline{I}'_2 = \frac{\underline{I}_2}{k_u}$  este curentul secundar raportat la primar.

Ecuatiile de tensiuni pe circuitul primar și secundar vor fi:

$$\begin{aligned} e_1 + e_{1d} &= R_1 \cdot i_1 - u_1; \\ e_2 + e_{2d} &= R_2 \cdot i_2 + u_2. \end{aligned} \quad (1.18)$$

unde:  $e_{1d}, e_{2d}$  - tensiunile electromotoare induse de fluxul primar de dispersie  $\Phi_{1d}$ , respectiv de fluxul secundar de dispersie  $\Phi_{2d}$ , și au expresiile:

$$\begin{aligned} e_{1d} &= -N_1 \cdot \frac{d\Phi_{1d}}{dt} = -L_{1d} \cdot \frac{di_1}{dt}; \\ e_{2d} &= -N_2 \cdot \frac{d\Phi_{2d}}{dt} = -L_{2d} \cdot \frac{di_2}{dt}. \end{aligned} \quad (1.19)$$

Se pot scrie astfel ecuațiile (1.18) în complex:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \cdot (R_1 + j \cdot X_{1d}); \\ \underline{U}_2 &= \underline{E}_2 - \underline{I}_2 \cdot (R_2 + j \cdot X_{2d}). \end{aligned} \quad (1.20)$$

în care:  $X_{1d} = \omega \cdot L_{1d}$ , și  $X_{2d} = \omega \cdot L_{2d}$  sunt reactantele de dispersie primara, respectiv secundara.

Ecuatia de tensiuni în secundar (1.20) se mai poate scrie (înmulțind ambii membri cu termenul  $\frac{N_1}{N_2}$ ):

$$\frac{N_1}{N_2} \cdot \underline{U}_2 = \frac{N_1}{N_2} \cdot \underline{E}_2 - \frac{N_2}{N_1} \cdot \underline{I}_2 \cdot \left[ \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot R_2 + j \cdot \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot X_{2d} \right]. \quad (1.21)$$

Notând:

$$\frac{N_1}{N_2} \cdot \underline{U}_2 = k_u \cdot \underline{U}_2 = \underline{U}'_2; \quad \frac{N_1}{N_2} \cdot \underline{E}_2 = k_u \cdot \underline{E}_2 = \underline{E}'_2; \quad \frac{N_2}{N_1} \cdot \underline{I}_2 = \frac{1}{k_u} \cdot \underline{I}_2 = k_i \cdot \underline{I}_2 = \underline{I}'_2;$$

$$\left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot R_2 = k_u^2 \cdot R_2 = R'_2; \quad \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot X_{2d} = k_u^2 \cdot X_{2d} = X'_{2d};$$

și înlocuind în (1.21) se obține ecuația de tensiuni din secundar cu marimile raportate la primar:

$$\underline{U}'_2 = \underline{E}'_2 - \underline{I}'_2 \cdot \left( R'_2 + j \cdot X'_{2d} \right). \quad (1.22)$$

Tinând cont și de relațiile (1.5) se remarcă faptul că tensiunea electromotoare utilă secundară  $\underline{E}_2$  prin raportare la primar se identifică cu tensiunea electromotoare primară  $\underline{E}'_2 = \underline{E}_1$ . De asemenea prin raportarea marimilor secundare la primar puterea electrică (atât activă cât și cea reactivă) se conservă. Într-adevăr se poate verifica ușor că:

$$\underline{U}'_2 \cdot \underline{I}'_2 = \underline{U}_2 \cdot \underline{I}_2; \quad R'_2 \cdot \underline{I}'_2{}^2 = R_2 \cdot \underline{I}_2{}^2; \quad X'_{2d} \cdot \underline{I}'_2{}^2 = X_{2d} \cdot \underline{I}_2{}^2; \quad \underline{E}'_2 \cdot \underline{I}'_2 = \underline{E}_2 \cdot \underline{I}_2.$$

Mentionăm că la aceleași rezultate s-ar fi ajuns dacă marimile primare s-ar fi raportat la secundar, în care caz ar fi fost valabile legile de raportare (1.21), cu condiția de a se fi schimbat indicii "1" și "2" între ei.

În acest fel, tinând cont de ecuația curenților (1.17), de ecuația tensiunilor din primar (1.20) și din secundar raportată la primar (1.22), precum și de corecția adusă datorită pierderilor în fier (1.11), se poate scrie sistemul de ecuații care caracterizează funcționarea transformatorului în sarcină:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= -\underline{E}_1 + R_1 \cdot \underline{I}_1 + j \cdot X_{1d} \cdot \underline{I}_1; \\ \underline{U}'_2 &= \underline{E}_1 - R_2 \underline{I}'_2 - j \cdot X_{2d} \cdot \underline{I}'_2; \\ \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 &= \underline{I}_{10} = \underline{I}_{1m} + \underline{I}_{1a}; \\ \underline{E}_1 &= -j \cdot X_m \cdot \underline{I}_{1m} = -R_m \cdot \underline{I}_{1a}; \\ \underline{U}'_2 &= R'_2 \cdot \underline{I}'_2 + j \cdot X'_{2d} \cdot \underline{I}'_2; \end{aligned} \quad (1.23)$$

$R'$  și  $X'$  fiind parametrii sarcinii raportați la primar conform relațiilor (1.21).

Acestui sistem îi corespunde schema echivalenta din figura 1.13 si diagrama de fazori din figura 1.14.

Modul de realizare a diagramei de fazori este urmatorul:

- se porneste de la  $\underline{\Phi}_{10}$  care se ia ca origine de faza;
- se reprezinta ecuatia curentilor, tinând cont ca  $\underline{I}_{10}$  nu este în faza cu fluxul  $\underline{\Phi}_{10}$ , defazajul  $\alpha$  depinzând de marimea pierderilor active în fier ( $\underline{I}_{10}$ );
- se reprezinta ecuatia de tensiuni în primar si secundar.

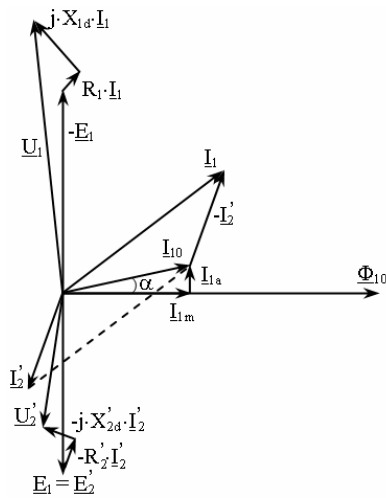


Figura 1.13

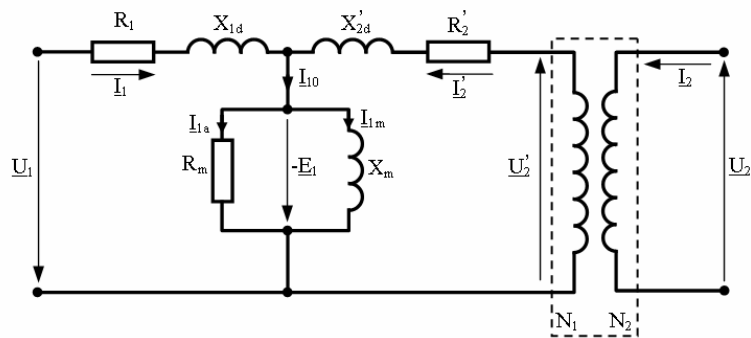


Figura 1.14

Schema echivalenta (figura 1.14) se termina cu un transformator ideal (fara pierderi si dispersii) cu numerele de spire  $N_1$  si  $N_2$  la iesirea caruia se obtine tensiunea secundara reala si curentul secundar real (marimi neraportate). Aceasta schema permite calcularea parametrilor transformatorului relativ simplu.

Din cele prezentate rezulta urmatoarele concluzii:

### Concluzia 1

În mod normal, în scopul obtinerii unui randament înalt si a reducerii pe cât posibil a caderilor ohmice de tensiune în sarcina, transformatoarele se construiesc cu o rezistenta  $R_1$  a înfasurarii primare relativ redusa, astfel caderea efectiva de tensiune  $R_1 \cdot I_1$  este foarte mica în raport cu tensiunea efectiva aplicata  $U_1$  chiar în regimul nominal de functionare. De obicei  $R_1 \cdot I_1 \approx 0,01 \cdot U_1$ . Prin urmare termenul  $R_1 \cdot I_1$  este mult exagerat în comparatie cu  $U_1$ , în diagrama fazoriala, pentru a mari claritatea figurii.

De asemenea, amplitudinea fluxului de dispersie  $\phi_{1d}$  este relativ redusa fata de amplitudinea fluxului util  $\phi_{10}$ , deoarece fluxul de dispersie are un lung parcurs prin aer (figura 1.12), pe când

fluxul util se închide prin miezul foarte permeabil al circuitului feromagnetic. În consecință, și termenul  $j \cdot X_{ld} \cdot I_1$  este relativ foarte redus în comparație cu  $\underline{E}_1$ , fiind mult exagerat în diagrama fazorială (figura 1.13). De obicei, în regim nominal,  $X_{ld} \cdot I_1 = 0,05 \cdot E_1$ .

Asadar, cu foarte bună aproximație, putem spune că fazorii  $\underline{U}_1$  și  $\underline{E}_1$ , practic se confundă, indiferent de încărcare. Deci:

$$\underline{U}_1 \approx -\underline{E}_1 = j \cdot \omega \cdot N_1 \cdot \underline{\Phi}_{10m}; \quad U_1 \approx E_1 = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_{10m}.$$

Dacă se consideră  $U_1 = \text{ct.}$  și  $f = \text{ct.}$ , rezultă că  $\Phi_{10m} = \text{ct.}$

*Fluxul util în miezul feromagnetic al unui transformator este dictat de amplitudinea de tensiune primară și de frecvența rețelei de alimentare, indiferent de gradul de încărcare al său.*

Putem astfel considera:  $E_1 \approx \text{ct.}$ ;  $I_{1m} \approx \text{ct.}$ ;  $I_{1a} \approx \text{ct.}$ ;  $P_{Fe} \approx \text{ct.}$

### Concluzia 2

Rezistența  $R_2'$  a secundarului raportată la primar este aproximativ egală cu rezistența  $R_1$  a primarului. Într-adevăr, considerând: densitățile de curent  $J_1 \approx J_2$ ; lungimile înfășurărilor  $l_1 \approx l_2$  și neglijând curentul  $I_{10}$  se poate considera  $N_1 \cdot I_1 \approx N_2 \cdot I_2$ , deci:

$$R_2' = R_2 \cdot \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 = \rho \cdot \frac{N_2 \cdot l_2 \cdot J_2}{I_2} \cdot \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \approx \rho \cdot \frac{N_1 \cdot l_1 \cdot J_1}{I_1} = R_1.$$

Se poate arăta că, în condițiile aceluiași aproximații,  $X_{2d}' \cong X_{1d}$ . Prin urmare, prin raportare, parametrii celor două înfășurări au aproximativ aceleași valori numerice.

### 1.2.5 Funcționarea transformatorului în scurtcircuit

În acest regim înfășurarea secundară este scurtcircuitată  $Z \rightarrow 0$ . Dacă s-ar alimenta primarul la tensiunea nominală, curentii prin cele două înfășurări ar capăta valori mari care ar duce la arderea înfășurărilor. De aceea, pentru a putea realiza acest regim de funcționare se alimentează primarul la o tensiune redusă în așa fel încât curentii prin cele două înfășurări să aibă valorile lor nominale. Această tensiune poartă denumirea de *tensiune de scurtcircuit a transformatorului*  $u_{sc}$ , fiind un parametru important al acestuia (două sau mai multe transformatoare nu pot funcționa în paralel dacă nu au aceeași tensiune de scurtcircuit).

Deoarece la functionarea în scurtcircuit cele doua înfășurari sunt parcurse de curenti, acest regim este asemanator cu regimul în sarcina cu particularitatile respective ( $U_2 \Rightarrow 0, I_{10} \approx 0$ ), deoarece  $U_{1sc} \ll U_{1n}$  (figura 1.15).

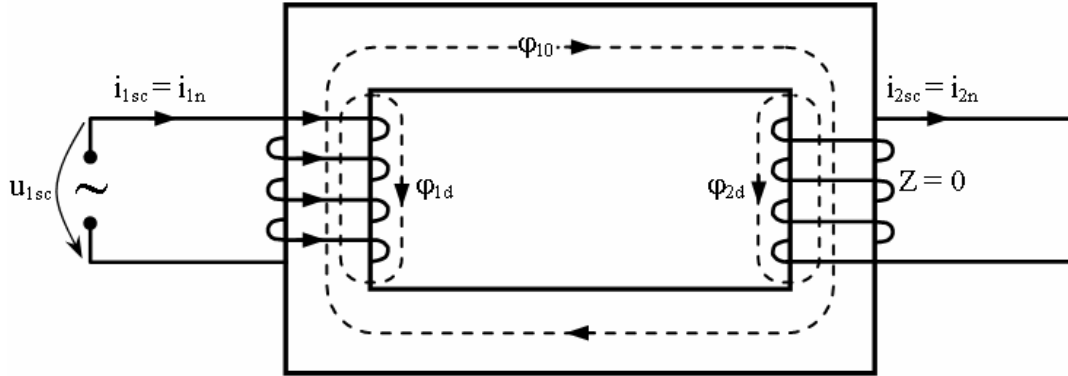


Figura 1.15

### 1.2.6 Ecuatiile transformatorului la scurtcircuit

Aceste ecuatii se obtin din cele de mers în sarcina (1.23):

$$\begin{aligned} \underline{U}_{1sc} &= -\underline{E}_1 + R_1 \cdot \underline{I}_{1n} + j \cdot X_{1d} \cdot \underline{I}_{1n}; \\ 0 &= \underline{E}_1 - R_2' \cdot \underline{I}_{2n} - j \cdot X_{2d}' \cdot \underline{I}_{2n}; \\ \underline{I}_{1n} + \underline{I}_{2n} &= 0. \end{aligned} \quad (1.24)$$

Putem realiza astfel schema echivalenta a transformatorului la scurtcircuit (figura 1.17).

Din aceasta schema se poate scrie ecuatiile de tensiuni:

$$\underline{U}_{1sc} = \underline{I}_{1n} \cdot \left[ \left( R_1 + R_2' \right) + j \cdot \left( X_{1d} + X_{2d}' \right) \right]; \quad (1.25)$$

sau, în modul:

$$U_{1sc} = I_{1n} \cdot \sqrt{\left( R_1 + R_2' \right)^2 + \left( X_{1d} + X_{2d}' \right)^2} = I_{1n} \cdot \sqrt{R_{sc}^2 + X_{sc}^2}; \quad (1.26)$$

unde:

- $R_{sc} = R_1 + R_2'$  - se numeste rezistenta de scurtcircuit a transformatorului;
- $X_{sc} = X_{1d} + X_{2d}'$  - se numeste reactanta de scurtcircuit a transformatorului.

Schema echivalenta astfel simplificata se mai numeste si schema lui Kapp (figura 1.17).



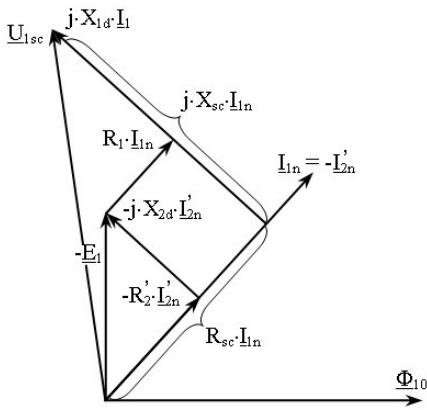


Figura 1.16

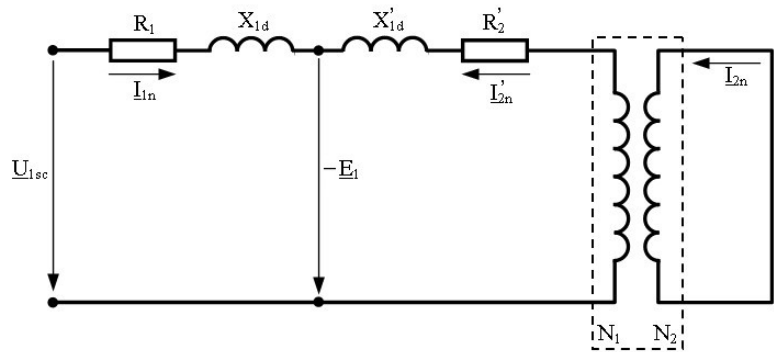


Figura 1.17

Diagrama fazoriala corespunzatoare acestui regim este reprezentata în figura 1.16. Aceasta diagrama se mai numeste diagrama Kapp.

Puterea electrica consumata de transformator de la retea în acest regim acopera pierderile transformatorului în acest regim. Dar, deoarece  $U_{1sc} \ll U_{1n}$ , pierderile în fier la scurtcircuit pot fi neglijate. Curentii prin înfasurari având însa valoarea lor nominala, rezulta ca pierderile active (Joule) în cuprul acestor înfasurari sunt chiar cele nominale. Deci:

$$\begin{aligned}
 P_{sc} &= P_{Cu_1} + P_{Cu_2} = R_1 \cdot I_{1n}^2 + R_2 \cdot I_{2n}^2 = I_{1n}^2 \cdot \left[ R_1 + R_2 \cdot \left( \frac{I_{2n}}{I_{1n}} \right)^2 \right] = \\
 &= I_{1n}^2 \cdot (R_1 + k_u^2 \cdot R_2) = I_{1n}^2 \cdot (R_1 + R_2') = R_{sc} \cdot I_{1n}^2.
 \end{aligned}
 \tag{1.27}$$

Regimul de scurtcircuit al transformatorului serveste la determinarea experimentală a doi parametrii importanti ai transformatorului: *tensiunea de scurtcircuit*  $U_{1sc}$  și pierderile Joule ale transformatorului în regim nominal  $P_{Cu} = P_{sc}$ .

Tensiunea de scurtcircuit se da uzual în procente fata de tensiunea nominala:

$$u_{1sc} = \left[ \frac{U_{1sc}}{U_{1n}} \right] \cdot 100[\%]$$

și în mod uzual are valoarea:  $u_{1sc} = (5 \div 12)\%$ .

### 1.2.7 Caracteristica externa a transformatorului

O importanta deosebita în functionarea transformatorului o are dependenta dintre tensiunea  $U_2$  la bornele secundarului și curentul  $I_2$  debitat de acesta pe o sarcina exterioara  $Z$ . Uzual, aceasta caracteristica se obtine experimental și poate avea una din formele reprezentate în figura 1.18, dependente de natura sarcinii.

Caracteristica se traseaza la:  $U_1 = \text{const.}; \cos \varphi_2 = \text{const.}$

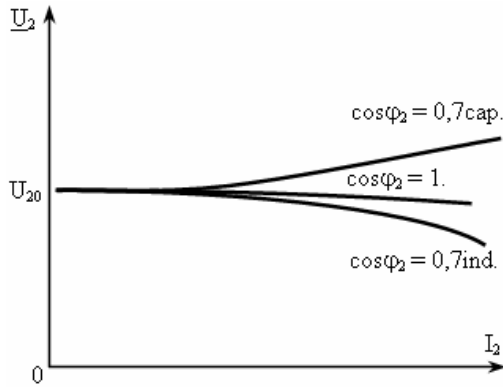


Figura 1.18

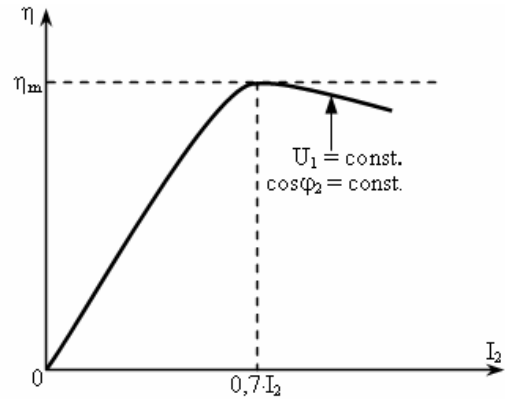


Figura 1.19

Dupa cum se remarca din figura, aceasta caracteristica este în general rigida. Rigiditatea se exprima prin caderea relativa de tensiune:

$$\Delta u_2 [\%] = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100. \quad (1.28)$$

De regula, la transformatoarele de putere aceasta cadere de tensiune reprezinta câteva procente din tensiunea nominala. Aceasta arata ca transformatorul de putere alimenteaza în secundar consumatori la tensiune relativ constanta fata de variatia curentului  $I_2$ .

### 1.2.8 Diagrama de puteri si randamentul transformatorului

Evolutia puterilor active si reactive într-un transformator electric poate fi reprezentata sugestiv printr-o diagrama care reprezinta bilantul puterilor:

$$P_1 = P_2 + p_{Cu_1} + p_{Cu_2} + p_{Fe_1} + p_{Fe_2} = P_2 + p_{Cu_1} + p_{Cu_2} + p_{Fe};$$

$$Q_1 = Q_2 + Q_{d_1} + Q_{d_2} + Q_m;$$

unde:

- $P_1, P_2$  - puterile active de la bornele primarului respectiv secundarului;
- $p_{Cu_1}, p_{Cu_2}$  - pierderile prin efect Joule în rezistentele înfasurarilor;
- $p_{Fe_1}, p_{Fe_2}$  - pierderile în fierul primarului si respectiv secundarului;
- $Q_1, Q_2$  - puterile reactive la bornele primarului respectiv secundarului;
- $Q_{d_1}, Q_{d_2}$  - puterile reactive ale câmpului magnetic de dispersie din cele doua înfasurari;
- $Q_m$  - puterea reactiva corespunzatoare câmpului magnetic principal.

În figura 1.20 se reprezintă diagrama de evoluție a acestor puteri.

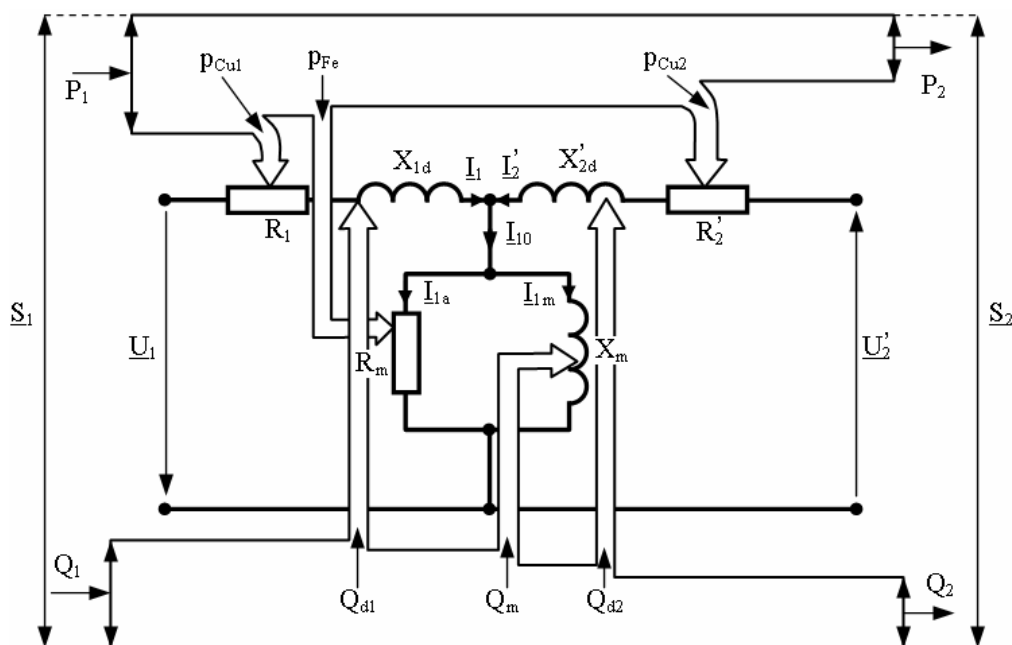


Figura 1.20

Expresiile puterilor din diagrama reprezentată în figura 1.20 sunt:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1; & P_2 &= U_2' \cdot I_2' \cdot \cos \varphi_2; \\
 p_{Cu_1} &= R_1 \cdot I_1^2; & p_{Cu_2} &= R_2' \cdot (I_2')^2; & p_{Fe} &= R_m \cdot I_{10}^2; \\
 Q_{1d} &= X_{1d} \cdot I_1^2; & Q_{2d} &= X_{2d}' \cdot (I_2')^2; & Q_m &= X_m \cdot I_{10}^2.
 \end{aligned}$$

Prin definiție randamentul unui transformator este:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \tag{1.29}$$

în care  $P_1$  și  $P_2$  sunt, respectiv, puterile active măsurate la bornele secundarului și primarului. Dar:

$$P_1 = P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}, \tag{1.30}$$

unde:

- $P_{Fe} = P_T + P_H$  sunt pierderile totale în fier și reprezintă suma dintre pierderile datorate curentilor turbionari  $P_T$  și pierderile datorate fenomenului de histerezis magnetic al miezului  $P_H$ ;
- $P_{Cu} = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2$  sunt pierderile prin efect Joule în cele două înfășurări.

Se poate rescrie astfel expresia randamentului:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}} = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + P_{Fe} + R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2}. \quad (1.31)$$

Dar cum raportul dintre cei doi curenti este constant, se poate înlocui curentul primar  $I_1$  cu expresia  $I_1 = k_1 \cdot I_2$ . Considerând tensiunea de alimentare  $U_1 = ct.$  deci si  $U_2 = \frac{U_1}{k_u} = ct.$ , rezulta ca si pierderile în fier care depind de amplitudinea tensiunii si de frecventa ei sunt constante  $P_{Fe} = ct.$

Se obtine astfel o expresie  $\eta = f(I_2)$  care la factor de putere al sarcinii dat ( $\cos \varphi_2 = ct.$ ) are ca singura variabila curentul  $I_2$ .

Valoarea maxima  $\eta_m$  a randamentului la factor de putere dat, al sarcinii conectata la secundar are loc pentru curentul  $I_2$  determinat de ecuatia:

$$\frac{d\eta}{dI_2} = 0. \quad (1.32)$$

Rezolvând ecuatia se gaseste:

$$P_{Fe} = P_{Cu}, \quad (1.33)$$

adica, *randamentul atinge valoarea maxima la acea încarcare ( $I_2$ ) pentru care pierderile în fier sunt egale cu pierderile în înfasurarile transformatorului.*

În mod uzual, caracteristica randamentului se traseaza grafic pe baza datelor obtinute prin încercari experimentale, si are forma celei reprezentate în figura 1.19.

Practica a aratat ca valoarea maxima a randamentului se obtine în jurul valorii curentului  $I_2 = 0,7 \cdot I_{2n}$ , valori pentru care se îndeplineste conditia (1.33).

În general, randamentul transformatorului este mai ridicat decât cel al masinilor rotative neintervenind pierderile mecanice. La transformatoarele de putere medie si mare ( $10 \div 1000kVA$ ), randamentul este de  $0,95 \div 0,97$ ; la transformatoarele de foarte mare putere randamentul poate depasi  $0,99$ , iar la transformatoare foarte mici randamentul scade chiar sub  $0,70$ .

### 1.3 Transformatorul trifazat

În principiu un transformator trifazat se poate obtine cu ajutorul a trei transformatoare monofazate identice, ale caror înfasurari primare sunt conectate în stea (Y), sau triunghi (D) si ale caror înfasurari secundare sunt conectate în stea (y), triunghi (d) sau zig-zag (z).

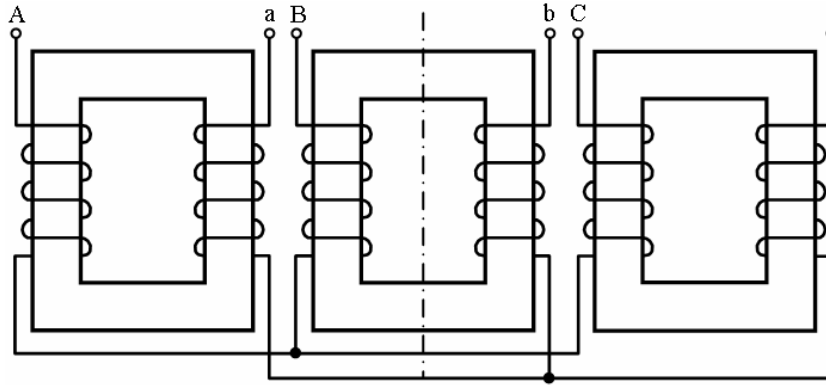


Figura 1.21

Obținerea transformatorului trifazat cu ajutorul a trei transformatoare monofazate nu este folosita în practica decât la unitatile de foarte mare putere, unde, din motive de gabarit nu se poate construi un miez de fier unic care sa poata fi transportat la locul de montaj. Constructia curenta a transformatoarelor trifazate se realizeaza cu ajutorul unui singur miez de fier cu trei coloane. La aceasta solutie constructiva s-a ajuns facând urmatorul rationament: daca cele trei transformatoare monofazate din figura 1.21 se aseaza cu miezurile de fier în planuri care fac între ele unghiuri de 120° (figura 1.22, a), atunci fluxul magnetic rezultat prin coloana centrala este nul:

$$\underline{\Phi}_0 = \underline{\Phi}_A + \underline{\Phi}_B + \underline{\Phi}_C = 0, \tag{1.34}$$

aceasta, deoarece cei trei fazori  $\underline{\Phi}_A, \underline{\Phi}_B, \underline{\Phi}_C$  au acelasi modul si fac între ei unghiuri de 120°.

Prin urmare se poate renunta la coloana centrala si se poate realiza constructia din figura 1.22, b.

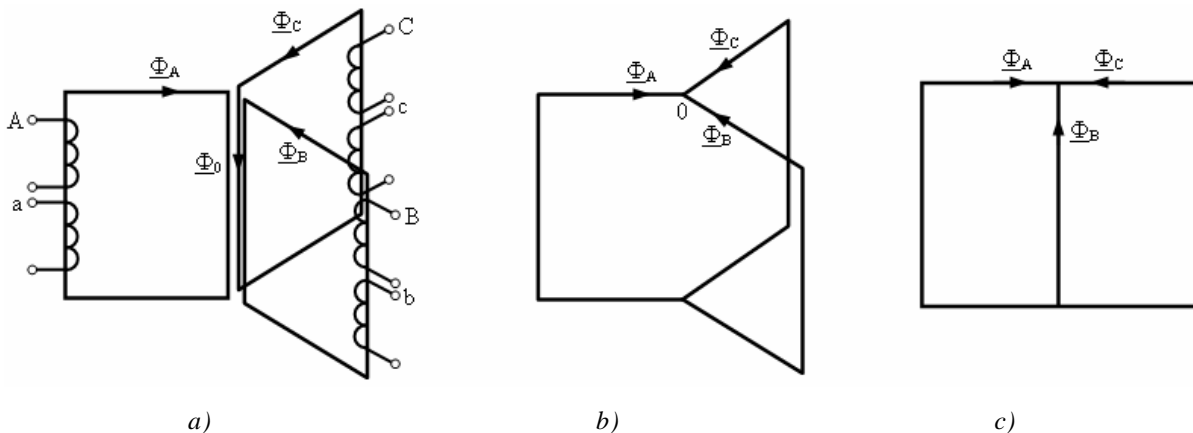


Figura 1.22

Realizarea practica a miezului de fier din figura 1.22, b este dificila, mai ales, din cauza îmbinării din punctul 0, si rezulta astfel un miez care ocupa un spatiu mare datorita amplasării celor trei coloane în planuri diferite. Tinând seama de aceste consideratii, în practica, se aseaza cele trei coloane în acelasi plan obtinându-se forma constructiva curenta (figura 1.22, c).

În acest mod se obtine o nesimetrie magnetica care conduce la o nesimetrie a fluxurilor si curentilor pe cele trei faze, nesimetrie care în majoritatea cazurilor nu este importanta.

Se poate, astfel, concluziona ca teoria transformatorului trifazat pe o faza este aceeași cu cea a transformatorului monofazat.

### 1.3.1 Grupe de conexiuni ale transformatorului trifazat

În cele ce urmeaza vom nota cu: A, B, C începuturile si cu X, Y, Z respectiv, sfârșiturile înfasurarilor de faza din primar; a, b, c începuturile si x, y, z sfârșiturile înfasurarilor de faza din secundar asa cum sunt notate în standarde. Înfasurarile trifazate primare sau secundare se pot conecta în trei moduri diferite dupa cum urmeaza:

- **conexiunea stea** (Y pentru primar si y pentru secundar) este reprezentata în figura 1.23, a. Amintim ca, în acest caz tensiunea de linie este de  $\sqrt{3}$  ori mai mare decât tensiunea de faza, iar curentii de linie sunt egali cu cei din înfasurarile de faza;
- **conexiunea triunghi** (D pentru primar si d pentru secundar) este reprezentata în figura 1.23, b. De data aceasta, tensiunea de linie este egala cu tensiunea pe faza, iar curentul de linie este de  $\sqrt{3}$  ori mai mare decât curentul de faza;
- **conexiunea zig-zag** (z pentru secundar) este reprezentata în figura 1.23, c. Înfasurarea are pe fiecare coloana doua bobine, fiecare cu  $\frac{N}{2}$  spire, înseriindu-se doua câte doua, dar niciodata de pe aceeasi coloana. În acest fel curentii circula în sensuri contrare prin cele doua jumătăți ale aceleasi înfasurari de faza. La conexiunea zig-zag relatiile dintre marimile de linie si cele de faza sunt identice cu cele de la conexiunea stea.

Tensiunea de faza la conexiunea zig-zag se micșoreaza fata de tensiunea de faza la conexiunea stea. Într-adevar examinând diagrama de fazori din figura 1.23, c se observa ca:

$$\underline{U}_{AZ} = \frac{\underline{U}_{AY}}{2} - \frac{\underline{U}_{CY}}{2} = \frac{2 \cdot \underline{U}_{AY}}{2} \cdot \cos 30^\circ = 0,86 \cdot \underline{U}_{AY}.$$

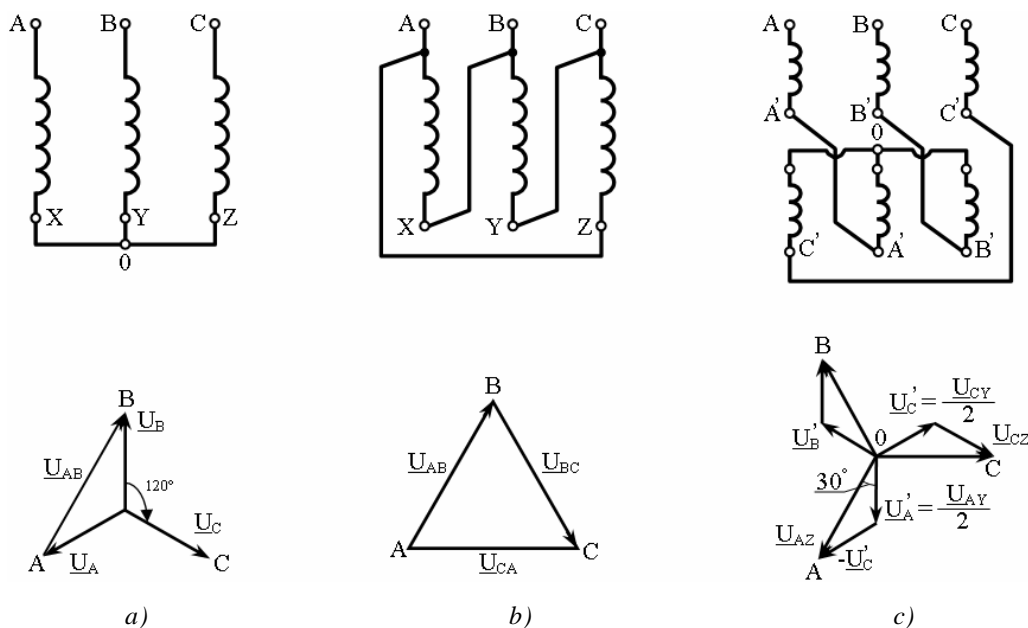


Figura 1.23

Pentru a obtine aceeasi tensiune, numarul de spire la conexiunea zig-zag trebuie majorat de  $\frac{1}{0,86} = 1,15$  ori, deci un consum de cupru cu 15% mai mare decât la conexiunea stea.

Schema de conexiuni zig-zag se utilizeaza pe partea de joasa tensiune a transformatoarelor de distributie pentru iluminat.

Tinând seama de cele trei moduri de conectare ale înfasurarilor de faza se obtin pentru transformatorul trifazat sase tipuri de conexiuni: Y - y; Y - d; Y - z; D - y; D - d; D - z.

Aceste tipuri de conexiuni se grupeaza în *grupe de conexiuni*, care indica defazajul dintre tensiunea de linie din primar  $U_{AB}$  si tensiunea analoaga  $U_{ab}$ , masurat în sens orar si exprimat în multipli de  $30^\circ$ .

Sa analizam spre exemplificare situatia din figura 1.24 în care ambele înfasurari sunt conectate în stea (Y - y). Presupunând ca înfasurarile au acelasi sens de înfasurare construim diagramele de tensiuni primare si secundare. Tensiunea  $U_a$  a fazei secundare a - x va fi în faza cu tensiunea  $U_A$  a fazei primare cu care interactioneaza ca si cum ar forma un transformator monofazat independent de celelalte faze. Considerând aceeasi succesiune a fazelor în primar si secundar se obtin astfel cele doua stele de tensiuni primare si secundare. Urmarind defazajul între doua tensiuni de linie analoage  $U_{AB}$  si  $U_{ab}$ , remarcam ca el este nul. Ne convingem de acest lucru deplasând prin translatie steaua tensiunilor secundare pâna când punctul a coincide cu punctul A (pentru aceasta s-a realizat legatura galvanica dintre cele doua borne). Prin urmare, transformatorul Y - y considerat apartine grupei 12. Un asemenea transformator se noteaza Yy - 12 sau Yy - 0. (defazajul  $12 \cdot 30^\circ = 360^\circ$  fiind echivalent cu defazajul nul  $0 \cdot 30^\circ = 0^\circ$ ).

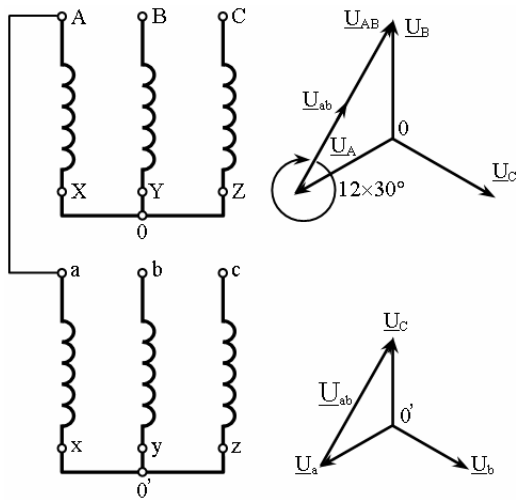


Figura 1.24

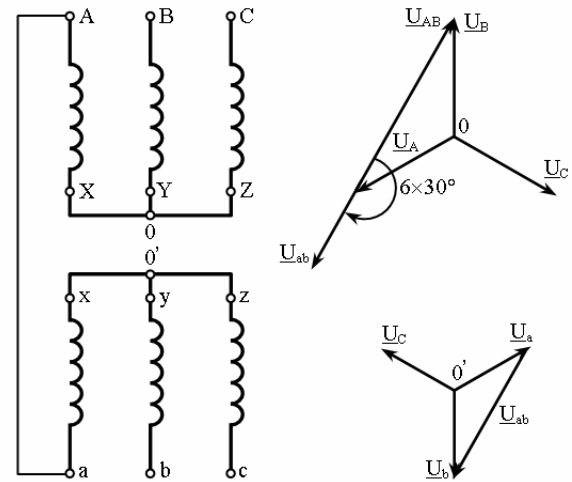


Figura 1.25

Dacă la transformatorul Yy - 12 se schimbă între ele începuturile cu sfârșiturile înfășurărilor de fază secundare, atunci se obține un transformator Yy - 6 (figura 1.25). Într-adevăr, tensiunile de fază din secundar vor avea sensuri inversate și defazajul dintre  $\underline{U}_{AB}$  și  $\underline{U}_{ab}$  va fi  $6 \cdot 30^\circ = 180^\circ$ .

Prin schimbarea între ele a începuturilor cu sfârșiturile înfășurării de fază secundare, se dublează numărul de conexiuni ajungând la 12. Aceste tipuri se grupează în patru grupe de conexiuni: grupa 0 sau 12, 5, 6 și 11. Cele mai uzuale tipuri de conexiuni sunt:

- Yy - 12 pentru transformatoare de distribuție;
- Dy - 5 pentru transformatoare coborâtoare pentru iluminat;
- Yd - 5 pentru transformatoare ridicatoare în centrale și stații;
- Yz - 5 pentru transformatoare coborâtoare de distribuție.

Înfășurările conectate în stea sau zig-zag care au nulul scos la placa de borne se notează  $Y_0(y_0)$  respectiv  $z_0$ .

Precizarea tipului de conexiune prezintă o importanță practică deosebită mai ales la funcționarea în paralel a transformatoarelor, posibilă doar când acestea aparțin aceleiași grupe de conexiuni.

### 1.3.2 Rapoarte de transformare și reglajul tensiunilor secundare

La transformatorul monofazat am definit raportul de transformare  $k_u = \frac{U_{10}}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$ .

La transformatorul trifazat deoarece avem tensiuni de fază și de linie acest raport se va exprima față de tensiunile de fază:



$$k_f = \frac{U_{f10}}{U_{f20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}.$$

În raport cu tensiunile de linie se poate defini un alt raport de transformare  $k_1 = \frac{U_1}{U_2}$ , unde

$U_1$  și  $U_2$  sunt tensiuni de linie. Între  $k_f$  și  $k_1$  se poate stabili o relație pentru fiecare tip de conexiune, astfel spre exemplu:

- o la conexiunea stea – stea (Y - y):

$$k_1 = \frac{U_1}{U_2} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{1f}}{\sqrt{3} \cdot U_{2f}} = \frac{U_{1f}}{U_{2f}} = \frac{N_1}{N_2} = k_f; \quad (1.35)$$

- o la conexiunea triunghi – stea (D - y):

$$k_1 = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_{1f}}{\sqrt{3} \cdot U_{2f}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot k_f; \quad (1.36)$$

- o la conexiunea stea – zig-zag (Y - z):

$$k_1 = \frac{U_1}{U_2} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{1f}}{\sqrt{3} \cdot U_{2f}} = \frac{U_{1f}}{\sqrt{3} \cdot U_{bob}} = \frac{N_1}{\sqrt{3} \cdot \left(\frac{N_2}{2}\right)} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot k_f; \quad (1.37)$$

deoarece pentru  $U_{bob}$  corespunde  $\frac{N_2}{2}$  spire.

Relatiile 1.35, 1.36 și 1.37 ne arata ca se poate verifica raportul de transformare al transformatorului  $\left(k_f = \frac{N_1}{N_2}\right)$  daca se masoara tensiunile de linie, deci, se afla  $k_1$ .

Pentru mentinerea tensiunii nominale la receptoare transformatoarele de distributie sunt prevazute cu prize de reglaj în trepte de  $\pm 5\%$  din numarul de spire (figura 1.26). Daca  $U_1 = U_{1n}$  și  $U_2 < U_{2n}$ , atunci  $k_1 > k_f$ ; în acest caz se trece de pe priza nominala 0% pe priza 5% și invers daca  $U_2 > U_{2n}$ .

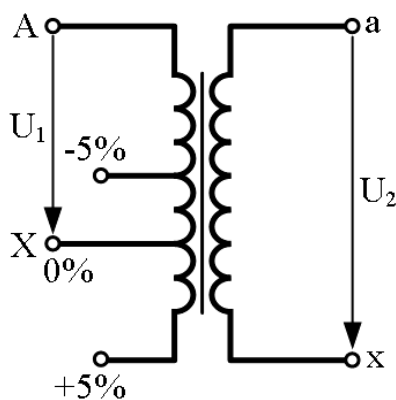


Figura 1.26

## 1.4 Functionarea în paralel a transformatoarelor

În stațiile și posturile de transformare, în scopul de a crea o rezerva de putere și, de asemenea, de a ține seama de dezvoltările ulterioare, se află de obicei mai multe transformatoare care pot fi cuplate în paralel pe aceeași rețea primară și secundară (figura 1.27).

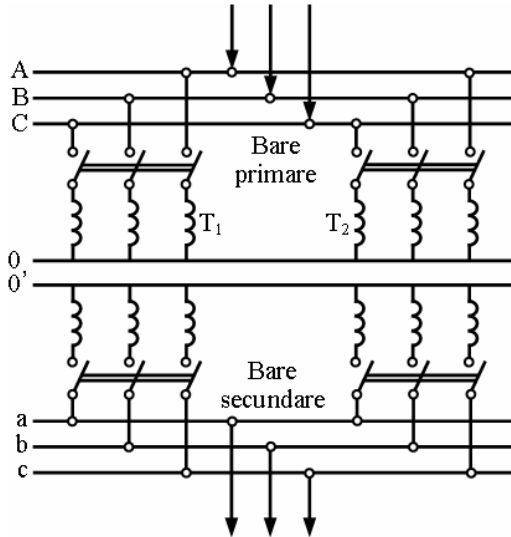


Figura 1.27

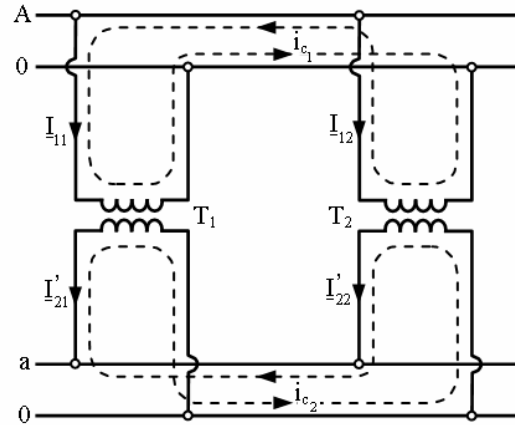


Figura 1.28

Două sau mai multe transformatoare pot funcționa în paralel dacă sunt îndeplinite următoarele condiții:

- transformatoarele să aibă același raport de transformare;
- transformatoarele să aparțină aceleiași grupe de conexiuni;
- tensiunile nominale de scurtcircuit să fie egale;
- raportul puterilor nominale să fie maximum  $\frac{1}{3} \div \frac{1}{4}$ ;

Nerespectarea oricărei din aceste condiții va conduce la apariția unui curent de circulație între cele două transformatoare care va încărca suplimentar unul dintre ele. În figura 1.28 s-a reprezentat câte o singură fază a două transformatoare funcționând în paralel în situația apariției curentului de circulație. Se observă că acest curent nu circula prin sarcină și încărca suplimentar înfășurarea primară a unuia dintre transformatoare.

Cu notațiile din figura 1.28 și luând în considerare schema simplificată 1.17 se poate scrie:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{Z}_{1sc} \cdot \underline{I}_{21} + \underline{U}_{21}; \\ \underline{U}_1 &= \underline{Z}_{2sc} \cdot \underline{I}_{22} + \underline{U}_{22}; \\ \underline{I}_2 &= \underline{I}_{21} + \underline{I}_{22}; \end{aligned} \quad (1.38)$$

unde:

–  $\underline{U}_1$  - tensiunea de linie comuna din primarul celor doua transformatoare;

–  $\underline{I}'_{21}, \underline{I}'_{22}$  - curentii din înfasurarile secundare raportate la primar;

–  $\underline{Z}'_{1sc}, \underline{Z}'_{2sc}$  - impedantele de scurtcircuit;

$$\underline{Z}'_{1sc} = R_{1sc} + j \cdot X_{1sc}; \quad \underline{Z}'_{2sc} = R_{2sc} + j \cdot X_{2sc};$$

$$X_{1sc} = X_{11d} + X'_{21d}; \quad X_{2sc} = X_{22d} + X'_{21d};$$

$$R_{1sc} = R_{11} + R'_{21}; \quad R_{2sc} = R_{12} + R'_{21};$$

–  $\underline{U}'_{21}, \underline{U}'_{22}$  - tensiunile de faza din înfasurarile secundare.

Daca se scad primele relatii din (1.38) si apoi se înlocuiesc pe rând  $\underline{I}'_{21}$  si  $\underline{I}'_{22}$  din a treia relatie în diferenta obtinuta, avem:

$$\begin{aligned} \underline{I}'_{21} &= \frac{\underline{Z}'_{2sc}}{\underline{Z}'_{1sc} + \underline{Z}'_{2sc}} \cdot \underline{I}'_2 - \frac{\underline{U}'_{21} - \underline{U}'_{22}}{\underline{Z}'_{1sc} + \underline{Z}'_{2sc}}; \\ \underline{I}'_{22} &= \frac{\underline{Z}'_{1sc}}{\underline{Z}'_{1sc} + \underline{Z}'_{2sc}} \cdot \underline{I}'_2 + \frac{\underline{U}'_{21} - \underline{U}'_{22}}{\underline{Z}'_{1sc} + \underline{Z}'_{2sc}}. \end{aligned} \quad (1.39)$$

În expresia celor doi curenti din 1.39 apare componenta:

$$\underline{I}'_c = \frac{\underline{U}'_{21} - \underline{U}'_{22}}{\underline{Z}'_{1sc} + \underline{Z}'_{2sc}}; \quad (1.40)$$

care este *curentul de circulatie* din înfasurarile secundare. Acest curent se scade din  $\underline{I}'_{21}$  si se aduna la  $\underline{I}'_{22}$ , deci descarca un transformator si îl încarca pe celalalt limitând posibilitatea de încarcare a ansamblului. Pentru a avea  $\underline{I}'_c = 0$  trebuie ca  $\underline{U}'_{21}$  si  $\underline{U}'_{22}$  sa aiba acelasi modul si sa fie în faza.

Din egalitatea modulelor  $\underline{U}'_{21} = \underline{U}'_{22} = k_{11} \cdot U_1 = k_{12} \cdot U_2$  rezulta necesitatea ca rapoartele de transformare sa fie egale  $k_{11} = k_{12}$ .

Din conditia ca cele doua tensiuni sa fie în faza rezulta necesitatea ca cele doua transformatoare sa aiba aceeasi grupa de conexiuni, adica aceleasi defazaje fata de tensiunea de linie primara  $U_1$ .

Deoarece din cauza tolerantelor de executie, apar abateri de la valorile de calcul ale raportului de transformare si ale tensiunii de scurtcircuit, conform STAS 1703-65 se admit abateri pentru rapoartele de transformare în limitele  $\pm 0,5\%$  la diferente ale tensiunii de scurtcircuit de  $\pm 10\%$ .

## 1.5 Autotransformatorul

Autotransformatorul, numit și transformator în construcție economică are utilizări multiple acolo unde se cere modificarea tensiunii în limite mai înguste ( $\pm 10 \div \pm 50\%$ ), când este preferat transformatorului din punct de vedere economic.

Înfășurările autotransformatorului atât cea primară cât și cea secundară, sunt plasate pe aceeași coloană a miezului feromagnetic și au o porțiune comună fiind conectate galvanic între ele (figura 1.29). Astfel, energia electrică se transmite de la primar la secundar atât pe cale electromagnetică (prin inducție), cât și pe cale electrică (prin contactul galvanic).

Autotransformatorul poate fi ridicător, când se alimentează pe la bornele A – X, sau, poate fi coborâtor de tensiune, când se alimentează pe la bornele a – x (figura 1.29).

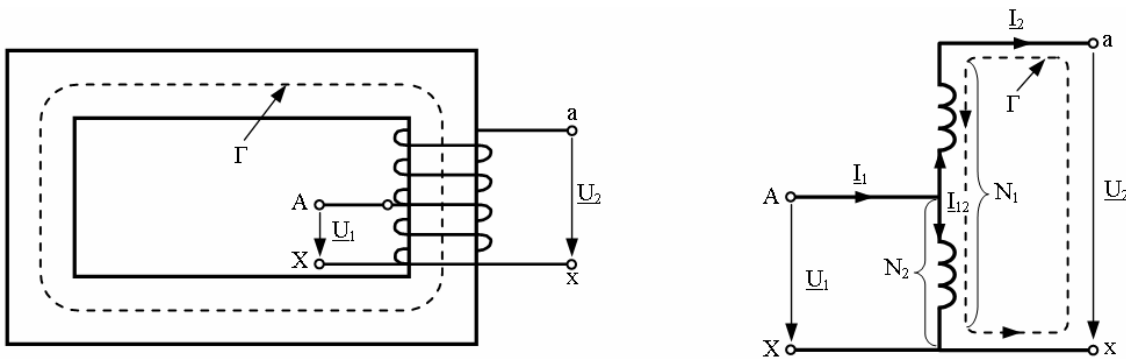


Figura 1.29

Legea circuitului magnetic aplicată conturului G conduce la relația:

$$N_1 \cdot \underline{I}_{12} - (N_2 - N_1) \cdot \underline{I}_2 = N_1 \cdot \underline{I}_{10}, \quad (1.41)$$

dar:

$$\underline{I}_{12} = \underline{I}_1 - \underline{I}_2. \quad (1.42)$$

Neglijând curentul de magnetizare ( $\underline{I}_{10} = 0$ ), și ținând cont de relația (1.42) obține o relație similară cu cea obținută la transformatoare:

$$N_1 \cdot \underline{I}_1 - N_2 \cdot \underline{I}_2 = 0 \Leftrightarrow \frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_2} = \frac{N_2}{N_1}. \quad (1.43)$$

Puterea aparentă transferată de la primar la secundar neglijând pierderile este:

$$S = U_1 \cdot \underline{I}_1 = U_2 \cdot \underline{I}_2 = S_e + S_c; \quad (1.44)$$

unde:

–  $S_e$  – reprezintă puterea electromagnetică transferată având expresia:

$$S_e = U_1 \cdot \underline{I}_{12} = U_1 \cdot (\underline{I}_1 - \underline{I}_2), \quad (1.45)$$

și se mai numește puterea interioară sau de calcul a autotransformatorului;

–  $S_c$  – puterea transmisă pe cale conductivă  $S_c$ :

$$S_c = S - S_e = U_1 \cdot I_2, \quad (1.46)$$

nu afectează calculul și dimensiunile autotransformatorului, ceea ce constituie, în esență, avantajul acestuia față de transformator.

Calculând raportul dintre puterea de calcul și puterea transferată se obține:

$$\frac{S_e}{S} = \frac{U_1 \cdot I_2}{U_1 \cdot I_1} = 1 - \frac{I_2}{I_1} = 1 - \frac{U_1}{U_2}. \quad (1.47)$$

Relația (1.47) ne arată că utilizarea autotransformatorului este cu atât mai convenabilă (consum redus de materiale active - cupru și oțel electrotehnic) cu cât raportul  $\frac{U_1}{U_2}$  este mai apropiat de unitate, adică cu cât tensiunea rețelei de alimentare este schimbată mai puțin. De exemplu pentru  $\frac{U_1}{U_2} = 0,8$ , puterea de calcul a unui autotransformator este 20% din puterea unui transformator obișnuit pentru aceeași putere totală transmisă.

În plus, micșorarea greutateii materialelor active conduce, desigur, și la micșorarea pierderilor electrice și magnetice. De aceea, la aceeași putere totală transmisă, randamentul autotransformatorului este superior totdeauna randamentului transformatorului obișnuit.

Un alt avantaj al autotransformatorului este că la aceeași încărcare și același factor de putere al sarcinii, variația tensiunii secundare este mai mică decât la transformatorul obișnuit.

Printre dezavantaje se numără:

- curentul de scurtcircuit mult mai mare decât al transformatorului echivalent;
- necesitatea realizării unei izolații a înfășurării de joasă tensiune față de masa dimensionată la tensiunea înaltă (fiind legată galvanic cu înfășurarea de înaltă tensiune).

Un domeniu larg de aplicații pentru autotransformatoare este acela al reglării tensiunii. Aceasta se realizează prin variația numărului de spire secundare fie cu ajutorul unor comutatoare speciale, fie cu ajutorul unui contact mobil care calcă direct pe înfășurarea secundară dezizolată în lungul unei fâșii exterioare.

Aceste regulatoare se utilizează la puteri:  $S < 5 \text{ kVA}$ .

## 1.6 Transformatorul cu trei înfășurări

La aceste transformatoare se obțin două tensiuni distincte în secundar, ca urmare acesta se compune din două înfășurări care pot alimenta două rețele distincte ca valoare a tensiunii (exemplu: două linii de înaltă tensiune alimentate de la un singur generator conectat în primar).

Transformatoarele cu trei înfășurări se utilizează și la puteri mici.

În figura 1.30 se reprezintă schematic un transformator cu trei înfășurări. Teorema circuitului magnetic scrisă pe un contur, ce reprezintă o linie de câmp, ne da:

$$N_1 \cdot \underline{I}_1 - N_2 \cdot \underline{I}_2 - N_3 \cdot \underline{I}_3 = N_1 \cdot \underline{I}_{10};$$

sau:

$$\underline{I}_1 - \frac{N_2}{N_1} \cdot \underline{I}_2 - \frac{N_3}{N_1} \cdot \underline{I}_3 = \underline{I}_{10};$$

și:

$$\underline{I}_1 - \underline{I}_2 - \underline{I}_3 = \underline{I}_{10} = \underline{I}_{10a} + \underline{I}_{10m}. \quad (1.48)$$

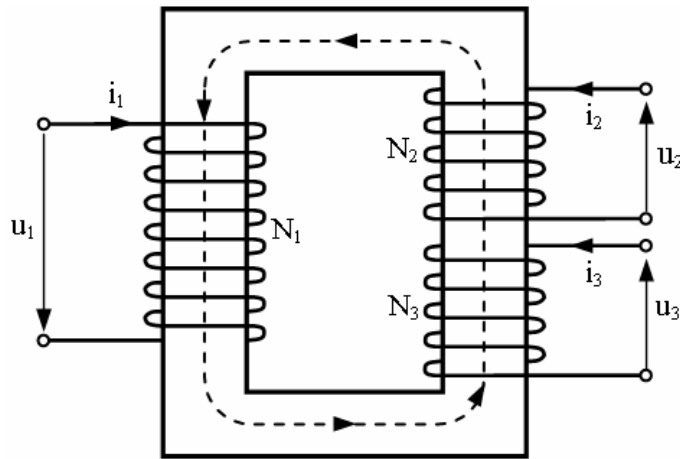


Figura 1.30

Ecuatiile de tensiuni pe cele trei circuite ne dau:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= R_1 \cdot \underline{I}_1 + j \cdot X_{1d} \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1; \\ -\underline{U}_2 &= R_2 \cdot \underline{I}_2 + j \cdot X_{2d} \cdot \underline{I}_2 + \underline{E}_1; \\ -\underline{U}_3 &= R_3 \cdot \underline{I}_3 + j \cdot X_{3d} \cdot \underline{I}_3 + \underline{E}_1. \end{aligned} \quad (1.49)$$

Ecuatiile 1.48 și 1.49 ne permit să trasăm schema echivalentă din figura 1.31.

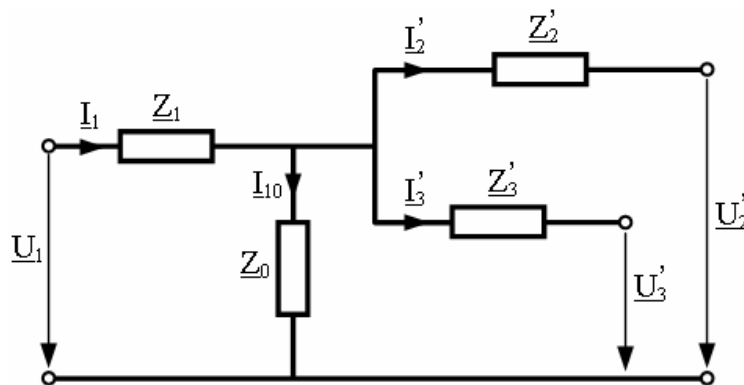


Figura 1.31

În schema echivalentă din figura 1.31 s-a notat:

$$\underline{Z}_1 = R_1 + j \cdot X_{1d}; \quad \underline{Z}_2' = R_2' + j \cdot X_{2d}'; \quad \underline{Z}_3' = R_3' + j \cdot X_{3d}'; \quad \underline{Z}_0 = \frac{R_m \cdot j \cdot X_m}{R_m + j \cdot X_m} \dots$$

Schema echivalenta ne arata ca tensiunile din înfasurarile secundare sunt dependente prin caderea de tensiune din primar.

Puterea nominala a transformatorului cu trei înfasurari se considera a înfasurarii care asigura transferul maxim de putere. Daca puterea din prima înfasurare se considera maxima  $S_1$  (se alege ca unitate (100%)), celelalte înfasurari pot avea puterile:

$S_1$ %	100	100	100	100
$S_2$ %	67	67	67	100
$S_3$ %	33	67	100	100

Schemele de conexiuni la transformatoarele trifazate cu trei înfasurari utilizate sunt:

$Y_0 - Y_0 - d - 12 - 1$ ;  $Y_0 - d - d - 11 - 12$ .

### 1.7 Transformatoare pentru transformarea numarului de faze

Exista situatii, în practica, când alimentarea receptoarelor necesita un numar de faze diferit ca cel al rețelei de alimentare.

Des întâlnite sunt transformatoarele pentru modificarea numarului de faze de la  $m = 3$  la  $m = 6$  sau  $m = 12$  utilizate la instalatiile de alimentare a puntilor redresoare pentru ameliorarea nesimetriilor introduse de redresoare ca si reducerea armonicilor de ordin superior. În figura 1.32 se reprezinta schema de transformare a unui sistem trifazat în unul hexafazat unde se transforma sistemul trifazat în stea în sistemul hexafazat în stea dubla.

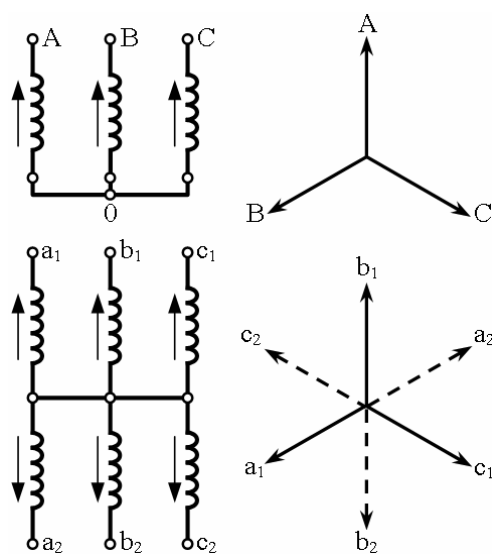


Figura 1.32

## 1.8 Transformatoare de masura

Transformatoarele de masura sunt destinate alimentarii unor aparate de masura (ampermetre, voltmetre, wattmetre), în scopul adaptarii lor la marimile de masurat (tensiuni înalte, curenti intensi, puteri mari). Ele se construiesc la puteri mici si pot fi de curent sau de tensiune.

*Transformatoarele de curent*, se folosesc pentru extinderea domeniului de masura al ampermetrelor, wattmetrelor, contoarelor de energie electrica, etc. Ele sunt formate dintr-un miez feromagnetic pe care sunt dispuse doua înfasurari: una cu spire putine de sectiune mare conectata în serie cu circuitul al carui curent se masoara (uneori chiar conductorul circuitului joaca rolul acestei înfasurari), reprezentând înfasurarea primara, cealalta cu spire multe, de sectiune mica conectata în serie cu aparatul de masura, reprezentând înfasurarea secundara.

Deoarece impedanta aparatelor conectate în secundar este, în general, foarte mica (impedanta ampermetrelor este de ordinul miliohmilor), transformatorul de curent functioneaza într-un regim apropiat de cel de scurtcircuit. Din acest motiv functionarea în gol ar induce în secundar o t.e.m. foarte mare care ar putea distruge izolatia înfasurarii secundare.

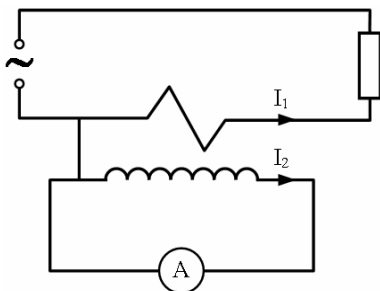


Figura 1.33

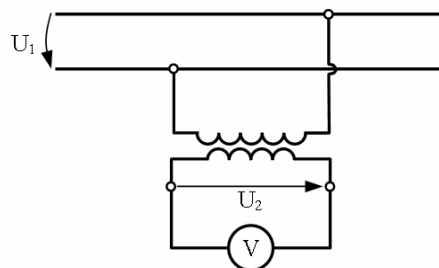


Figura 1.34

Transformatorul de curent este caracterizat de un raport nominal de transformare:

$$k_{in} = \frac{I_{1n}}{I_{2n}}. \quad (1.50)$$

Masurând curentul din secundar  $I_2$ , se poate determina o valoare  $I_1'$  a curentului din circuitul primar:

$$I_1' = k_{in} \cdot I_2, \quad (1.51)$$

care, în general, difera de valoarea curentului real  $I_1$ .

Eroarea de masura a valorii curentului  $I_1$  introdusa de transformatorul de curent este:



$$\varepsilon_i[\%] = \frac{I_1' - I_1}{I_1} \cdot 100 = \frac{k_{in} - k_i}{k_i} \cdot 100, \quad (1.52)$$

unde s-a notat cu  $k_i = \frac{I_1}{I_2}$  raportul real de transformare.

În afara acestei erori privind coeficientul de transformare, transformatorul de curent introduce și o eroare de unghi  $\delta$ , reprezentând defazajul dintre fazorul  $I_1$  și fazorul  $I_1'$ . Aceasta eroare influențează precizia măsurătorii unor aparate ca: wattmetre, contoare, unele traductoare etc.

Deoarece eroarea de mărime  $\varepsilon_i$  crește odată cu creșterea impedanței sarcinii, pentru fiecare transformator de curent se indică o anumită putere aparentă nominală, reprezentând puterea maximă de sarcină pentru care transformatorul respectă clasa de precizie pentru care a fost construit: 0,2; 0,5; 1; 3; 5; 10; cifrele reprezentând eroarea de măsură.

Dintre tipurile constructive se deosebesc: transformatorul de curent cu miez toroidal, cu ajutorul căruia se pot efectua măsurători foarte precise și transformatoare de curent de tip clește la care conductorul al cărui curent urmează a fi măsurat joacă rolul înfășurării primare.

Transformatoarele de curent măsoară curenți de  $(5 \div 15000)A$ , curentul nominal standardizat fiind 5A.

*Transformatoarele de tensiune* se folosesc pentru lărgirea domeniului de măsură al: voltmetrelor, wattmetrelor, contoarelor.

Din punct de vedere constructiv el este similar unui transformator monofazat de mică putere, în secundarul căruia se conectează aparatul de măsură cu o impedanță foarte mare. Ca urmare, curentul secundar fiind foarte redus, se poate aprecia că transformatorul de tensiune lucrează în regim de gol.

Transformatorul de tensiune este caracterizat de un raport nominal de transformare:

$$k_{un} = \frac{U_{1n}}{U_{2n}}. \quad (1.53)$$

Pentru o anumită valoare a tensiunii măsurate în secundar  $U_2$  se obține o valoare a tensiunii primare:  $U_1' = k_{un} \cdot U_2$  care diferă de valoarea reală  $U_1$  prin eroarea de măsură a transformatorului:

$$\varepsilon_u[\%] = \frac{U_1' - U_1}{U_1} \cdot 100 = \frac{k_{un} - k_u}{k_u} \cdot 100, \quad (1.54)$$

unde s-a notat cu  $k_u = \frac{U_1}{U_2}$  raportul real de transformare.

Pentru micșorarea erorilor se urmărește micșorarea pierderilor din înfasurări prin utilizarea unor densități de curent reduse, și micșorarea dispersiilor prin așezarea relativă a înfasurarilor precum și utilizarea de tole de calitate superioară în vederea reducerii curentului de magnetizare și a pierderilor în fier.

Pe placuta transformatorului se înscrie puterea nominală a acestuia, reprezentând puterea aparentă maximă la care poate fi încărcat transformatorul de tensiune fără ca erorile sale să depășească limitele claselor de precizie. Acestea pot fi: 0,2; 0,5; 1; 3; cifrele referindu-se la eroarea de măsură.

Tensiunea secundară nominală a acestor transformatoare este standardizată la 100V.

## 1.9 Transformatoare de sudură

Transformatoarele de sudură sunt destinate alimentării instalațiilor de sudură prin arc electric și prin contact. Atât la amorsarea arcului electric cât și la stabilirea contactului metalelor ce se sudează rezultă o importantă cadere de tensiune față de regimul de mers în gol al transformatorului.

Dacă s-ar utiliza transformatoare de construcție obișnuită, curentul secundar corespunzător unei tensiuni în sarcină atât de redusă față de tensiunea de gol, ar rezulta nepermis de mare datorită rigidității mari a caracteristicii externe (figura 1.35). Pentru limitarea curentului la valori acceptabile se impune realizarea unui transformator cu caracteristică externă moale (figura 1.36).

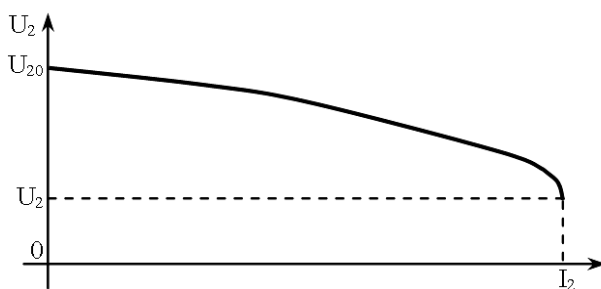


Figura 1.35

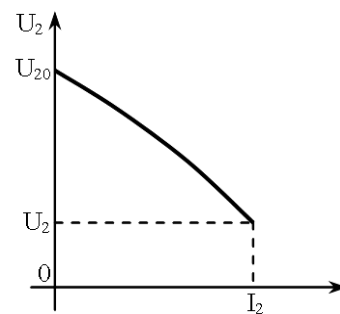


Figura 1.36

Obținerea unei caracteristici externe moi (înclinate), se realizează prin mărirea caderii de tensiune:  $\Delta \underline{U}_2 = \underline{I}_2 \cdot (\underline{R}_2 + j \cdot \underline{X}_{2d})$ . În practică se acționează asupra componentei reactive mărin­d inductivitatea de dispersie  $X_{2d}$  prin următoarele procedee:

- așezarea primarului și secundarului pe coloane diferite;
- sectionarea primarului și a secundarului (figura 1.37);

- utilizarea suntului magnetic (figura 1.37);
- montarea în serie cu secundarul a unei bobine cu reluctanta variabila (figura 1.38);
- utilizarea prizelor reglabile (figura 1.38).

Modificarea pozitiei suntului magnetic (figura 1.37) se face cu ajutorul unui surub actionat de o roata aflata pe carcasa transformatorului. Se regleaza astfel aria comuna cu coloana, de închidere a fluxului magnetic de dispersie prin sunt.

Modificarea pozitiei tronsonului miezului de fier (figura 1.38) în sensul modificarii întrefierului  $\delta$  are ca efect variatia reactantei bobinei auxiliare înseriate în secundarul transformatorului ducând la modificarea curentului  $I_2$  dupa preferinta.

În functie de pozitia suntului magnetic sau de valoarea întrefierului  $\delta$  se poate obtine o familie de caracteristici externe, ca în figura 1.39.

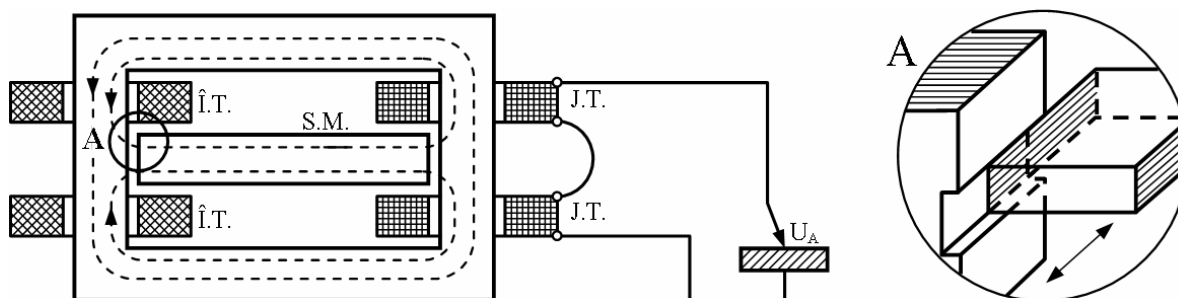


Figura 1.37

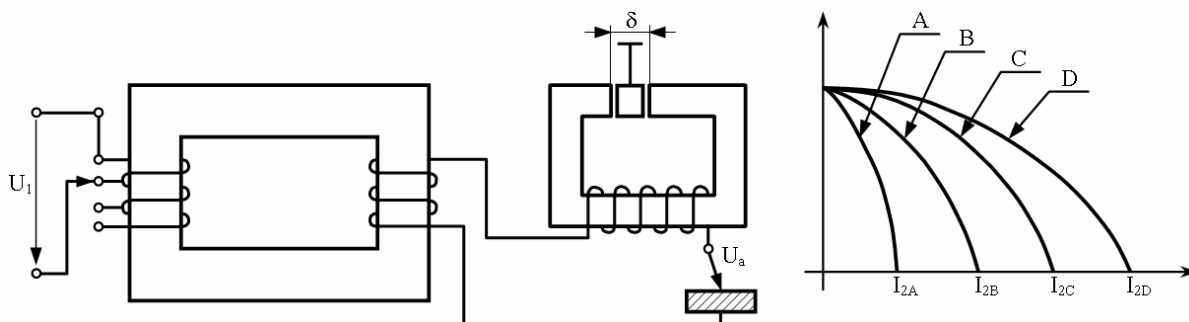


Figura 1.38

Figura 1.39

Transformatoarele de sudura reprezentând sarcini monofazate introduc nesimetrii în rețeaua trifazată. Pentru simetrizarea rețelei trifazate se folosesc transformatoare trifazate de sudura cu mai multe posturi.

## 1.10 Regimurile dinamice ale transformatorului electric

În afara de regimul permanent care este caracteristic transformatorului electric, acesta poate funcționa și în regimuri dinamice caracterizate prin trecerea de la un anumit regim permanent la alt regim permanent așa cum ar fi conectarea transformatorului la rețea în gol sau în sarcină sau când se conectează în scurtcircuit.

Aceste regimuri dinamice sunt însoțite de variații de energie și deci de variația unor mărimi electrice și magnetice care pot avea repercusiuni asupra rețelei și a transformatorului. De asemenea, aceste regimuri dinamice produc pierderi suplimentare.

### Conectarea în gol a transformatorului

Să presupunem că înfășurării primare  $i$  se aplică tensiunea  $u_{10} = U_{1m} \cdot \sin(\omega \cdot t + \gamma)$ , secundarul fiind deschis (figura 1.40).

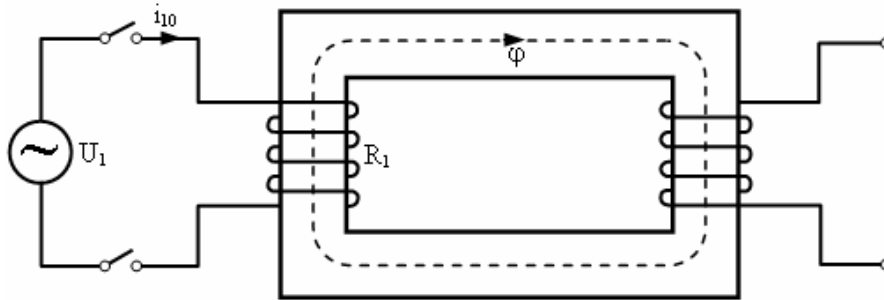


Figura 1.40

Ecuația de tensiune a primarului este:

$$u_{10} = R_1 \cdot i_{10} + N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt},$$

de aici

$$\phi = \frac{1}{N} \cdot \int_0^t (u_{10} - R_1 \cdot i_{10}) dt \Rightarrow \phi = -\frac{U_{1m}}{\omega \cdot N_1} \cdot \cos(\omega \cdot t + \gamma) + C.$$

Pentru  $R_1 \cdot i_{10} \approx 0$ , la  $t = 0 \rightarrow \phi = \Phi_r$  (fluxul remanent), deci:

$$C = \Phi_r + \frac{U_{1m}}{\omega \cdot N_1} \cdot \cos \gamma.$$

Notând  $-\frac{U_{1m}}{\omega \cdot N_1} = \Phi_{pm} \Rightarrow \phi = -\Phi_{pm} \cdot \cos(\omega \cdot t + \gamma) + \Phi_{pm} \cdot \cos \gamma + \Phi_r$ , obținem fluxul:

$$\phi \equiv \Phi_m \text{ la } \gamma = 0, \omega \cdot t + \gamma = \pi, \phi_{\max} = 2 \cdot \Phi_{pm} + \Phi_r,$$

unde:  $\Phi_m$  este fluxul maxim în regim permanent. Tinând cont de acest flux maxim care poate apare în regim de conectare în gol și care induce tensiuni mai mari se dimensionează transformatorul în așa fel încât pe caracteristica de magnetizare  $\Phi_m$  să nu depășească punctul de saturatie figura 1.41.

Din experienta construcției transformatoarelor electrice:

$$i_{10m} = 150 \cdot I_{10}, \quad I_{10} = (0,03 \div 0,05) I_{1n}.$$

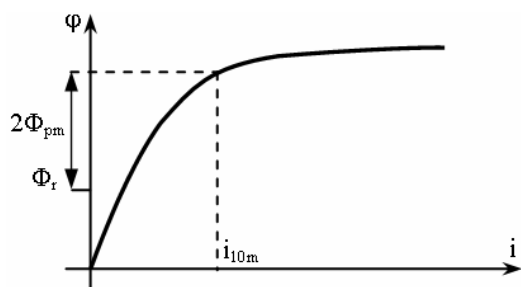


Figura 1.41

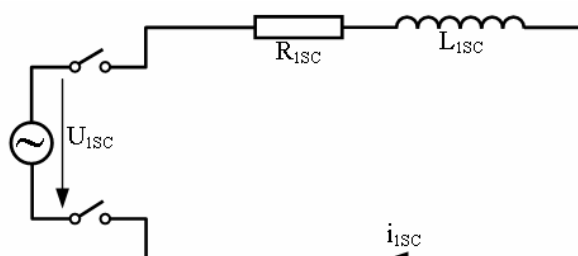


Figura 1.42

### Conectarea în scurtcircuit a transformatorului

La scurtcircuitarea secundarului transformatorului se poate înlocui transformatorul cu schema echivalentă din figura 1.42 care are ecuația de tensiuni:

$$u_{1sc} = R_{1sc} \cdot i_{1sc} + L_{1sc} \cdot \frac{di_{1sc}}{dt};$$

care are soluția:

$$i_{1sc} = \frac{U_{1m} \cdot \sin(\omega \cdot t + \gamma - \varphi)}{\sqrt{R_{1sc}^2 + (\omega \cdot L_{1sc})^2}} + C \cdot e^{-\frac{t}{T_{sc}}};$$

în care:

$$\varphi = \arctg \frac{X_{1sc}}{R_{1sc}}.$$

Pentru  $t = 0 \rightarrow i_{1sc} = 0$  deci:  $C = -\frac{U_{1m}}{Z_{1sc}} \cdot \sin(\gamma - \varphi) \cdot e^{\frac{t}{T_{sc}}}$ ; unde  $T_{sc} = \frac{L_{1sc}}{R_{1sc}}$ ,

$T_{sc}$  reprezintă constanta de timp a transformatorului la scurtcircuit. Valoarea maximă a curentului de scurtcircuit se obține la valoarea:

$$\gamma - \varphi = \frac{\pi}{2} \text{ și } \omega \cdot t + \gamma - \varphi = \frac{\pi}{2} \text{ de aici } \omega \cdot t = \pi \text{ și } t = \frac{\pi}{\omega};$$

$$i_{1scm} = \frac{U_{1m}}{Z_{1sc}} - \frac{U_{1m}}{Z_{1sc}} \cdot e^{-\frac{\pi}{\omega \cdot T_{sc}}} = \frac{U_{1m}}{Z_{1sc}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\pi}{\omega \cdot T_{sc}}}\right) = K \cdot \frac{U_{1m}}{Z_{1sc}}.$$

Deci, la conectarea în scurtcircuit apare un soc de curent care depinde de impedanța de scurtcircuit, tensiunea de scurtcircuit ca și de momentul în care apare.

## 1.11. APLICATII

### A.1

a) Un transformator monofazat se afla sub tensiunea  $u_1 = U_1 \cdot \sqrt{2} \sin(\omega \cdot t - \alpha)$  si cu înfasurarea secundara functionând în gol, când la momentul  $t = 0$  se produce un scurtcircuit la bornele secundare. Cum variaza în timp curentul  $i_1$  absorbit de la retea? Se vor neglija curentul de magnetizare si pierderile în fier.

b) Pentru ce valoare a fazei initiale  $\alpha$  a tensiunii primare se înregistreaza cel mai mare vârf de curent?

### Rezolvare:

a) Fiind vorba de un regim tranzitoriu, ecuatiile functionale în marimi instantanee valabile în acest caz sunt urmatoarele:

$$\begin{aligned} u_1 &= R_1 \cdot i_1 + L_{1d} \cdot \frac{di_1}{dt} + N_1 \cdot \frac{d\Phi_{10}}{dt}; \\ 0 &= R_2 \cdot i_2 + L_{2d} \cdot \frac{di_2}{dt} + N_2 \cdot \frac{d\Phi_{10}}{dt}; \\ N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_2 &= 0. \end{aligned}$$

în care  $N_1 \cdot \frac{d\Phi_{10}}{dt}$ , respectiv  $N_2 \cdot \frac{d\Phi_{10}}{dt}$  reprezinta t.e.m. induse în cele doua înfasurari de catre fluxul rezultat, iar în ultima ecuatie s-a considerat neglijabil curentul de magnetizare si curentul corespunzator pierderilor în fier [a se vedea sistemul (1.23) de ecuatii, transpus însa pentru marimi instantanee si fara raportarea marimilor secundare la primar].

Înmultiind ecuatia a doua cu raportul  $\frac{N_1}{N_2}$ , tinând seama de ecuatia a treia si scazând ecuatia

a doua din prima se obtine:

$$u_1 = \left[ R_1 + R_2' \right] \cdot i_1 + \left[ L_{1d} + L_{2d}' \right] \cdot \frac{di_1}{dt};$$

unde:

$$R_2' = R_2 \cdot \left[ \frac{N_1}{N_2} \right]^2; L_{2d}' = L_{2d} \cdot \left[ \frac{N_1}{N_2} \right]^2.$$

Dar  $R_1 + R_2' = R_{sc}$ ;  $L_{1d} + L_{2d}' = L_{sc}$ ;  $R_{sc}$ ,  $L_{sc}$  fiind, respectiv, rezistenta si inductivitatea de dispersii Kapp ale transformatorului.

Prin urmare, în timpul regimului tranzitoriu de scurtcircuit, transformatorul se comporta ca un circuit R - L, parametrii respectivi fiind rezistența și inductivitatea Kapp.

Dacă  $u_1 = U_1 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t - \alpha)$ , atunci soluția ecuației diferențiale:

$$u_1 = R_{sc} \cdot i_1 + L_{sc} \cdot \frac{di_1}{dt},$$

se găsește:

$$i_1 = I_{1sc} \cdot \sqrt{2} \cdot \left\{ \sin(\alpha + \varphi) \cdot e^{-\left[\frac{\omega t}{\text{tg}\varphi}\right]} + \sin(\omega \cdot t - \alpha - \varphi) \right\},$$

în care:  $I_{1sc}$  reprezintă valoarea efectivă a curentului de scurtcircuit pe partea primară a transformatorului, care, în regim permanent, cu înfășurarea secundară în scurtcircuit:

$$I_{1sc} = \frac{U_1}{\sqrt{R_{sc}^2 + \omega^2 \cdot L_{sc}}}, \text{ iar } \varphi = \arctg\left[\frac{\omega \cdot L_{sc}}{R_{sc}}\right].$$

Din expresia curentului instantaneu de scurtcircuit și rezulta că evoluția sa în timp este dependentă de faza inițială  $\alpha$  a tensiunii primare în clipa producerii scurtcircuitului. Dacă  $\alpha + \varphi = k \cdot \pi$ , atunci componenta aperiodică dispăre din expresia curentului instantaneu, din prima clipă a scurtcircuitului curentul intrând în regim permanent, amplitudinea maximă atinsă fiind evident  $I_{1sc} \cdot \sqrt{2}$ . Dacă  $\alpha + \varphi = \frac{\pi}{2}$ , componenta aperiodică este maximă în prima clipă a scurtcircuitului. În această ultimă situație, după aproximativ o jumătate de perioadă, când  $\omega \cdot t = \pi$ , curentul  $i_1$  înregistrează cel mai înalt vârf având valoarea:

$$i_{1\max} = I_{1sc} \cdot \sqrt{2} \cdot \left[ 1 + e^{-\left(\frac{\pi \cdot R_{sc}}{\omega \cdot L_{sc}}\right)} \right],$$

de aproximativ 1,2 - 1,6 ori mai mare decât valoarea efectivă  $I_{1sc}$  din regimul permanent.

## A.2

a) Un transformator trifazat de putere aparentă nominală  $S_N = 1600 \text{ kVA}$  are tensiunea relativă de scurtcircuit  $u_{sc} = 6\%$  și pierderile Joule în înfășurări la curenți nominali  $P_{CuN} = 25 \text{ kW}$ . Să se determine variația relativă de tensiune la gol la sarcină nominală pentru  $\cos \varphi_2 = 0,8$  inductiv.

b) Pentru acest transformator, de câte ori este mai mare curentul efectiv de scurtcircuit de regim permanent decât curentul primar care se poate înregistra în decursul regimului tranzitoriu al scurtcircuitului brusc la bornele secundare?

## Rezolvare:

a) Variatia relativa a tensiunii secundare exprimata în fractiuni din tensiunea secundara la mersul în gol, la  $U_1 = \text{ct.}$  are expresia:

$$\frac{\delta \cdot U_2}{U_{20}} = \beta \cdot [u_a \cdot \cos \varphi_2 + u_r \cdot \sin \varphi_2];$$

în care marimile:

- $u_a$  - caderea ohmica relativa;
- $u_r$  - caderea inductiva relativa;
- $\beta$  - gradul de încarcare al transformatorului;

au expresiile:

$$u_a = \frac{R_{sc} \cdot I_{1N}}{U_{1N}}; \quad u_r = \frac{X_{sc} \cdot I_{1N}}{U_{1N}}; \quad \beta = \frac{I_2}{I_{2N}};$$

tensiunea relativa de scurtcircuit putându-se exprima si ca functie de  $u_a$  si  $u_r$ :

$$u_{sc} = \sqrt{u_a^2 + u_r^2} = \frac{Z_{sc} \cdot I_{1N}}{U_{1N}}.$$

În enunt se dau pierderile Joule nominale  $P_{CuN}$ , care se pot corela cu caderea ohmica relativa  $u_a$ . Într-adevar, sa înmultim expresia lui  $u_a$  cu  $3 \cdot I_{1N}$  atât la numarator cât si la numitor se obtine:

$$u_a = \frac{3 \cdot R_{sc} \cdot I_{1N}^2}{3 \cdot U_{1N} \cdot I_{1N}} = \frac{P_{CuN}}{S_N} = \frac{25}{1600} = 0,0156.$$

În consecinta, variatia relativa de tensiune la bornele secundare de la gol la sarcina nominala ( $\beta = 1$ ) cu factor de putere  $\cos \varphi_2 = 0,8$  inductiv ( $\sin \varphi_2 = 0,6$ ) va fi:

$$\frac{\delta \cdot U_2}{U_{20}} = u_a \cdot \cos \varphi_2 + u_r \cdot \sin \varphi_2 = 0,0156 \cdot 0,8 + 0,0579 \cdot 0,6 = 0,0472.$$

Tensiunea secundara se va micsora cu 4,72%.

b) Curentul efectiv de scurtcircuit corespunzator regimului permanent va fi, conform problemei precedente. Daca împartim ambii termeni ai egalitatii de mai sus cu, curentul primar nominal, se obtine:

$$I_{1sc} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{R_{sc}^2 + X_{sc}^2}} = \frac{U_{1N}}{Z_{sc}}; \quad \frac{I_{1sc}}{I_{1N}} = \frac{U_{1N}}{Z_{sc} \cdot I_{1N}} = \frac{1}{U_{sc}};$$

cu alte cuvinte, inversul tensiunii relative de scurtcircuit arata de câte ori depaseste curentul efectiv la scurtcircuit curentul nominal.



În cazul concret al problemei de fata,

$$\frac{I_{\text{Isc}}}{I_{\text{IN}}} = \frac{1}{u_{\text{sc}}} = \frac{1}{0,06} = 16,67.$$

Pentru a gasi socul cel mai mare de curent la scurtcircuit, vom utiliza formula stabilita în problema precedenta:

$$i_{1\text{max}} = I_{\text{Isc}} \cdot \sqrt{2} \cdot \left[ 1 + e^{-\left(\frac{\pi \cdot R_{\text{sc}}}{X_{\text{sc}}}\right)} \right].$$

Cum  $\frac{X_{\text{sc}}}{R_{\text{sc}}} = \frac{u_{\text{r}}}{u_{\text{a}}} = \frac{0,0579}{0,0156} = 3,71$ , se gaseste:

$$i_{1\text{max}} = I_{\text{Isc}} \cdot \sqrt{2} \cdot \left[ 1 + e^{-\left(\frac{\pi}{3,71}\right)} \right] = 2,02 \cdot I_{\text{Isc}} = 33,68 \cdot I_{\text{IN}}.$$

Prin urmare, la transformatorul dat, în decursul unui scurtcircuit, dupa aproximativ jumatate de perioada (10ms) de la producerea scurtcircuitului, înfasurarile sunt solicitate la un curent de peste 30 de ori curentul nominal.

Solicitarea termica nu este în general periculoasa, deoarece va interveni imediat protectia la supracurenti a transformatorului, care va deconecta transformatorul de la rețeaua de alimentare. În schimb este periculoasa solicitarea mecanica a înfasurarilor datorita fortelor electrodinamice care depind de patratul curentilor din înfasurari, aceste forte fiind în cazul analizat de 1000 ori mai mari decât în functionarea normala.

Transformatorul trebuie sa fie consolidat corespunzator pentru a face fata acestor solicitari deosebite.

### A.3

Doua transformatoare trifazate având puterile aparente nominale  $S_{\text{NI}} = 250\text{kVA}$  si respectiv  $S_{\text{NII}} = 160\text{kVA}$  sunt conectate în paralel. Ele au acelasi raport de transformare, aceeasi grupa de conexiuni, acelasi unghi intern al impedantelor  $K_{\text{app}}$ , dar tensiuni relative de scurtcircuit diferite,  $u_{\text{scI}} = 6\%$ , respectiv,  $u_{\text{scII}} = 4\%$ .

a) Sa se determine puterea aparenta debitata de fiecare transformator în cazul unei sarcini comune  $S = 350\text{kVA}$ .

b) Care este capacitatea maxima de încarcare în kVA a ansamblului celor doua transformatoare, cu conditia ca nici unul din ele sa nu fie încarcat peste capacitatea nominala?

## Rezolvare:

a) După cum se cunoaște din literatura, la transformatoarele cu tensiuni relative de scurtcircuit diferite care funcționează în paralel, puterea aparentă totală reclamată de sarcină se repartizează invers proporțional cu tensiunile relative de scurtcircuit și direct proporțional cu puterile aparente nominale. Prin urmare, dacă puterea aparentă debitată de primul transformator este  $S_I$ , iar cel de-al doilea  $S_{II}$  atunci:

$$S = S_I + S_{II}; \quad \frac{S_I}{S_{II}} = \left[ \frac{S_{NI}}{S_{NII}} \right] \cdot \left[ \frac{u_{scII}}{u_{scI}} \right].$$

Numeric, sistemul devine:

$$S_I + S_{II} = 350; \quad \frac{S_I}{S_{II}} = \frac{250}{160} \cdot \frac{4}{6} = 1,04;$$

soluțiile lui fiind:

$$S_I = 178,4 \text{ kVA}; \quad S_{II} = 171,6 \text{ kVA};$$

Deoarece cel de-al doilea transformator este supraîncărcat cu 7,25% peste capacitatea nominală de 160 kVA, după un timp de funcționare va interveni protecția care va deconecta transformatorul în mod automat de la rețea. Întreaga sarcină de 350 kVA revine acum primului transformator, care va fi și el suprasolicitat peste capacitatea nominală de 250 kVA cu 40%, ceea ce va provoca deconectarea automată de la rețeaua de alimentare și a acestui transformator după un timp de funcționare. În consecință, cele două transformatoare nu pot face față împreună sarcinii de 350 kVA, deși capacitatea lor însumată este de 410 kVA din cauza tensiunilor relative de scurtcircuit diferite.

b) Dat fiind faptul că:

$$S_I = 1,04 \text{ kVA}; \quad S_{II} = 166,4 \text{ kVA}; \quad \frac{S_I}{S_{II}} = 1,04;$$

dacă cel de-al doilea transformator funcționează la sarcină nominală, adică  $S_{II} = 160 \text{ kVA} = S_{NII}$ , rezulta. Prin urmare, puterea aparentă totală ce se poate extrage de la rețea prin cele două transformatoare în paralel, fără ca nici unul să nu fie supraîncărcat, este:

$$S_I + S_{II} = 166,4 + 160 = 326,4 \text{ kVA};$$

cu mult sub capacitatea însumată de 410 kVA, ceea ce înseamnă o exploatare neratională și cheltuieli de investiții necorespunzătoare.